

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT : MRIE

Maitrise Des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE - GRI



Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE - GRI

Étude d'incertitude en QRA par la simulation Monte Carlo
Cas du débutaniseur du nouveau projet RKF 2.0

ABBAS Hiba

Sous la direction de :

M ^r . A.KERTOUS	Maître Assistant A	ENP
M ^r . M.BOUSBAL	Maître de Conférences B	ENP
M ^r . M.BOUMARAF	Chef service Prévention	SONATRACH
M ^r . I.BENGHALEM	Ingénieur HSE	SONATRACH

Présenté et soutenu publiquement le 07 / 07 / 2025 devant le jury composé de :

Président	M ^r . H. YOUSFI	Professeur	ENP
Examineurs	M ^r . M.BOUBAKEUR	Maître Assistant A	ENP
	M ^r . M.LEGUEBEDJ	Maître de Conférences B	ENP

ENP 2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT : MRIE

Maitrise Des Risques Industriels et Environnementaux

Filière : QHSE - GRI



Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en QHSE - GRI

Étude d'incertitude en QRA par la simulation Monte Carlo
Cas du débutaniseur du nouveau projet RKF 2.0

ABBAS Hiba

Sous la direction de :

M ^r . A.KERTOUS	Maître Assistant A	ENP
M ^r . M.BOUSBAL	Maître de Conférences B	ENP
M ^r . M.BOUMARAF	Chef service Prévention	SONATRACH
M ^r . I.BENGHALEM	Ingénieur HSE	SONATRACH

Présenté et soutenu publiquement le 07 / 07 / 2025 devant le jury composé de :

Président	M ^r . H. YOUSFI	Professeur	ENP
Examineurs	M ^r . M.BOUBAKEUR	Maître Assistant A	ENP
	M ^r . M.LEGUEBEDJ	Maître de Conférences B	ENP

ENP 2025

ملخص :

في هذا المشروع، تم تطبيق تقييم كمي للمخاطر على جهاز إزالة البيوتان في وحدة CPF2 بحقل RKF 2.0 المستغل من طرف GRKF، من خلال مقارنة منهج حتمي مع منهج احتمالي يعتمد على المحاكاة مونت كارلو. سمحت الـ QRA التقليدية، القائمة على قيم ثابتة، بتقدير الترددات، ونمذجة العواقب، وحساب مؤشرات المخاطر الفردية والاجتماعية. أما النهج الاحتمالي فقد أسند توزيعات احتمالية للمتغيرات غير المؤكدة، لتوليد آلاف السيناريوهات والحصول على رؤية أكثر واقعية للتحولات. أظهرت المقارنة أن المنهج التقليدي يقلل من تقدير المخاطر، بينما يوفر النهج الاحتمالي نتائج أكثر تمثيلاً وموثوقية. وفي الأخير، تم تطوير واجهة أوتوماتيكية لتسهيل استعمال هذه التحليلات من طرف المهندسين وتيسير إدماج المنهج الاحتمالي في الممارسات الصناعية.

الكلمات المفتاحية

تقييم كمي للمخاطر، تقييم كمي للمخاطر، النهج الاحتمالي، محاكاة مونت كارلو، المخاطر الفردية، المخاطر الاجتماعية

Abstract:

In this project, a quantitative risk assessment was applied to the debutanizer of the CPF2 unit at the RKF 2.0 field operated by GRKF, comparing a deterministic approach with a probabilistic approach based on Monte Carlo simulation. The traditional QRA method, relying on fixed values, allowed the estimation of frequencies, the modeling of consequences, and the calculation of individual and societal risk indicators. The probabilistic approach, on the other hand, assigned probability distributions to the uncertain variables to generate thousands of scenarios and obtain a more realistic view of variability. The comparison showed that the classical approach underestimates the risk, whereas the probabilistic approach provides more representative and robust results. Finally, an automated interface was developed to make these analyses more accessible to engineers and to facilitate the integration of the probabilistic method into industrial practice.

Keywords: QRA, Probabilistic approach, Monte Carlo simulation, Individual risk, Societal risk

Résumé :

Dans ce projet, une évaluation quantitative des risques a été appliquée au débutaniseur du CPF2 du champ RKF 2.0 exploité par GRKF, en comparant une approche déterministe à une approche probabiliste basée sur la simulation Monte Carlo. La QRA classique, fondée sur des valeurs figées, a permis d'estimer les fréquences, modéliser les conséquences et calculer les indicateurs de risque individuel et sociétal. La démarche probabiliste a quant à elle attribué des distributions de probabilité aux variables incertaines, afin de générer des milliers de scénarios et d'obtenir une vision plus réaliste de la variabilité. La comparaison a mis en évidence que l'approche classique sous-estime le risque, tandis que l'approche probabiliste fournit des résultats plus représentatifs et robustes. Enfin, une interface automatisée a été développée pour rendre ces analyses plus accessibles aux ingénieurs et faciliter l'intégration de la méthode probabiliste dans la pratique industrielle.

Mots-clés : QRA, Approche probabiliste, Simulation Monte Carlo, Risque individuel, Risque sociétal.

Remerciement

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ALLAH, Le Tout-Puissant, pour la force, la patience et la persévérance qu'Il m'a accordées tout au long de ce parcours.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce projet.

Je remercie vivement Messieurs M. BOUSBAI et A. KERTOUS, enseignants chercheurs à l'École Nationale Polytechnique pour leur encadrement rigoureux, leur disponibilité et leurs conseils avisés tout au long de cette étude.

Je remercie tout particulièrement Monsieur M. BOUMARAF, Chef du service Prévention chez SONATRACH, ainsi que Monsieur I. BENGHALEM, Ingénieur HSE, pour leur confiance, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de cette expérience. Leur soutien a été d'une grande importance pour le bon déroulement de mon travail.

Mes remerciements vont également à Monsieur M. CHEA, chef département HSE, pour son accueil chaleureux au sein du département.

J'adresse ma reconnaissance aux membres du jury, Monsieur H. YOUSFI en qualité de président, Messieurs M. BOUBAKEUR et M. LEGUEBEDJ, pour le temps consacré à l'évaluation de ce travail ainsi que pour leurs remarques constructives.

Je remercie également les employés du Groupement GRKF, en particulier Messieurs MOULAY, ROUAINIA, KHENCHOUL, M'HIGUEN, CHERRIER, SMAILI et GUERFI, pour leur accueil, leur collaboration et leur aide précieuse lors de mon intégration au sein du site.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble du corps enseignant de l'École Nationale Polytechnique, notamment Mme K.BITCHIKH et M.FODIL pour la qualité de l'enseignement dispensé et l'engagement dont ils ont fait preuve tout au long de notre formation.

À toutes ces personnes, je présente mes remerciements les plus sincères, ainsi que mon profond respect et ma reconnaissance.

Dédicace

À ma chère maman et à mon papa,

Vos prières, votre patience et votre amour ont toujours été ma force. Chaque pas que j'ai fait vers ce rêve, je vous le dois.

À ma tendre Mamas,

Tu n'es plus là, mais ton soutien, ton regard fier et tes mots résonnent encore en moi. Ce mémoire est aussi le tien. Paix à ton âme.

À ma tante et deuxième maman Souhila, Merci d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir portée comme ta propre fille. À toi aussi, khali Azzedine, pour ton affection et ton soutien inconditionnel, ainsi qu'à ma tante Nawel, pour son soutien, sa générosité et sa présence réconfortante.

À mon frère Mohamed, mon repère, mon bras droit, merci d'avoir été là dans les hauts comme dans les bas.

À mes sœurs Malak, Alaa, Yousra, et à sa petite famille Lotfi et Amir, vous êtes mon refuge, mon équilibre et mon moteur.

À mes précieuses amies, Nada, Sarah, Kheira, Asma, Meriem, Lyna et Yasmine.

Merci pour chaque éclat de rire, chaque larme, chaque moment de doute partagé, et chaque victoire célébrée ensemble. Vous avez illuminé ce parcours.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont soutenue, encouragée, écoutée... merci du fond du cœur.

« Ve son olarak kendime ; Doğru yolu bulmak için kaybolman gerekti.... Aferin sana. Başardin! »

Table des matières

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction Générale.....	15
1 Contexte générale de l'étude	17
1.1 Présentation de GRKF	18
1.2 Présentation du projet RKF2.0	19
1.3 Description générale du processus CPF2	19
1.4 Problématique, objectifs et méthodologie	21
1.4.1 Structure de la problématique	21
1.4.2 Objectif du projet	21
1.4.3 Méthodologie envisagée.....	22
2 Cadre conceptuel et méthodologique de l'évaluation quantitative des risques.....	20
2.1 Introduction à l'Analyse Quantitative des Risques	25
2.2 Méthodologie de la QRA	26
2.2.1 Identification des dangers.....	26
2.2.2 Segmentation des systèmes	27
2.2.3 Analyse des conséquences	29
2.2.4 Analyse des fréquences	46
2.2.5 Evaluation du risque.....	49
3 Incertitudes en QRA : Typologies, sources et méthodes de traitement	11
3.1 Typologies d'incertitudes	53
3.1.1 Incertitudes aléatoires.....	53
3.1.2 Incertitudes épistémiques	53
3.2 Incertitudes introduites aux différentes étapes de la QRA	53

3.2.1	Incertitudes dans l'analyse des fréquences.....	54
3.2.2	Incertitudes dans la modélisation des conséquences.....	55
3.3	Méthodes de traitement des incertitudes	56
3.3.1	Représentation par intervalles	56
3.3.2	Représentation floue.....	56
3.3.3	Simulation Monte Carlo	57
3.3.3.2	Intérêt de la méthode Monte Carlo en QRA	58
4	Application de la QRA classique au système débutaniseur	60
4.1	Présentation du système à étudier	61
4.1.1	Fonctionnement du débutaniseur	61
4.2	Mise en œuvre de l'étude	62
4.2.1	Données et Hypothèses de l'Étude	62
4.2.2	Identification des dangers.....	65
4.3	Segmentation des sections isolables.....	66
4.3.1	Comptage des composants	67
4.4	Modélisation des conséquences	67
4.4.1	Débit de fuite	67
4.4.2	Dispersion du Gaz inflammable	67
4.4.3	Suppression d'une explosion de nuage de vapeur	69
4.5	Analyse de fréquence	70
4.5.1	Probabilité d'ignition.....	70
4.5.2	Fréquences de perte de confinement	70
4.5.3	Développement d'arbre des évènements.....	71
4.6	Calcul des risques.....	71
4.6.1	Risque individuel localisé (LSIR)	71
4.6.2	Risque individuel annuel (IRPA).....	72
4.6.3	Risque sociétal - Perte potentielle de vies humaines (PLL).....	72

5	QRA probabiliste – Intégration de la simulation Monte Carlo	49
5.1	Analyse des conséquences	75
5.1.1	Calcul du Débit.....	75
5.1.2	Calcul de la Dispersion	81
5.1.3	Calcul des effets du VCE	84
5.2	Analyse des fréquences	86
5.2.1	Fréquences des pertes de confinement	86
5.2.2	Arbre des évènements	86
5.3	Estimation des risques.....	87
5.3.1	Calcul du Risque individuel localisé (LSIR) par Monte Carlo	87
5.3.2	Calcul du Risque individuel annuel (IRPA)	89
5.3.3	Risque sociétal - Perte potentielle de vies humaines (PLL).....	91
6	Évaluation croisée des approches déterministe et probabiliste : Résultats et perspectives	92
6.1	Écarts dans l'analyse des conséquences.....	93
6.1.1	Débit de fuite : valeur fixe vs simulation Monte Carlo.....	93
6.1.2	Distances de dispersion simulées : classique vs P95.....	94
6.1.3	Suppression VCE : variation liée à l'incertitude.....	95
6.2	Impact du choix de base de données sur l'analyse des fréquences	97
6.3	Influence des écarts dans l'évaluation des risques	97
6.3.1	Mise en parallèle des résultats LSIR	97
6.3.2	Comportement des valeurs IRPA selon l'approche adoptée.....	98
6.3.3	Évolution des estimations PLL en contexte incertain	99
6.4	Recommandation : Développement d'une interface de calcul probabiliste pour la QRA (Proba QRA)	100
6.4.1	Description détaillée de l'interface Proba QRA.....	100
6.4.2	Business Model Canvas :	104
	Conclusion Générale	107

Références	109
Annexe A : HAZOP du nœud Débutaniseur 3200-CB-02	109
Annexe B : Matrice de criticité de GRKF	114
Annexe C : Identification de dangers	115
Annexe D : Section isolable ISO-35-G	116
Annexe E : Compte de parties	117
Annexe F : Fréquences de fuites	118
Annexe G : Business Model Canvas de Proba QRA.....	122

Liste des Figures

Figure 1.1: Localisation du champ RKF [1]	19
Figure 1.2 : Schéma du bloc global des différents flux du nouveau CPF2 [1]	20
Figure 2.1: Organigramme du processus de la QRA [4]	26
Figure 2.2: Classification des événements indésirables [9]	29
Figure 2.3 : Suppression latérale maximale réduite pour le modèle Multi-Énergie (MEM) [10] ..	41
Figure 2.4 : Durée réduite de la phase positive pour le modèle Multi-Énergie (MEM)	42
Figure 2.5: Exemple générique d'arbre d'événements [24]	48
Figure 4.1 : Vue d'ensemble de l'implantation par zones fonctionnelles du CPF 2 [1]	61
Figure 4.2 : DIAGRAMME DU FLUX DE PROCÉDE du débutaniseur 3200-CB-02 [1]	62
Figure 4.3: Rose des vents [5]	64
Figure 4.4: Arbre des événements associé à une perte de confinement	71
Figure 5.1: Script de calcul du débit massique en cas de fuite de GPL	75
Figure 5.2: Script de génération des diamètres de fuite	76
Figure 5.3: Script de génération des coefficients de décharge	78
Figure 5.4 : Script d'affichage des résultats de calcul des débits massiques par Monte Carlo	79
Figure 5.5 : Histogrammes des débits massiques simulés par classe de fuite	79
Figure 5.6 : Données météorologiques mensuelles à Berkine (Ouargla) [40]	81
Figure 5.7 : Script d'intégration des paramètres incertains dans la modélisation de la dispersion	85
Figure 5.8: script d'implémentation du modèle Multi-Énergie dans la simulation probabiliste	96
Figure 5.9: Arbre des événements basé sur trois fréquences de perte de confinement	87
Figure 5.10: Extrait du script MATLAB utilisé pour la simulation Monte Carlo du LSIR	88
Figure 5.11 : Représentation boîte à moustaches du LSIR simulé par la méthode de Monte Carlo	88
Figure 5.12: Comparaison des risques individuels (IRPA)	90
Figure 6.1: Comparaison des surfaces de nuage inflammable entre approches	94
Figure 6.2: Distances de suppression VCE - Classique vs Probabiliste (P95)	96
Figure 6.3: Comparaison des IRPA classique et probabiliste	98
Figure 6.7: Comparaison des valeurs PLL selon les approches	99
Figure 6.5: Interface principale de navigation (Home Page)	101
Figure 6.6: Données d'entrée procédé et météorologie (Inputs – Process Page)	101

Figure 6.7:Résultats des débits et de la dispersion (Consequence Analysis - Partie haute).....	102
Figure 6.8: Volumes inflammables et distances VCE (Consequence Analysis - Partie basse) ...	102
Figure 6.9:Calcul des indicateurs LSIR, IRPA et PLL (Risk Results Page)	103

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 : Coefficients de dispersion atmosphérique selon Briggs	34
Tableau 2.2 : les Probits de Thermal radiation	44
Tableau 4.1: Donnée d'occupation	62
Tableau 4.2: Critères d'acceptabilité du risque individuel	65
Tableau 4.3: Catégories de taille de trou	65
Tableau 4.4 : Liste des sections isolables associé à l'unité débutaniseur	66
Tableau 4.5: Propriétés des fluides impliqués dans les sections isolables	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4.6:Débits de fuite associés aux différents scénarios pour l'ISO-35-G	67
Tableau 4.7 : Résultats de la dispersion du GPL des deux scénarios	68
Tableau 4.8 : Volumes inflammables totaux.....	68
Tableau 4.9 : Distances de surpression en cas d'explosion tardive de nuage de vapeur	69
Tableau 4.10 : Probabilité de létalité en fonction de la surpression	69
Tableau 4.11: Probabilité d'ignition	70
Tableau 4.12 : LSIR de la zone du débutaniseur.....	71
Tableau 4.13: Risque individuel annuel par groupe de travailleurs	72
Tableau 4.14: PLL pour chaque groupe de travailleurs.....	73
Tableau 5.1: Débits représentatifs après ajustement au débit nominal du système.....	80
Tableau 5.2:Paramètres météorologiques mensuels extrêmes	81
Tableau 5.3:Caractéristiques statistiques des paramètres incertains	82
Tableau 5.4:Distances atteintes (m) pour chaque surpression au 95e percentile	86
Tableau 5.5 : Valeur du LSIR (P95) estimée pour la zone de récupération du GPL.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5.6: Risque individuel annuel par groupe de travailleurs	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 5.7: PLL pour chaque groupe de travailleurs.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 6.1:Débit massique de fuite – Approche classique vs approche probabiliste (P95)	93
Tableau 6.2:Données comparatives de fuite et de VCE : IOGP, OREDA et CCPS.....	97
Tableau 6.3:Résultats comparés du LSIR.....	98

Liste des Abréviations

ALOHA	<i>Areal Locations of Hazardous Atmospheres</i>
ADE	<i>Arbre des Événements</i>
BDV	<i>Blow Down Valve</i>
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CPF2	<i>Central Processing Facility 2</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
EAM	<i>Enterprise Asset Management</i>
EFFECTS	<i>Software for Modelling Hazardous Effects</i>
ESDV	<i>Emergency shyt down valve</i>
FEED	<i>Front-End Engineering Design</i>
FEEP	<i>Front-End Execution Planning</i>
FBR	<i>Full Bore Rupture</i>
GPL	<i>Gaz de Pétrole Liquéfié</i>
HAZID	<i>Hazard Identification</i>
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
HEGADAS	<i>Heavy Gas Dispersion Model Area Source</i>
HGSYSTEM	<i>Hazardous Gas Dispersion Modelling System</i>
HMB	<i>Heat and Material Balance</i>

HP	<i>High Pressure</i>
HSE	<i>Health and Safety Executive</i>
IOGP	<i>International Association of Oil & Gas Producers</i>
IRPA	<i>Individual Risk Per Annum</i>
LFL	<i>Lower Flammable Limit</i>
LOC	<i>Loss Of Containment</i>
LP	<i>Low Pressure</i>
LSIR	<i>Localised Societal Individual Risk</i>
MEM	<i>Multi Energy Model</i>
NC	<i>Normally Closed</i>
OREDA	<i>Offshore and Onshore Reliability Data</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
P95	Percentile 95 ^e
PFD	<i>Process Flow Diagram</i>
Phast	<i>Process Hazard Analysis Software Tool</i>
PLL	<i>Potential Loss of Life</i>
QRA	<i>Quantitative Risk Assessment</i>
RKF 2.0	Rhoude El Khrouf 2.0
SDV	<i>Shut Down Valve</i>
TNO	<i>Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek)</i>
TÜV	<i>Technischer Überwachungsverein (Technical Inspection Association)</i>

UFL	<i>Upper Flammable Limit</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i>
VCE	<i>Vapor Cloud Explosion</i>

Introduction Générale

Les installations pétrolières et gazières comptent parmi les environnements industriels les plus exposés aux incidents graves. Des catastrophes telles que Piper Alpha (1988) ont montré qu'une seule défaillance peut provoquer des pertes humaines et matérielles considérables, même dans des installations sophistiquées. Ces retours d'expérience soulignent l'importance d'une analyse systématique des risques et d'une mise à niveau continue des barrières de sécurité.

Le champ de Rhourde El Khrouf (RKF), situé dans le bassin de Berkine et exploité par le Groupement RKF (GRKF), fait actuellement l'objet du projet RKF 2.0. Celui-ci comprend la construction d'un nouveau centre de traitement CPF2 où le débutaniseur assure la séparation des coupes légères. Son fonctionnement à haute pression, associé à un inventaire important de gaz liquéfiés, en fait un équipement critique.

Dans ce contexte, le présent travail vise l'intégration explicite de l'incertitude dans une analyse quantitative des risques (QRA) appliquée au débutaniseur du nouveau centre de traitement CPF2, faisant partie du projet de redéveloppement RKF 2.0. Cette approche s'inscrit dans une volonté de rendre les évaluations de risques plus représentatives de la réalité opérationnelle, en remplaçant les hypothèses fixes classiques par une simulation probabiliste basée sur la méthode de Monte Carlo. En se basant sur les exigences de fiabilité et de robustesse de l'analyse des risques pour ce type d'unité critique, nous organisons notre travail en six chapitres :

Un premier chapitre est consacré à la présentation générale du projet RKF 2.0, du site industriel concerné, ainsi que du rôle du débutaniseur dans le procédé global de traitement. Ce chapitre décrit également les principales caractéristiques techniques de l'unité et présente la problématique du travail, les objectifs fixés ainsi que la méthodologie adoptée.

Le deuxième chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art sur l'évaluation quantitative des risques. Il introduit la méthode QRA, les outils d'analyse qui y sont associés comme la HAZOP, et l'arbre des événements, avant de présenter la logique de la simulation Monte Carlo et son intérêt dans le traitement de l'incertitude.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des incertitudes dans le cadre de la QRA. Nous abordons les différentes typologies d'incertitudes (aléatoires et épistémiques), leurs sources aux diverses étapes de l'analyse, et les principales méthodes utilisées pour les représenter et les traiter,

notamment la simulation Monte Carlo, en soulignant son intérêt spécifique dans le contexte des QRAs.

Dans le quatrième chapitre, nous réalisons une analyse quantitative des risques appliquée au débutant selon une approche déterministe. Les sources de danger sont identifiées, les scénarios d'accident sont développés à travers une analyse fonctionnelle, puis les conséquences sont modélisées et les risques sont calculés à l'aide des outils classiques.

Le cinquième chapitre est dédié à l'introduction des incertitudes dans les paramètres critiques de la QRA. Après avoir défini les distributions de probabilité des données sensibles (fréquences de fuites, conditions météorologiques, etc.), une simulation Monte Carlo est mise en œuvre afin de générer une évaluation probabiliste du risque. L'objectif est de visualiser la variabilité des résultats et d'en dégager les tendances significatives.

Le dernier chapitre est consacré à l'analyse comparative entre l'approche déterministe et l'approche probabiliste. Nous identifions les écarts obtenus sur les différentes étapes du processus de la QRA, les indicateurs de risque, et discutons des implications sur la prise de décision en matière de sécurité industrielle. Afin d'illustrer concrètement la faisabilité de l'approche probabiliste, une interface automatisée de calcul QRA a été développée sous Excel à l'aide du langage VBA.

Chapitre 1

Contexte générale de l'étude

L'industrie pétrolière est un pilier stratégique de l'économie nationale, jouant un rôle essentiel dans la production d'énergie et le développement industriel. Face à une demande énergétique croissante et à des défis liés à la rentabilité et à la sécurité des installations, les compagnies pétrolières sont amenées à investir dans des projets de modernisation et de redéveloppement de leurs champs existants.

Dans le présent chapitre, nous allons d'abord présenter le groupement GRKF, son champ d'exploitation et le projet de redéveloppement RKF 2.0. Ensuite, nous décrirons le fonctionnement global du processus de traitement dans la nouvelle installation CPF2. Enfin, nous exposerons la problématique de l'étude, les objectifs visés ainsi que la méthodologie adoptée pour mener à bien ce travail.

1.1 Présentation de GRKF

Le champ de Rhourde El Khrouf (RKF) est localisé dans l'erg oriental, au sud-est de l'Algérie, à environ 400 km de Hassi Messaoud. Il a été découvert en 1992 par la compagnie espagnole CEPSA. La mise en production a été lancée en mai 1996, et une licence couvrant une superficie de 357 km² a été accordée en juillet 1997.

L'exploitation du champ est assurée par le Groupement RKF (GRKF), une joint-venture établie entre SONATRACH (51 %) et CEPSA (49 %) dans le cadre d'un contrat de concession. Depuis le démarrage de la production, plus de 147 millions de barils de pétrole ont été extraits. Néanmoins, le champ est aujourd'hui en déclin naturel.

Les deux partenaires ont déjà démontré leur engagement dans le développement de plusieurs champs pétroliers majeurs au sein du bassin de Berkine, notamment Ourhoud, Bir El M'Sana (BMS) et GTIM. CEPSA, présente en Algérie depuis plus de 30 ans, est également active dans d'autres régions du monde, notamment en Colombie. Quant à SONATRACH, elle reste le principal opérateur de plusieurs grands gisements du Sahara algérien, tels que Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et In Salah. [1]

Le champ RKF et les installations associées sont localisées sur la carte (figure 1.1).

Figure 1.1: Localisation du champ RKF [1] **(Confidentiel)**

1.2 Présentation du projet RKF2.0

Le projet RKF2.0 constitue une initiative stratégique de redéveloppement du champ RKF. Porté par le Groupement RKF, il vise à prolonger la durée de vie du champ en exploitant de manière optimale les réserves restantes, tout en répondant aux exigences de sécurité, de durabilité et de rentabilité économique.

Ce projet s'inscrit dans une logique de création de valeur à long terme pour toutes les parties prenantes. Il a pour ambition de maximiser la récupération des hydrocarbures par des moyens compétitifs et fiables, tout en respectant les normes locales en matière de santé, sécurité et environnement.

Le projet intervient dans un contexte où les installations existantes du CPF montrent des signes de vieillissement : capacité limitée de traitement, obsolescence technologique, corrosion et inefficacité opérationnelle. Ainsi, RKF2.0 prévoit le remplacement de l'actuel CPF et du réseau de collecte associé par un nouveau centre de traitement appelé CPF2. Ce dernier intégrera de nouveaux puits de production, un réseau de collecte modernisé, ainsi qu'un ensemble d'unités de traitement gaz/huile/eau plus performantes. [1]

1.3 Description générale du processus CPF2

Le schéma de procédé illustré dans la figure (1.2) présente les principales étapes de traitement des fluides issus des puits de production RKF 2.0, depuis leur arrivée à la CPF2 jusqu'à l'exportation du pétrole brut stabilisé et du GPL, ainsi que la réinjection du gaz et de l'eau.

Figure 1.2 : Schéma du bloc global des différents flux du nouveau CPF2 [1] **(Confidentiel)**

Les étapes clés du processus sont détaillées comme suit :

➤ Arrivée des Effluents des Puits

Les effluents en provenance des puits de production (1310), des puits WAG (1440), des puits MIOL (5000) et des puits GI (1430) sont dirigés vers la CPF2. Ils passent par une séparation initiale dans le séparateur haute pression (2020), où le fluide est fractionné en trois phases : gaz, pétrole et eau. [1]

➤ **Traitement des Hydrocarbures Liquides**

Le pétrole brut extrait du séparateur HP est dirigé vers le séparateur basse pression (2020), suivi d'un traitement par dilution (5000 & 5200) et un dessalage (2110). Cette étape est cruciale pour réduire la teneur en sel avant la stabilisation du pétrole brut (2140), permettant d'éliminer les composants volatils.

Le pétrole stabilisé est ensuite transféré vers les réservoirs de stockage avant d'être mesuré fiscalement (2200) puis exporté vers la MOL (Main Oil Line – 2900). [1]

➤ **Traitement et Stockage du GPL**

Le gaz liquide récupéré est envoyé vers l'unité de dééthanisation et récupération du GPL (3200), où il est séparé du gaz sec. Le GPL conforme est ensuite stocké (3300) avant d'être exporté via la ligne dédiée, après comptage fiscal.

Deux circuits parallèles sont prévus pour la gestion du GPL conforme et hors spécifications, selon les modalités décrites dans les notes du schéma. [1]

➤ **Compression et Injection du Gaz**

Le gaz séparé est comprimé par un train de compression en deux étages (2300 & 2500). Une étape intermédiaire de déshydratation par tamis moléculaire (2410) est mise en œuvre pour protéger les équipements et assurer une qualité de gaz compatible avec les conditions d'injection.

Le gaz à haute pression est ensuite injecté via des lignes dédiées vers les puits GI (1430). [1]

➤ **Traitement de l'Eau Produite**

L'eau extraite lors des étapes de séparation est dirigée vers le système de traitement des eaux (4400), où elle subit une série de traitements (hydrocyclones, flottation, filtration). L'objectif est d'atteindre une qualité inférieure à 10 mg/l d'huile libre avant réinjection.

Une station de filtration finale (4410) permet d'assurer la conformité aux spécifications. L'eau traitée est injectée via le système d'injection (5100), en provenance des puits d'eau barrémiens (1600) et de l'eau produite recyclée. [1]

➤ **Gestion des Gaz et Systèmes de Torche**

Le schéma prévoit plusieurs systèmes de torchage :

- Torche HP (4300) : Pour les gaz issus des équipements haute pression.
- Torche LP (4300) : Pour les dégazages basse pression.
- Torche ATM (4300) : Pour les évacuations atmosphériques.

Ces torches assurent la sécurité du procédé en cas de surpression ou d'évacuation d'urgence. [1]

➤ **Traitement du Gaz Combustible**

Une unité dédiée (4500) assure le traitement et la distribution du gaz combustible, utilisé notamment comme gaz d'instrumentation, d'alimentation des turbines de compression, ou encore pour l'induction dans les unités de flottation. [1]

1.4 Problématique, objectifs et méthodologie

1.4.1 Structure de la problématique

L'évaluation quantitative des risques (QRA) est un outil essentiel pour identifier, quantifier et gérer les risques associés aux installations industrielles manipulant des substances dangereuses. Dans la pratique, les QRAs sont majoritairement menées de façon déterministe, en attribuant des valeurs fixes à l'ensemble des paramètres d'entrée : conditions météorologiques constantes, tailles de fuites typiques, coefficients de décharge standards, niveaux de congestion présumés, etc. Parmi ces paramètres, les fréquences de fuite occupent une place centrale. Pourtant, plusieurs bases de données industrielles existent, et aucune directive claire ne précise laquelle doit être utilisée. Ces bases peuvent donner des valeurs sensiblement différentes pour un même scénario, ce qui peut mener à des résultats de risque très contrastés selon le choix opéré par l'analyste. Ce manque d'uniformité dans le traitement des fréquences, combiné aux incertitudes liées aux modèles de conséquences et aux jugements d'expert, fragilise la robustesse globale de l'analyse. Comme la QRA classique produit une seule valeur numérique finale, sans indiquer la dispersion des résultats ni le niveau de confiance associé elle peut soit sous-estimer, soit surestimer le risque réel. Ce point devient particulièrement critique lorsque l'analyse sert de base à des décisions réglementaires ou opérationnelles, notamment en cas de résultats proches des seuils d'acceptabilité. Cela soulève une question centrale : « Comment l'intégration explicite des incertitudes dans la QRA, à travers la simulation Monte Carlo, peut-elle améliorer la robustesse de l'évaluation des risques et la fiabilité des décisions de sécurité ? »

1.4.2 Objectif du projet

Ce projet vise à évaluer l'effet des incertitudes sur les résultats d'une QRA, en comparant deux approches : une première, déterministe, fondée sur des paramètres d'entrée fixes, et une seconde, probabiliste, dans laquelle certains paramètres clés sont simulés aléatoirement via Monte Carlo selon des lois de probabilité réalistes. L'objectif n'est pas de réaliser une QRA probabiliste complète, mais de modéliser la variabilité des étapes intermédiaires notamment les conséquences et les fréquences et d'en analyser l'impact sur les indicateurs finaux. Cette démarche permettra

d'apprécier l'écart introduit par l'incertitude, et de montrer dans quelle mesure elle peut améliorer la fiabilité de l'évaluation du risque et la qualité des décisions prises en contexte industriel.

1.4.3 Méthodologie envisagée

L'étude repose sur l'application comparative de deux approches d'évaluation quantitative des risques appliquées à un équipement critique du site industriel CPF2 : le débutaniseur.

La démarche est structurée en cinq grandes étapes :

1.4.3.1 Description du système à étudier

Cette première étape consiste à présenter le système étudié, à savoir le débutaniseur du site CPF2. Elle comprend la description du rôle de l'équipement dans le procédé, l'identification des paramètres de fonctionnement, ainsi que la sélection de la section isolable concernée par l'étude à partir du P&ID. Ces éléments servent de base à la suite de l'analyse.

1.4.3.2 Démarche QRA classique appliquée au débutaniseur

Afin de répondre aux exigences d'une analyse quantitative, la méthode QRA est appliquée à la section isolable du débutaniseur retenue pour l'étude. L'évaluation commence par une analyse des déviations de procédé selon la méthode HAZOP, permettant d'identifier les scénarios redoutés associés à des pertes de confinement. Les événements initiateurs sont ensuite quantifiés à l'aide des fréquences de fuite proposées par la base de données IOGP, en fonction des classes de diamètre et du type d'équipement. Pour chaque plage de taille de fuite (petite, moyenne, grande), une taille équivalente est sélectionnée afin de procéder à une modélisation représentative des conséquences.

1.4.3.3 Modélisation des incertitudes dans les paramètres critiques

Une fois l'analyse classique établie, les paramètres les plus sensibles à l'incertitude sont identifiés : diamètre de fuite, coefficient de décharge, conditions météorologiques, fréquence de fuite issues de différentes bases de données et niveau de congestion. À chacun de ces paramètres est associée une loi de probabilité adaptée (uniforme, normale tronquée, etc.), définie en fonction de la plage de variation propre à chaque variable.

1.4.3.4 Intégration des incertitudes par simulation Monte Carlo pour une QRA probabiliste

Un modèle probabiliste est développé sous MATLAB pour intégrer la variabilité des paramètres incertains. Celui-ci génère des milliers de scénarios aléatoires, dans lesquels les valeurs d'entrée sont tirées selon leurs distributions probabilistes. Les résultats obtenus pour chaque scénario permettent d'estimer les distributions statistiques des conséquences et des fréquences. Des indicateurs tels que les percentiles notamment le P95, reflétant une borne supérieure crédible sont ensuite extraits.

1.4.3.5 Comparaison des approches et interprétation des résultats

Les résultats obtenus par la méthode classique sont comparés à ceux issus de la simulation Monte Carlo. L'analyse des écarts permet d'évaluer l'effet réel de l'incertitude sur les indicateurs de risque, et de discuter des apports et limites de l'approche déterministe. L'objectif final est de mieux apprécier l'utilité de cette intégration dans un contexte industriel réel.

1.4.3.6 Développement d'une interface automatisée

Afin de faciliter l'exploitation des calculs probabilistes dans un cadre industriel, une interface automatisée a été développée sous Excel en langage VBA. Celle-ci reprend les modèles développés sous MATLAB et les rend accessibles via des boutons de commande permettant de lancer les différentes simulations. L'interface lit automatiquement les données d'entrée, exécute les boucles Monte Carlo, et affiche les résultats P95 directement dans des tableaux structurés.

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le contexte général de notre étude à travers une description du groupement GRKF, du projet de redéveloppement RKF 2.0, ainsi que du fonctionnement du nouveau centre de traitement CPF2.

Cette mise en contexte nous a permis de mieux comprendre le système dans lequel s'inscrit notre étude, de cerner la problématique liée à l'incertitude dans les études de risques, et de définir les objectifs à atteindre.

La méthodologie envisagée a également été introduite, en posant les bases de l'approche comparative entre QRA classique et probabiliste. Le chapitre suivant sera consacré au cadre théorique nécessaire pour appuyer cette démarche.

Chapitre 2

Cadre conceptuel et méthodologique de l'évaluation quantitative des risques

L'analyse quantitative des risques (QRA) est largement utilisée dans l'industrie des procédés pour quantifier et prédire les risques d'accidents majeurs, notamment dans les secteurs pétrolier, gazier, chimique et nucléaire. Elle s'impose aujourd'hui comme un outil de référence pour la gestion des risques industriels et l'aide à la décision, en particulier après l'adoption de réglementations internationales comme la directive Seveso en Europe.

Dans ce chapitre, nous présentons les bases théoriques de l'évaluation quantitative des risques, ses principes fondamentaux, ses méthodes de calcul et ses principales étapes.

2.1 Introduction à l'Analyse Quantitative des Risques

L'Analyse Quantitative de Risque est une approche systématique utilisée pour évaluer les risques associés à des procédés industriels dangereux. Elle permet de quantifier la probabilité d'occurrence de différents scénarios d'accidents ainsi que la gravité de leurs conséquences potentielles. L'objectif principal de la QRA est de fournir aux décideurs une vision claire et chiffrée des niveaux de risque afin de faciliter la mise en place de mesures de sécurité adéquates et de favoriser une prise de décision fondée sur le risque (*risk-informed decision-making*) [2].

La démarche QRA repose sur deux composantes fondamentales :

- **L'analyse de fréquence**, qui vise à estimer la probabilité de survenue d'événements dangereux, comme une fuite, une explosion ou un incendie ;
- **La modélisation des conséquences**, qui permet de déterminer l'ampleur des effets associés à ces événements.

Ces deux dimensions sont combinées pour générer une estimation numérique du risque, souvent exprimée en risque individuel de mortalité ou en risque sociétal. La QRA prend en compte l'ensemble des scénarios identifiés dans l'étude de dangers préalable. Les événements similaires peuvent être regroupés et représentés par des scénarios « représentatifs » ou « enveloppes ». [3]

La réalisation d'une QRA peut faire appel à une variété d'outils spécialisés, incluant des logiciels de modélisation des conséquences (PHAST, ALOHA ou EFFECTS) et des outils d'évaluation de fréquences basés sur des bases de données (OREDA ou IOGP). Toutefois, certains calculs sont également réalisés à l'aide de tableurs, notamment lors de QRA simplifiées ou spécifiques à certains équipements. [3]

2.2 Méthodologie de la QRA

L'approche d'analyse quantitative des risques est basée sur une méthodologie organisée qui vise à déterminer les risques liés à des incidents périlleux, en chiffrant non seulement leur occurrence, mais aussi leurs impacts éventuels. Cette approche, couramment utilisée dans le secteur industriel et en accord avec les directives du *Health and Safety Executive* (HSE) britannique, offre la possibilité de détecter les situations accidentelles, d'apprécier leur éventualité et d'évaluer leurs conséquences. [4]

Le schéma suivant (figure 2.1), illustrant de manière synthétique et fréquemment employée le processus de QRA tel qu'il est appliqué dans diverses recherches industrielles. Il souligne les phases clés, de la détection des risques à l'évaluation définitive du danger et à la prise de décision.

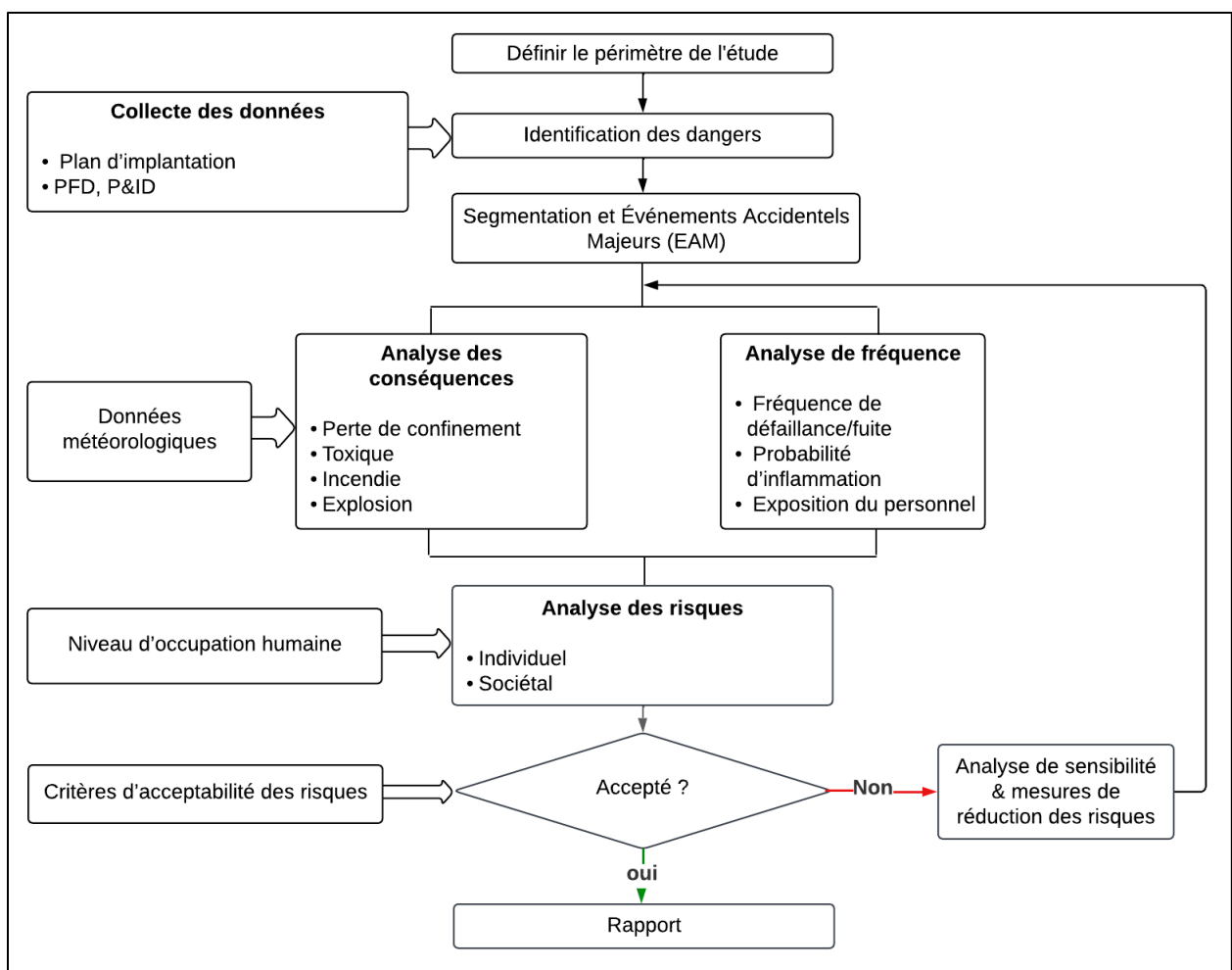


Figure 2.1: Organigramme du processus de la QRA [4]

2.2.1 Identification des dangers

L'identification des dangers est une étape essentielle du processus de QRA, visant à recenser de manière exhaustive les risques majeurs susceptibles d'affecter une installation industrielle. Cette

démarche repose principalement sur les résultats d'études préalables telles que le HAZID, HAZOP, complétées par des données issues de la documentation technique du projet, des retours d'expérience sur des installations similaires, ainsi que des revues de littérature. [5]

Les dangers identifiés incluent tous les événements crédibles de rejets de substances dangereuses, qu'elles soient toxiques ou inflammables, ainsi que les scénarios plausibles d'incendie ou d'explosion. Pour ce faire, les étapes suivantes sont généralement suivies :

- Identification de tous les matériaux dangereux présents sur site,
- Localisation des unités utilisant, traitant, produisant ou stockant ces substances,
- Détection des scénarios accidentels de perte de confinement (LOC) sur les équipements et les canalisations,

2.2.2 Segmentation des systèmes

Dans le cadre de l'Analyse Quantitative des Risques, la segmentation des systèmes consiste à diviser l'installation en sections isolables, chacune étant analysée indépendamment. Chaque segment est conçu comme une unité homogène regroupant des équipements fonctionnant sous des conditions de procédé similaires (pression, température, nature des substances). Cette organisation méthodique permet de simplifier et structurer l'évaluation des fréquences de fuite ainsi que l'analyse des conséquences potentielles [6].

➤ Délimitation des segments

Les segments sont définis sur la base d'une revue approfondie des documents techniques de l'installation, notamment les P&ID, les PFD et les bilans matière/énergie (HMB). Les frontières internes sont établies en s'appuyant sur les premiers points d'isolement efficaces sous pression positive, tels que les vannes ESD ou BDV. [6]

Les vannes normalement fermées (identifiées par les marquages NC) sont également considérées comme des limites valables d'isolement. Chaque point d'isolement comprend la bride amont et la vanne elle-même, à l'exclusion de la bride aval, conformément aux pratiques industrielles QRA. [6]

➤ **Comptage des composants**

Une fois les segments définis, un comptage détaillé des équipements présents dans chaque section est réalisé à partir des P&ID annotés. Chaque type d'élément (vannes, brides, instruments, filtres, pompes, etc.) est recensé séparément, car chacun présente une fréquence de fuite spécifique. [6]

➤ **Distribution des tailles de fuites**

Dans les études QRA, il est courant d'adopter une classification des fuites en fonction de la taille de la perte de confinement. Cinq catégories typiques sont généralement retenues :

- 1 à 3 mm : très petites fuites (micro-fuites) ;
- 3 à 10 mm : petites fuites ;
- 10 à 50 mm : fuites de taille moyenne ;
- 50 à 150 mm : grandes fuites ;
- >150 mm ou rupture complète (Full Bore) : cas extrême correspondant à une défaillance totale de l'équipement.

Cette segmentation s'aligne sur les recommandations issues de la base de données de l'IOGP (International Association of Oil & Gas Producers) et permet de modéliser une large gamme de scénarios accidentels de manière réaliste.

En général, les très petites fuites (par exemple de 2 mm) sont plus fréquentes mais ont des conséquences limitées, tandis que les grandes fuites (par exemple de 100 mm ou plus) sont rares mais peuvent entraîner des conséquences particulièrement graves. [7]

➤ **Calcul de l'inventaire**

Le calcul de l'inventaire du fluide dans chaque segment est essentiel pour déterminer la quantité totale de la matière susceptible d'être libérée lors d'une perte de confinement. Cet inventaire inclut :

- Le volume des équipements sous pression (cuves, réservoirs), souvent indiqué directement sur les P&ID ;
- Le volume de la tuyauterie, estimé à partir du diamètre (indiqué sur les P&ID) et de la longueur (issue des plans d'implantation, isométriques ou relevés terrain).

En général, l'inventaire considéré correspond au fluide contenu entre deux vannes d'isolement (deux ESDVs), ce qui constitue une hypothèse conservatrice largement admise. [8]

2.2.3 Analyse des conséquences

Après avoir déterminé les scénarios d'accidents potentiels, il est nécessaire d'estimer les effets et les conséquences sur les personnes, les installations et l'environnement. L'analyse des conséquences est l'étude de divers événements indésirables pouvant résulter de la perte de confinement des matières dangereuses pendant l'exploitation des installations. Les événements indésirables peuvent être classés en trois grandes catégories : incendie, explosion et dispersion toxique (figure 2.2). [9]

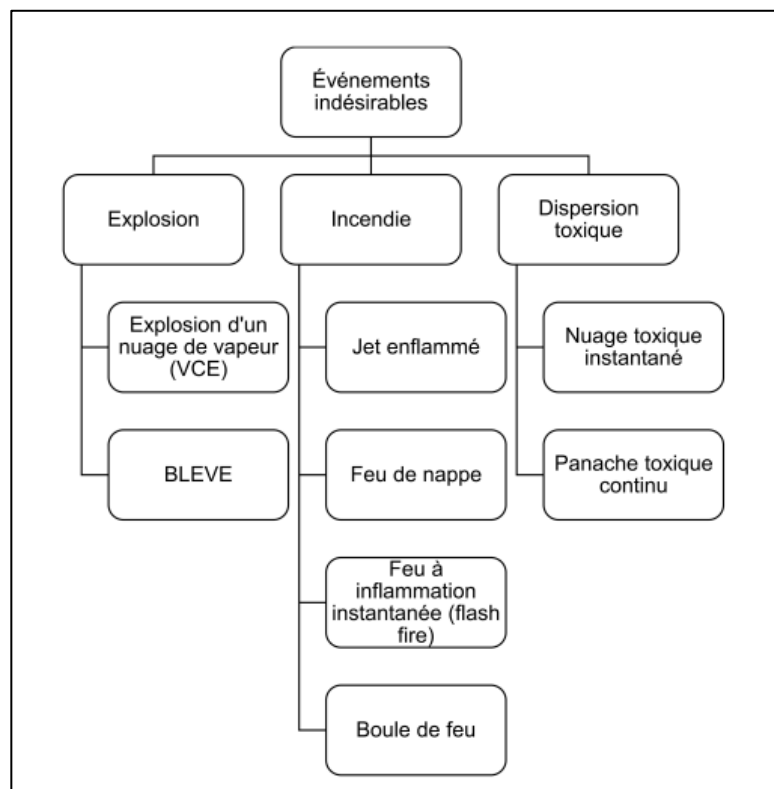


Figure 2.2: Classification des événements indésirables [9]

L'analyse des conséquences comprend les éléments suivants :

2.2.3.1 Modélisation du terme source

La modélisation du terme source représente la première étape essentielle de l'analyse des conséquences. Elle consiste à quantifier le débit de rejet initial d'un fluide dangereux (gaz, liquide ou deux phases) lors d'un scénario de perte de confinement (LOC). Ce débit conditionne la gravité de l'événement et les distances d'impact (feu, explosion, toxicité).

Le taux de fuite dépend de :

- La pression et température initiales,
- La taille de l'orifice de fuite,
- Le type de fluide (gaz, liquide, biphasique),
- La configuration du système (tuyauterie, réservoir, conditions dynamiques).

Avant de déterminer le débit de la fuite, il est indispensable de vérifier si le fluide s'écoule dans un régime critique, c'est-à-dire à travers un orifice sous pression suffisamment élevée pour que la vitesse atteigne celle du son. Cette condition est atteinte lorsque le rapport entre la pression en aval et la pression en amont est inférieur à un seuil théorique donné par [10] :

$$\frac{P_2}{P_1} < \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.1)$$

Où P_1 représente la pression en amont et P_2 la pression en aval.

Ainsi, le régime critique constitue le cas le plus couramment observé pour les fuites de gaz à haute pression à travers des ouvertures, notamment dans les installations manipulant du GPL, du butane, ou du propane.

Pour un gaz parfait en régime critique, le débit massique est donné par [10] :

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot P_0 \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R \cdot T_0}} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (2.2)$$

Où C_d est le coefficient de décharge, A la surface de l'orifice (m^2), P_0 la pression absolue en amont (Pa), T_0 la température absolue en amont (K), R la constante spécifique du gaz (J/kg·K) et γ le rapport des capacités thermiques.

2.2.3.2 Modélisation de la dispersion atmosphérique

La dispersion atmosphérique d'un gaz relâché accidentellement constitue l'une des étapes clés dans l'évaluation des conséquences d'un scénario de perte de confinement. Le comportement du nuage dépend largement de la densité du gaz par rapport à l'air.

A. Dispersion des gaz lourds – source continue (modèle HEGADAS)

Lorsque le gaz est plus lourd que l'air, comme le GPL, le chlore ou le dioxyde de carbone, la dispersion s'effectue sous forme d'un nuage dense se propageant au ras du sol. Ce comportement particulier requiert l'utilisation d'un modèle adapté, tel que HEGADAS, intégré dans la suite logicielle HGSYSTEM. [13]

HEGADAS modélise un rejet continu de gaz dense à partir d'une zone source, en prenant en compte :

- Les effets gravitaires (tendance à s'accumuler au sol),
- Le cisaillement du vent,
- L'entraînement d'air ambiant,
- Les échanges thermiques avec le sol et l'humidité de l'air,
- La dilution par turbulence atmosphérique.

Ce modèle procède à une série d'étapes de calcul quantitatives, détaillées ci-dessous.

1. Estimation des dimensions initiales du nuage

À partir du débit massique de la fuite et de la densité du gaz ρ , les dimensions initiales du nuage sont estimées selon des relations empiriques suivantes [13]:

$$B = k_b \left(\frac{\dot{m}}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

$$H = k_h \left(\frac{\dot{m}}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.4)$$

Où :

- B : largeur initiale du nuage (m)
- H : hauteur initiale du nuage (m)
- k_b, k_h : coefficients liés à la largeur du nuage.
- $\dot{m}$: débit massique de fuite (kg/s)
- ρ : densité du gaz (kg/m³)

2. Calcul de la concentration centrale C_A

La concentration centrale au sol C_A correspond à la valeur maximale de concentration dans le nuage, située au centre de la section transversale à la direction du vent. Elle est utilisée comme référence pour le profil de concentration dans toutes les directions. Elle est donnée par [13] la formule (2.6) :

$$C_A = \frac{\dot{m}}{u \cdot B \cdot H} \quad (2.5)$$

Où :

- C_A : concentration centrale au sol (kg/m³)
- $\dot{m}$: débit massique de fuite (kg/s)
- u : vitesse du vent (m/s)
- B : largeur initiale du nuage (m)
- H : hauteur initiale du nuage (m)

3. Calcul de la fraction molaire centrale y_{mol}

Afin de déterminer si le nuage est inflammable, on calcule la fraction molaire du gaz au centre du nuage à partir de la concentration centrale C_A . Cette fraction molaire permet de vérifier si la concentration locale du gaz se situe dans l'intervalle d'inflammabilité du mélange avec l'air. La relation utilisée est la suivantes [13] :

$$y_{\text{mol}} = \frac{C_A \cdot V_m}{M} \quad (2.6)$$

Où :

- y_{mol} : fraction molaire centrale
- C_A : concentration centrale au sol (kg/m^3)
- V_m : volume molaire du gaz (m^3/mol)
- M : masse molaire du gaz (kg/mol)

La valeur obtenue est ensuite comparée aux limites d'inflammabilité propres au gaz concerné :

- La LFL : concentration minimale pour qu'un mélange soit inflammable,
- La UFL : concentration maximale au-delà de laquelle le mélange est trop riche pour brûler.

Si la fraction molaire calculée se situe entre ces deux seuils, cela signifie que le cœur du nuage est inflammable. Dans ce cas, il existe un risque d'inflammation ou d'explosion en cas de présence d'une source d'allumage [13].

4. Largeurs de dispersion latérale et verticale

Dans le modèle HEGADAS, après avoir estimé les dimensions initiales du nuage et la concentration centrale, il est nécessaire d'évaluer l'élargissement du nuage de gaz au fur et à mesure qu'il se propage sous l'effet du vent et de la turbulence atmosphérique. Cet élargissement est modélisé par la dispersion horizontale (dans la direction latérale au vent) et

verticale (en hauteur). Ces deux phénomènes sont respectivement représentés par les largeurs caractéristiques $\sigma_y(x)$ et $\sigma_z(x)$, qui évoluent en fonction de la distance à la source x [13].

Les expressions utilisées dans HEGADAS pour modéliser ces largeurs sont issues des travaux de Briggs (1973). Elles tiennent compte du développement progressif du panache sous l'effet de la diffusion atmosphérique. Les largeurs standards sont données par [13]:

$$\sigma_y(x) = \frac{\delta_y \cdot x}{\sqrt{1 + \gamma_y \cdot x}} \quad (2.7)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{\delta_z \cdot x}{\sqrt{1 + \gamma_z \cdot x}} \quad (2.8)$$

Ces grandeurs représentent l'écart-type de la distribution gaussienne dans chaque direction. Elles augmentent avec la distance à la source et dépendent de l'état de stabilité de l'atmosphère.

Les coefficients δ et γ dépendent directement de la stabilité de l'atmosphère, qui est classée selon l'échelle de Pasquill de A (très instable) à F (très stable). Cette classification repose sur des paramètres météorologiques comme l'ensoleillement, la couverture nuageuse, la température et la vitesse du vent [13].

Les valeurs typiques des coefficients sont présentées dans le tableau (2.1) suivant :

Tableau 2.1 : Coefficients de dispersion atmosphérique selon Briggs [13]

Classe	δ_y (latéral)	δ_z (vertical)	$\gamma_y = \gamma_z$
A	0.22	0.20	0.0001
B	0.16	0.12	0.0001
C	0.11	0.08	0.0001
D	0.08	0.06	0.0001
E	0.06	0.03	0.0001
F	0.04	0.016	0.0001

Ainsi, plus l'atmosphère est instable (classe A à C), plus la dispersion du nuage est rapide et étendue. Inversement, en atmosphère stable (classes E et F), la dispersion est limitée et les largeurs du nuage augmentent lentement.

Ces relations sont utilisées dans la plupart des logiciels de modélisation des effets physiques (PHAST, ALOHA, SAFETI), ainsi que dans les méthodologies de référence telles que le TNO Green Book [11] et le manuel HGSYSTEM [13].

5. Calcul de la concentration en un point $c(x,y,z)$ du nuage

La concentration du gaz à un point donné (x,y,z) dans le nuage est décrite par une fonction gaussienne dans les deux directions perpendiculaires à l'écoulement principal (axe x). Cette distribution est centrée autour de l'axe du nuage, où la concentration est maximale, et décroît exponentiellement avec la distance latérale y et verticale z . L'expression est la suivante [13] :

$$c(x, y, z) = c_A \cdot \exp \left(-\frac{y^2}{S_y^2(x)} - \frac{z^2}{S_z^2(x)} \right) \quad (2.9)$$

Où :

- c_A : concentration centrale au sol (valeur maximale sur l'axe du nuage)
- $S_y(x)$ et $S_z(x)$: demi-largeurs physiques du nuage (en mètres), fonctions de la distance x à la source

Les demi-largeurs sont calculées à partir des écarts-types gaussiens $\sigma_y(x)$ et $\sigma_z(x)$ [13]:

$$S_y(x) = \sqrt{2} \cdot \sigma_y(x) \quad (2.10)$$

$$S_z(x) = \sqrt{2} \cdot \sigma_z(x) \quad (2.11)$$

6. Surface inflammable à chaque distance

À chaque distance x , on cherche à déterminer la section transversale du nuage dans laquelle la concentration du gaz se situe dans l'intervalle d'inflammabilité, c'est-à-dire entre la limite

inférieure (LFL) et la limite supérieure (UFL). Cette surface potentiellement inflammable est notée $A_{infl}(x)$. Elle est définie par l'expression suivante [13]:

$$A_{infl}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } c_A < \text{LFL} \\ \pi S_y(x) S_z(x) \cdot \ln \left(\frac{c_A}{\text{LFL}} \right) & \text{si } \text{LFL} \leq c_A \leq \text{UFL} \\ \pi S_y(x) S_z(x) \cdot \ln \left(\frac{\text{UFL}}{\text{LFL}} \right) & \text{si } c_A > \text{UFL} \end{cases} \quad (2.12)$$

Où :

- c_A : concentration centrale au sol ;
- $S_y(x)$ et $S_z(x)$: demi-largeurs physiques du nuage ;

Cette équation repose sur une intégration analytique du nuage gaussien dans les deux directions autour de l'axe du panache, en considérant uniquement la zone où la concentration reste comprise entre les seuils inflammables [13].

7. Volume total inflammable

Le volume inflammable total est obtenu en intégrant la surface $A_{infl}(x)$ Sur toute la longueur du nuage. Dans HEGADAS, cette intégration est réalisée de manière discrète par pas de distance Δx [13] :

$$V_{infl} = \sum_x A_{infl}(x) \Delta x \quad (2.13)$$

Cela permet d'évaluer la quantité totale de gaz présente dans la plage d'inflammabilité. Ce volume est un paramètre clé dans l'évaluation du risque d'explosion, notamment pour calculer l'énergie libérable potentielle en cas d'inflammation du nuage.

2.2.3.3 Effets des scénarios accidentels

1. Rejet de gaz non enflammé / Dispersion

Un nuage de vapeur peut se former lorsqu'un liquide en cours de vaporisation est libéré pendant une durée prolongée. Si le nuage de gaz ne s'enflamme pas immédiatement, il se disperse en

fonction de la direction et de la vitesse du vent, ainsi que de la catégorie de stabilité atmosphérique (représentant le degré de turbulence) [14] .

La simulation de la dispersion vise à déterminer la distance, à partir de la fuite, à laquelle la concentration de matière inflammable descend en dessous de la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) [15].

2. Feux de torche

Lors d'un rejet accidentel, le fluide sous pression se propage sous forme de jet dans la direction initiale de la fuite, jusqu'à ce que son énergie cinétique soit dissipée. Selon la densité du gaz, le panache peut ensuite retomber par gravité ou s'élever.

La modélisation de la source est réalisée pour chaque zone d'étude, en tenant compte des pressions nominales de fonctionnement afin de déterminer le débit initial de fuite. Les propriétés des substances et les débits calculés permettent ensuite d'évaluer la longueur de flamme et les distances associées aux seuils critiques de rayonnement thermique. [16]

Le principal danger associé à un feu de jet réside dans le rayonnement thermique et le risque d'impact direct de la flamme sur les équipements ou canalisations avoisinants, ce qui peut provoquer une escalade (effets dominos). Les rejets sous haute pression peuvent générer des flammes longues, capables de couvrir de vastes zones. Toutefois, si la longueur de flamme reste inférieure à la distance séparant les équipements vulnérables de la source du feu, le risque d'escalade est réduit. [16]

3. Feux de nappe

Une nappe liquide peut se former lors d'une fuite prolongée, lorsque le débit de fuite excède le taux de vaporisation. En cas d'inflammation, un feu de nappe se développe, dont la taille dépend du débit massique, de la température ambiante, de la chaleur de vaporisation de la substance, de la pression de vapeur, de la durée du rejet et des mesures de confinement (cuves, rétentions, etc.). [17]

Le feu de nappe peut provoquer des dommages aux équipements ainsi que des blessures ou décès, en raison du rayonnement thermique généré. [17]

Ce type de feu n'est généralement pas associé aux systèmes liquides fortement pressurisés, pour lesquels les rejets entraînent plutôt un feu de jet liquide ou un flash fire. [17]

4. Feux de flash

Le rejet de gaz ou de vapeur issu d'une nappe se disperse sous l'influence des conditions météorologiques, notamment le vent. La concentration diminue progressivement avec la distance à la source. En aval, à une certaine distance, la concentration peut chuter sous la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII). Si l'allumage intervient dans l'enveloppe inflammable, la masse de produit comprise entre la LII et la moitié de cette limite est susceptible de brûler rapidement, entraînant un flash fire, qui se propage du point d'ignition jusqu'à la source. [1]

Malgré une faible intensité thermique, ce type de feu présente une vitesse de propagation élevée, rendant impossible toute évacuation après l'ignition. Le phénomène reste généralement proche du sol, là où se situent de nombreuses sources potentielles d'inflammation. Une exposition directe est généralement considérée comme létale, tandis que les personnes situées à l'extérieur du nuage ne subissent pas de dommages significatifs. En présence d'autres matériaux combustibles, un feu secondaire peut être déclenché. [5]

5. Explosion de nuage de Vapeur (VCE)

Les explosions de nuage de vapeur (VCE) se produisent lorsqu'un gaz ou une vapeur inflammable, libéré massivement en plein air, forme un nuage dont une portion se trouve entre la limite inférieure et supérieure d'explosivité ; si l'allumage est différé, la flamme peut se propager à grande vitesse à l'intérieur du nuage, générant une onde de surpression dévastatrice. La violence du phénomène dépend du produit (méthane, propane, butane, solvants volatils...), du délai d'allumage, de la proportion du nuage dans la zone d'explosivité et surtout du degré de turbulence créé par les obstacles (tuyauteries, structures, équipements), qui accélèrent le front de flamme ; dans des situations extrêmes, la déflagration peut même évoluer en détonation supersonique, bien que cela reste rare. [18]

Pour prévenir et quantifier ces risques, l'industrie recourt à des modèles semi-empiriques. Le modèle de Baker-Strehlow-Tang corréle la surpression à la réactivité du combustible et à l'encombrement de l'installation, tandis que le modèle Multi-énergie classe les scénarios sur une échelle de 1 à 10 selon le confinement et l'obstruction, et fournit des courbes permettant d'estimer la surpression maximale et l'atténuation de l'onde de choc. Ces outils, fondés sur des campagnes

d'essais et des retours d'expérience, constituent aujourd'hui la référence pour dimensionner les mesures de protection contre les VCE dans les secteurs chimique, pétrochimique et gazier. [18]

5.1. Modèle Multi-Énergie (Multi-Energy Model – MEM)

L'Organisation Néerlandaise pour la Recherche Scientifique Appliquée (TNO) a mené des recherches approfondies sur les modèles d'explosion (van den Berg, 1985 ; van den Berg et al., 1991 ; Mercx et al., 1998, 2000) [12]. Le modèle Multi-Énergie développé par le TNO permet d'introduire la notion de force d'explosion dans l'analyse des effets d'explosion de type VCE.

Grâce à cette approche, il est possible d'ajuster les prédictions afin de tenir compte du confinement partiel du nuage de gaz. Le modèle considère le nuage comme une série de sous-explosions, chacune correspondant à une zone confinée ou non confinée. Les zones confinées peuvent être, par exemple, des parties du nuage situées sous des cuves ou des équipements, ou encore enfermées entre des bâtiments ou d'autres structures. Des résultats similaires peuvent être obtenus à l'aide de modèles basés sur la vitesse de flamme, tels que le modèle de Baker–Strehlow (Baker et al., 1996 ; Tang et Baker, 2000). [12]

Le paramètre clé de ce modèle est la force d'explosion (blast strength), variant de 1 (effet insignifiant) à 10 (force de type détonative). Les figures 2.3 et 2.4 donnent respectivement la surpression et la durée de phase positive en fonction d'une distance réduite en énergie, avec des courbes spécifiques selon la force d'explosion. [12]

5.2. Étapes d'application du modèle Multi-Énergie

Pour appliquer ce modèle, les étapes suivantes doivent être suivies

a) Déterminer la quantité de gaz-air dans chaque zone et calculer l'énergie

Pour chaque zone identifiée, on estime le volume de mélange gaz–air inflammable en mètres cubes. Le volume de gaz utilisé ici est celui déjà obtenu lors de l'étude de dispersion dont la concentration est comprise entre les limites d'inflammabilité (LFL et UFL). Ce volume est ensuite réparti entre les différentes zones définies en fonction de leur emplacement (zone confinée, zone ouverte, etc.). [10]

L'énergie potentielle de chaque zone est ensuite calculée selon la formule [10]:

$$E = V_0 \cdot E_C \quad (2.14)$$

Où

- E : est l'énergie de combustion de la charge (en joules),
- V_0 : est le volume de gaz–air inflammable dans la zone (m^3),
- E_C : est la densité énergétique volumique typique du mélange, généralement prise comme : $E_C = 10^6 J/m^3$

Cette énergie représente le potentiel explosif de la sous-charge et sera utilisée pour la suite du calcul.

b) Attribuer une force d'explosion initiale à chaque zone

Le principal défi dans l'utilisation de la méthode multi-énergie réside dans la sélection de la force d'explosion de chaque charge. Cette sélection dépend de plusieurs facteurs, notamment [10] :

- Le niveau d'obstruction à l'intérieur du nuage de gaz, c'est-à-dire la densité et la disposition des obstacles (équipements, tuyauteries, structures) qui peuvent modifier la dynamique de l'explosion.
- La force d'amorçage : une explosion dite « forte » correspond à une explosion ventilée avec une combustion rapide, tandis qu'une explosion « faible » peut être déclenchée par une simple étincelle ou une flamme.
- Le niveau de confinement : il s'agit de savoir si la charge est située dans un volume ouvert (non confiné) ou enfermée entre des surfaces (confinement partiel ou total).

Pour faciliter cette sélection, il est possible de construire une table de décision [18] qui prend en compte tous ces facteurs et les relie directement à la force d'explosion à attribuer.

c) Calculer les distances réduites pour chaque charge à une distance donnée R

Pour une distance cible R (en mètres), on calcule la distance réduite associée à chaque zone selon [10] :

$$\bar{R} = R \times \left(\frac{P_a}{E} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

Avec :

- $\bar{R}$: distance réduite (sans dimension)
- R : distance réelle à la cible (m)
- P_a : pression atmosphérique ambiante (Pa)

- E : énergie de la zone (J)

Cette normalisation permet l'utilisation des courbes universelles du modèle MEM [10].

d) Estimer la surpression et la durée de phase positive pour chaque charge

Une fois la distance réduite $\bar{R}$ déterminée et la force d'explosion attribuée à une zone donnée, il devient possible d'estimer les effets physiques d'une explosion de type VCE, notamment la surpression latérale et la durée de la phase positive. Ces effets sont déduits à partir des courbes de référence du modèle Multi-Énergie. [10]

La figure (2.3) présente la surpression latérale réduite maximale ($\bar{P}_o$) en fonction de la distance réduite ($\bar{R}$). Chaque courbe correspond à une valeur de force d'explosion comprise entre 1 et 10. [10]

Pour une zone donnée, la lecture du graphique se fait en entrant avec :

- La distance réduite $\bar{R}$ calculée,
- Et la force d'explosion attribuée à cette zone.

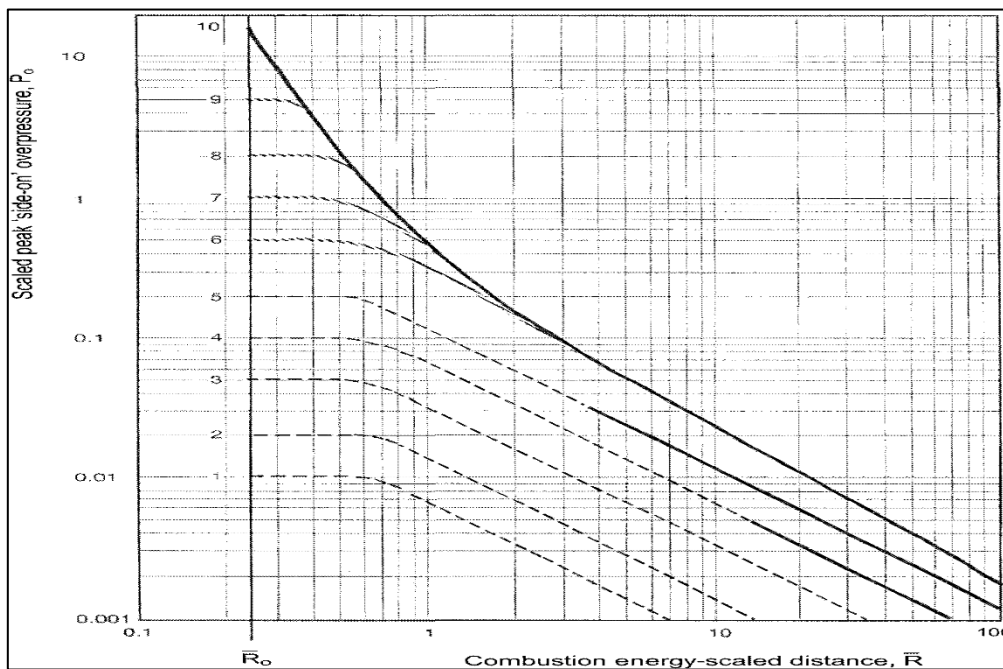


Figure 2.3 : Surpression latérale maximale réduite pour le modèle Multi-Énergie (MEM) [10]

Cela permet de lire graphiquement la valeur de la surpression réduite ($\bar{P}_o$).

Ensuite, la durée réduite de la phase positive ($\bar{t}_p$) peut également être déterminée à partir d'un graphe similaire (figure 2.4), toujours en fonction de la distance réduite et de la force d'explosion. [10]

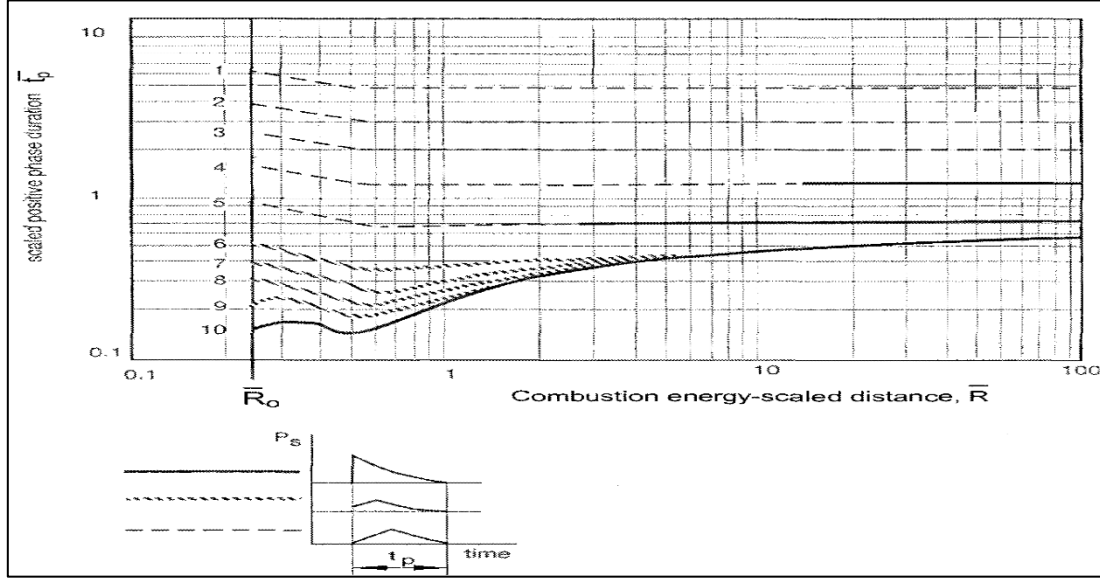


Figure 2.4 : Durée réduite de la phase positive pour le modèle Multi-Énergie (MEM)

Ces valeurs extraites des graphes sont ensuite converties en valeurs physiques réelles à l'aide des formules suivantes [10] :

- **Surpression absolue P_0 (Pa) :**

$$P_o = \bar{P}_o \cdot P_a + P_a \quad (2.16)$$

Où P_a est la pression atmosphérique ambiante (généralement 101 325 Pa).

- **Surpression relative ΔP (Pa) :**

$$\Delta P = P_o - P_a = \bar{P}_o \cdot P_a \quad (2.17)$$

Cette surpression relative est celle utilisée pour l'évaluation des dommages sur les structures, les équipements et les personnes.

- **Durée réelle de la phase positive t_p (s) [10] :**

$$t_p = \frac{\bar{t}_p}{c_a} \left(\frac{E}{P_a} \right)^{1/3} \quad (2.18)$$

Avec :

- $\bar{t}_p$: durée réduite lue sur la figure (2.4),
- c_a : vitesse du son dans l'air (≈ 340 m/s),
- E : énergie de combustion de la charge (J),
- P_a : pression atmosphérique (Pa).

2.2.3.4 Analyse de la vulnérabilité humaine

Les effets d'un événement dangereux sur les éléments exposés, qu'il s'agisse des personnes, des équipements ou des structures. Elle permet notamment d'estimer, pour chaque scénario accidentel (incendie, explosion, rejet toxique), la probabilité de dommages ou de décès en fonction de l'intensité du phénomène et de la durée d'exposition. [19]

Le document IOGP 434-14 propose des modèles de référence pour quantifier les effets sur les êtres humains, à l'aide de fonctions mathématiques appelées fonctions probit. Ces fonctions permettent de relier une variable physique (flux thermique, surpression ou concentration toxique) à un niveau de létalité exprimé en pourcentage. [20]

Cette approche est utilisée pour modéliser les effets létaux :

- Des incendies (Feu de torche, feu de nappe, boule de feu), via le flux thermique (kW/m²),
- Des explosions (VCE, BLEVE), via la surpression (barg),
- Des scénarios toxiques, via la dose inhalée (ppm·min).

➤ Analyse de Probit

L'approche Probit est couramment utilisée dans l'analyse de la vulnérabilité humaine face aux effets thermiques (incendies) et mécaniques (explosions), dans le cadre des études QRA. Elle permet de convertir une intensité d'exposition — telle qu'un flux thermique ou une surpression en une probabilité de létalité. Cette méthode repose sur des modèles empiriques issus de

données expérimentales, et est reconnue par plusieurs organismes de référence tels que le UK HSE, le TNO et l'IOGP. [20]

1) Incendies – Flux thermique

Dans le cas des incendies, les effets létaux peuvent être dus [20]:

- A l'engulfment (immersion dans la flamme),
- A l'exposition au rayonnement thermique (flux incident en kW/m^2),
- A l'exposition prolongée à proximité d'un foyer (notamment en intérieur).

Pour modéliser l'effet thermique, on utilise le modèle de dose thermique exprimé en TDU (Thermal Dose Unit), calculé par la relation [20] :

$$Dose(TDU) = I^{4/3} \times t \quad (2.19)$$

Où

- I est le flux thermique incident (kW/m^2)
- t est la durée d'exposition (secondes).

La dose thermique est ensuite introduite dans une fonction probit de la forme [20] :

$$Y = a + b \times \ln(TDU) \quad (2.20)$$

La littérature présente différentes valeurs pour les paramètres a et b . Le tableau 2.2 fournit les valeurs les plus couramment utilisées de a et b ainsi que la dose nécessaire pour entraîner 1 % et 50 % de létalité, [20]

Tableau 2.2 : les Probits de Thermal radiation [20]

Source	Paramètres de Probit		Dose létale (TDU)	
	a	b	1%	50%
Eisenberg et al	-14.9	2.56	960	2380
Tsao & Perry	-12.8	2.56	420	1046
TNO	-15.3	3.02	389	841
Lees	-10.7	1.99	828	2670

Le document IOGP 434-14 recommande deux modèles selon le niveau de protection :

- Peau non protégée (sans équipement de protection individuelle) [20]:

$$Y = -12.8 + 2.56 \times \ln(I^{4/3}t) \quad (2.21)$$

(Modèle de Tsao & Perry)

- Peau protégée (personnel équipé d'EPI type NFPA 2112) [20] :

$$Y = -17.944 + 3.019 \times \ln(I^{4/3}t) \quad (2.22)$$

(Modèle Probit TNO modifié)

Une fois le score Probit Y calculé, la probabilité de létalité peut être déterminée à l'aide du tableau (2.3) suivant, extraie du document de l'IOGP [20]. Ce tableau associe chaque valeur de Probit à un pourcentage de létalité correspondant.

	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%
0%	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10%	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20%	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30%	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40%	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50%	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60%	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70%	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80%	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90%	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Tableau 2.3 : Table de conversion Probit – Létalité humaine [20]

2) Explosions - Surpression

Lors d'une explosion, les personnes peuvent être soumises à une surpression causant des blessures graves ou mortelles selon trois types d'effets [20] :

- Effets primaires : dommages internes dus au souffle (ruptures d'organes, lésions auditives),
- Effets secondaires : projection d'objets ou éclats de structure,

- Effets tertiaires : projection de la victime contre des obstacles.

L'estimation de la létalité liée à la surpression repose sur la fonction probit suivante [20], issue des travaux du UK HSE :

$$Y = 5.13 + 1.37 \times \ln (P) \quad (2.23)$$

P est la surpression statique en bar.

Ce modèle, issu des travaux du UK HSE, est applicable en milieu ouvert ou peu confiné. La probabilité de létalité est ensuite obtenue à travers le tableau présenté dans la figure (2.5), extrait du document de l'IOGP [20].

2.2.4 Analyse des fréquences

2.2.4.1 Fréquences des fuites

La détermination des fréquences de fuite, également appelées pertes de confinement, repose sur l'exploitation de bases de données de fiabilité spécifiques aux équipements industriels. Plusieurs référentiels sont disponibles dans la littérature, parmi lesquels trois sources largement reconnues dans le domaine des installations de procédés à risques, notamment pétrolières :

- **IOGP 2019 (Rapport 434-01)**

Le rapport de l'*International Association of Oil & Gas Producers* présente des fréquences de fuite établies à partir de données historiques, notamment issues de la base HCRD (*Hydrocarbon Release Database*). Les fréquences sont exprimées en nombre de fuites par an, selon le type d'équipement (vannes, tuyauteries, compresseurs, etc.) et la taille de l'orifice de fuite. Les tailles sont classées par plages (ex. 1–3 mm, 3–10 mm, 10–30 mm, etc.) et des équations génériques sont proposées pour estimer les fréquences en fonction du diamètre de fuite. Ce référentiel est particulièrement adapté aux études QRA basées sur des scénarios typés par taille de trou. [7]

- **OREDA 2015 (*Offshore Reliability Data*)**

OREDA est un projet collaboratif regroupant plusieurs compagnies industrielles, ayant pour objectif de constituer une base de données de fiabilité sur les équipements utilisés dans les installations offshore, principalement en mer du Nord. Elle contient des données qualitatives

(fonction, environnement, causes de défaillance) et quantitatives (taux de défaillance, durées de réparation) couvrant un large éventail de systèmes techniques (procédés, sécurité, électricité, levage, forage...). [21]

- **CCPS 1989 (*Guidelines for Process Equipment Reliability Data*)**

Ce guide publié par le Center for Chemical Process Safety (AIChE) propose des taux de défaillance génériques pour de nombreux équipements courants dans les unités de procédé. Les données sont exprimées soit par temps de fonctionnement (défaillances par 10^6 heures), soit par sollicitation (défaillances par 10^3 demandes), et servent de référence lorsqu'aucune donnée spécifique au site n'est disponible. [22]

2.2.4.2 Probabilité d'ignition

La probabilité d'ignition correspond à la probabilité qu'un rejet de fluide inflammable s'enflamme après une perte de confinement. Elle dépend principalement de la taille et de la composition du rejet, des conditions de dispersion du gaz ou de la vapeur, ainsi que de la présence de sources d'ignition dans l'environnement. [6]

Trois situations sont généralement prises en compte dans le cadre d'une QRA :

- Ignition immédiate : l'inflammation se produit instantanément au moment du rejet, avant toute dispersion notable. Ce cas peut être lié à une auto-inflammation (par température ou pression élevée, charge électrostatique) ou à la présence directe de sources d'ignition telles que des torches, moteurs ou flammes nues. Ce scénario conduit en général à un feu de jet, une boule de feu ou un feu de nappe. [6]
- Ignition retardée : l'inflammation survient après dispersion du nuage dans l'environnement. Elle peut générer un feu de nuage (flash fire). Si une partie du nuage atteint une zone congestionnée, une explosion de type VCE (Vapour Cloud Explosion) peut se produire. Dans certains cas, une projection de flamme vers la source peut également déclencher un feu secondaire. [6]

- Absence d'ignition : dans certaines situations, le nuage se dissipe sans rencontrer de source d'ignition, et aucune conséquence immédiate ne survient. [6]

Parmi les facteurs influençant l'ignition figurent la présence de feux ouverts (torches, incinérateurs), d'équipements non classés, de surfaces chaudes, d'étincelles mécaniques ou de phénomènes électrostatiques. Les équipements en zone ATEX sont conçus pour limiter ce risque, mais une défaillance ou un défaut d'installation peut suffire à déclencher une ignition, surtout en dehors des zones protégées. [23]

2.2.4.3 Développement des arbres d'événements

Après avoir estimé les fréquences de fuite ainsi que les probabilités associées aux différents types d'ignition (immédiate, retardée ou absente), la dernière étape de l'analyse de fréquence consiste à construire les arbres d'événements. Ces outils permettent de représenter l'enchaînement logique des évolutions possibles à partir d'un rejet initial, en tenant compte des différents embranchements et de leurs probabilités respectives. L'arbre d'événement générique est illustré sur la figure (2.5) suivante. [24]

Large gas release	Immediate ignition	Delayed ignition	Confinement/ congestion	Jet flame impinges on adjacent tank	Outcomes
	Yes				BLEVE
				Yes	
	Yes			No	Jet fire
					VCE
	No	Yes	Yes		Flash fire
		No	No		Dispersion to below LFL
	No	No			

Figure 2.5 : Exemple générique d'arbre d'événements [24]

Chaque scénario de perte de confinement est modélisé à l'aide d'un arbre structuré selon la nature de l'ignition. Le scénario de départ correspond à un rejet accidentel de gaz. L'arbre dans la figure (2.6) se ramifie ensuite selon trois branches principales : [24]

- Ignition immédiate : le rejet s'enflamme instantanément, menant typiquement à un jet fire, une boule de feu ou un feu de nappe.
- Ignition retardée : le nuage se disperse avant d'être enflammé. Cela peut donner lieu à un flash fire, ou, en zone congestionnée, à une explosion de type VCE.
- Absence d'ignition : le nuage se dissipe sans rencontrer de source d'ignition et n'induit aucun effet thermique immédiat.

À chaque embranchement de l'arbre est associée à une probabilité conditionnelle, ce qui permet de calculer la fréquence globale de chaque issu. Ces arbres sont essentiels pour passer d'une fréquence de fuite à une fréquence d'accident redouté, en tenant compte de la nature et du contexte du rejet. [24]

2.2.5 Evaluation du risque

L'évaluation du risque dans une Analyse Quantitative des Risques repose sur la combinaison de deux composantes fondamentales : la fréquence des scénarios accidentels et la gravité de leurs conséquences. Le risque pour l'humain est généralement quantifié selon deux niveaux complémentaires : d'une part, le risque individuel, évalué à l'aide des indicateurs que sont le risque individuel localisé (LSIR) et le risque individuel réel annuel (IRPA), ce dernier tenant compte du profil temporel et spatial d'exposition d'un individu au sein de l'installation ; et d'autre part, le risque sociétal, quantifié par l'indicateur PLL (Perte Potentielle de Vies Humaines), qui reflète l'exposition globale de l'ensemble des personnes potentiellement affectées [25].

2.2.5.1 Risque individuel localisé (LSIR)

Le LSIR est défini comme la probabilité annuelle de décès pour une personne hypothétiquement présente en permanence (24 h/jour, 365 jours/an) à un emplacement fixe dans l'environnement d'une installation industrielle. Il s'agit d'un indicateur conservateur, car il ne tient pas compte du temps réel de présence des individus. Il est calculé par la formule suivante [26] :

$$LSIR = \sum_i f_i \times H_i \quad (2.24)$$

Avec

- f_i : fréquence annuelle du scénario accidentel i (exemple : fuite, explosion),
- H_i : probabilité de létalité à cette position, généralement obtenue à partir de fonctions probit

2.2.5.2 Risque individuel annuel (IRPA)

L'IRPA est un indicateur permettant de mesurer le risque annuel réel auquel est exposée une personne, en tenant compte de son temps de présence sur le site et de ses déplacements dans différentes zones à risque. Contrairement au LSIR, l'IRPA est adapté à des profils d'exposition variables selon les horaires de travail ou la nature des missions [25].

La formule de calcul de l'IRPA est la suivante [26] :

$$\text{IRPA} = F \times \sum_i (\text{LSIR}_i \times f_i) \quad (2.25)$$

Où :

- F : fraction du temps durant lequel la personne est présente sur le site,
- LSIR_i : valeur du LSIR dans la zone i ,
- f_i : fraction du temps que la personne passe dans la zone i .

2.2.5.3 Risque sociétal - Perte potentielle de vies humaines (PLL)

Le PLL est un indicateur global de risque sociétal. Il représente le nombre moyen de décès attendus chaque année sur un site donné, en tenant compte à la fois du niveau de risque individuel (IRPA) et du nombre de personnes exposées. Il permet d'évaluer l'impact collectif d'un site industriel sur la santé humaine [26].

Le calcul du PLL se fait selon l'équation suivante [26] :

$$\text{PLL} = \sum_i (\text{IRPA}_i \times N_i) \quad (2.26)$$

Où :

- IRPA_i : Risque individuel annuel pour le groupe i
- N_i : Nombre de personnes dans le groupe i

Chaque groupe représente une population homogène, partageant des conditions similaires d'exposition au risque. Le calcul est donc effectué en multipliant l'IRPA de chaque groupe par le nombre de personnes qui le composent, puis en additionnant les résultats pour tous les groupes.

Le PLL est un indicateur particulièrement utile pour [26] :

- Identifier les groupes les plus exposés collectivement,
- Prioriser les mesures de réduction de risque (ex. éloignement de certaines fonctions, renforcement de la protection, modification de l'organisation du travail),
- Comparer différentes conceptions ou implantations d'unités industrielles.

En résumé, ce chapitre nous a permis de comprendre les fondements et les méthodes de la QRA classique, largement utilisée pour évaluer les risques industriels. Toutefois, malgré sa robustesse, cette approche comporte des limites liées aux incertitudes, qu'il est essentiel d'identifier et d'analyser. C'est ce que nous aborderons dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Incertitudes en QRA : Typologies, sources et méthodes de traitement

La rigueur des études quantitatives de risque repose sur la qualité des données et des hypothèses utilisées. Toutefois, ces analyses sont souvent confrontées à des incertitudes, qu'il est essentiel d'identifier et de traiter. Ce chapitre présente les principales typologies d'incertitudes rencontrées en QRA, leurs sources, ainsi que les méthodes les plus couramment utilisées pour les représenter et les intégrer dans les modèles d'évaluation du risque.

3.1 Typologies d'incertitudes

Toute démarche d'analyse implique de prendre en compte des incertitudes, qu'il est utile de distinguer selon leur nature. Deux grandes catégories sont généralement reconnues : les incertitudes aléatoires et les incertitudes épistémiques.

3.1.1 Incertitudes aléatoires

L'incertitude aléatoire, également appelée variabilité, hasard, stochastique ou encore irréductible, représente l'aléa naturel inhérent aux phénomènes physiques. Elle est considérée comme incompressible, c'est-à-dire qu'elle ne peut être réduite, même avec davantage d'informations ou de données.

Des exemples typiques incluent la vitesse du vent, la température ambiante ou le moment précis de l'occurrence d'un séisme. Ces phénomènes sont caractérisés par une variabilité intrinsèque qui ne dépend pas du niveau de connaissance. Bien qu'il soit impossible de les supprimer, leurs effets peuvent parfois être atténués à l'échelle globale grâce à des effets statistiques d'agrégation ou d'annulation.

3.1.2 Incertitudes épistémiques

L'incertitude épistémique, parfois appelée ignorance, ambiguïté, réductible ou subjective, résulte d'un manque de connaissance ou d'information sur un phénomène, un paramètre ou un mécanisme. Cette incertitude peut être réduite en obtenant des données supplémentaires, en améliorant les modèles ou en consultant des experts.

Un exemple représentatif est l'évaluation de la probabilité d'un événement rare pour lequel peu d'observations sont disponibles. Dans ce cas, les estimations reposent fortement sur des hypothèses, des extrapolations ou des jugements d'experts.

3.2 Incertitudes introduites aux différentes étapes de la QRA

L'analyse quantitative des risques (QRA) repose sur une chaîne de modélisation comprenant l'estimation des fréquences d'occurrence, la modélisation des conséquences, et la construction

d'arbres d'événements. Chaque étape est sujette à des incertitudes, qu'elles soient aléatoires ou épistémiques. Cette section détaille les principales sources d'incertitude introduites au cours de la QRA.

3.2.1 Incertitudes dans l'analyse des fréquences

L'estimation des fréquences de défaillance repose généralement sur l'exploitation de bases de données historiques. Cependant, cette approche présente plusieurs limitations critiques. Les bases disponibles varient considérablement en termes de qualité, de couverture temporelle et de représentativité vis-à-vis des équipements analysés. À ce jour, aucun cadre normatif ne permet d'évaluer objectivement la supériorité d'une base de données par rapport à une autre.

Les données historiques utilisées peuvent être inexactes, incomplètes ou inadéquates au regard du contexte technologique ou opérationnel spécifique à l'installation étudiée. Dans de nombreux cas, les informations disponibles ne sont pas directement applicables au procédé ou à l'environnement considéré. Il devient alors nécessaire de recourir à des données génériques provenant d'activités similaires, ce qui augmente le niveau d'incertitude.

Sur le plan méthodologique, la fréquence globale de fuite pour une unité de procédé est obtenue en procédant à un inventaire des équipements installés (vannes, réservoirs, brides, tuyauteries, pompes, compresseurs, etc.), et en additionnant les fréquences individuelles de défaillance selon leur typologie et leur taille de fuite potentielle. Cette démarche est généralement accompagnée d'une catégorisation par tranches de tailles de trous. Plusieurs références offrent des classifications différentes de ces intervalles [27]:

- Le rapport de l'International Association of Oil & Gas Producers (OGP, 2010) définit cinq classes de tailles : 1–3 mm, 3–10 mm, 10–50 mm, 50–150 mm et supérieure à 150 mm.
- Spouge (1999) propose une série de tailles représentatives : 5 mm, 25 mm, 100 mm et rupture.
- Vinnem (2014) adopte une catégorisation en fuites petites, moyennes et grandes, qui est utilisée dans la structuration des arbres d'événements.

L'absence de consensus sur le découpage des intervalles de taille constitue une incertitude épistémique importante.

3.2.2 Incertitudes dans la modélisation des conséquences

La modélisation des conséquences repose sur des modèles physiques et des modèles d'effets visant à traduire un événement en termes d'impacts sur les personnes, les biens ou l'environnement. Cette étape comporte plusieurs sources d'incertitude importantes.

3.2.2.1 Taille de fuite représentative

Dans les modèles de conséquences, chaque intervalle de taille de trou est généralement représenté par un diamètre unique, censé être représentatif. Cette simplification introduit une incertitude non négligeable. Par exemple, l'usage d'un diamètre de 7 mm pour modéliser l'intervalle 3–10 mm tend à surestimer le débit de fuite, notamment si les fuites réelles se concentrent dans la partie inférieure de l'intervalle, entre 3 et 5 mm. Cette approximation influe directement sur le calcul du débit massique, la quantité de fluide libérée, et donc l'ampleur des scénarios de dispersion, d'incendie ou d'explosion. Il s'agit d'une incertitude épistémique, introduite par la simplification de la réalité physique.

3.2.2.2 Conditions météorologiques

Les conditions atmosphériques, telles que la température ambiante, la vitesse du vent et la stabilité de l'atmosphère, influencent fortement la modélisation de la dispersion des substances dangereuses et des effets thermiques ou toxiques. Ces paramètres présentent une incertitude aléatoire, due à leur variabilité naturelle dans le temps et l'espace, ainsi qu'une incertitude épistémique liée à leur sélection dans le cadre des hypothèses de modélisation.

Le choix d'un scénario météorologique moyen ou pessimiste a un impact direct sur les distances d'effet, ce qui peut significativement modifier les résultats de l'évaluation des conséquences.

3.2.2.3 Coefficient de décharge

Le coefficient de décharge, qui intervient dans le calcul du débit de fuite à travers un orifice, constitue également une source d'incertitude. Ce coefficient dépend de la géométrie réelle de l'ouverture, de la nature du fluide, du régime d'écoulement, ainsi que des conditions de pression et de température. Or, lors d'un scénario de perte de confinement accidentelle, il est rarement possible de connaître précisément la forme et la configuration de l'orifice.

Les modèles adoptent alors des valeurs standards pour ce coefficient, ce qui peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation du débit. Cette incertitude épistémique, bien que souvent négligée, affecte directement la précision des résultats issus des simulations de dispersion ou d'explosion.

3.3 Méthodes de traitement des incertitudes

Dans l'analyse quantitative des risques, diverses approches permettent de modéliser et de gérer l'incertitude. Ces méthodes diffèrent selon la nature de l'information disponible, le niveau de précision requis et le contexte d'application. Les principales approches sont présentées ci-dessous.

3.3.1 Représentation par intervalles

La représentation par intervalles de l'incertitude est utile dans les situations où l'on connaît avec certitude les bornes d'une grandeur, mais où l'on dispose de peu ou d'aucune information supplémentaire. Voici un exemple simple : un golfeur réalise deux birdies sur les trois premiers trous. Combien en fera-t-il au total sur l'ensemble des 18 trous ?

Si l'on ne dispose d'aucune autre information que celle-ci, une manière raisonnable d'exprimer l'incertitude sans formuler d'hypothèse non justifiée serait de donner une estimation sous forme d'un intervalle allant de 2 à 17 (c'est-à-dire toutes les valeurs possibles restantes). L'analyse par intervalles permet d'estimer les bornes possibles des résultats d'un modèle en utilisant des intervalles pour représenter l'incertitude sur les entrées ou les paramètres du modèle. [27]

3.3.2 Représentation floue

La théorie des ensembles flous a été introduite par Zadeh (1965), avec pour objectif principal de fournir un moyen de modéliser l'incertitude (ou la nature vague) du langage naturel. Dans ce cadre, des notions comme « fortement peuplé » ou « vents relativement forts » peuvent être formalisées à l'aide de fonctions d'appartenance. L'idée principale peut être facilement comprise par comparaison avec la théorie des ensembles classiques.

Comme l'a indiqué Isukapalli (1999) : en théorie des ensembles classiques, la valeur de vérité d'une affirmation peut être donnée par la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$, définie comme suit [27] :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

En revanche, la théorie floue permet à la valeur de μ_A d'être continue entre 0 et 1, selon la fonction suivante [27] :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \\ p ; 0 < p < 1 & \text{si } x \text{ appartient partiellement à } A \end{cases} \quad (3.2)$$

L'arithmétique floue, issue de la théorie des ensembles flous, peut également être considérée comme une généralisation de l'analyse par intervalles.

3.3.3 Simulation Monte Carlo

La simulation Monte Carlo est une technique mathématique informatisée prédit un ensemble de résultats basés sur une fourchette de valeurs estimée par rapport à un ensemble de valeurs d'entrée fixes. En d'autres termes, une simulation de Monte-Carlo construit un modèle de résultats possibles en s'appuyant sur une distribution de probabilité, pour toute variable présentant une incertitude inhérente. Elle recalcule ensuite les résultats encore et encore, en utilisant à chaque fois un ensemble différent de nombres aléatoires compris entre les valeurs minimales et maximales. Dans une expérience de Monte-Carlo type, cet exercice peut être répété des milliers de fois pour produire un grand nombre de résultats probables. [28]

La simulation Monte-Carlo implique trois étapes de base :

1. Configurez le modèle prédictif, en identifiant à la fois la variable dépendante à prédire et les variables indépendantes (également appelées variables d'entrée, de risque ou de prédiction) qui guideront la prédiction.
2. Spécifiez les distributions de probabilité des variables indépendantes. Utilisez les données historiques et/ou le jugement subjectif de l'analyste pour définir une fourchette de valeurs probables et attribuer des pondérations de probabilité à chacune.
3. Effectuez des simulations répétées, en générant des valeurs aléatoires des variables indépendantes. Procédez ainsi jusqu'à ce que vous ayez recueilli suffisamment de résultats pour constituer un échantillon représentatif du nombre quasi infini de combinaisons possibles.

3.3.3.1 Caractérisation probabiliste des paramètres

Mieux comprendre les risques, gérer les incertitudes et prendre des décisions éclairées grâce à la simulation Monte Carlo » souligne l'importance d'analyser les données disponibles avant de sélectionner une distribution de probabilité pour modéliser une incertitude. Il met en avant l'utilisation d'outils statistiques descriptifs (moyenne, écart-type, asymétrie, valeurs aberrantes) et des outils graphiques comme les histogrammes. La nature et la fiabilité des données, ainsi que leur lien avec les objectifs du projet, doivent aussi être pris en compte [29].

- **Distribution normale**

La distribution normale, aussi appelée loi de Gauss, est une loi continue en forme de cloche, centrée sur sa moyenne (μ) et dont la dispersion est mesurée par l'écart type (σ) [30]. Elle modélise efficacement des phénomènes naturels comme les tailles ou les erreurs de mesure, notamment lorsque ces phénomènes résultent de multiples effets indépendants, conformément au théorème central limite [31]. Sa densité maximale se situe à la moyenne, décroissant symétriquement de part et d'autre. Elle est particulièrement utile lorsque les données sont nombreuses, continues et modérément variables, et elle constitue un fondement essentiel pour l'inférence statistique, comme les tests d'hypothèses ou les intervalles de confiance [32].

- **Distribution uniforme**

La loi uniforme continue attribue une probabilité égale à toutes les valeurs comprises dans un intervalle défini par deux bornes, a et b , sa densité de probabilité étant constante sur cet intervalle [31]. Elle est utilisée lorsque l'on ne dispose d'aucune information favorisant une valeur sur une autre, reflétant ainsi une incertitude totale. Elle trouve des applications fréquentes dans les simulations numériques, notamment comme générateur de nombres aléatoires ou pour modéliser des erreurs bornées [32]. Cette loi est également pertinente dans les premières étapes d'analyse de sensibilité, où une approche neutre ou prudente est privilégiée.

- **Distribution log-normale**

Une variable suit une distribution log-normale lorsque son logarithme est normalement distribué. Définie uniquement pour des valeurs strictement positives, cette distribution est asymétrique et adaptée à la modélisation de phénomènes à croissance multiplicative comme les revenus ou les durées de vie. Elle est souvent employée dans les études de risque, en particulier pour représenter des événements rares mais significatifs. D'après Limpert et al. [33], elle est préférable à la loi normale lorsque la variabilité est élevée ou que des valeurs extrêmes influencent fortement la moyenne.

3.3.3.2 Intérêt de la méthode Monte Carlo en QRA

La simulation Monte Carlo est couramment utilisée dans l'analyse quantitative des risques (QRA) afin de modéliser l'incertitude des paramètres d'entrée. En attribuant des distributions de probabilité aux variables incertaines, cette méthode permet de générer divers scénarios, y compris des cas extrêmes. Cette approche est pertinente lorsque les relations entre variables sont non linéaires ou complexes, rendant les solutions analytiques inapplicables. [34]

Une telle intégration permet une estimation réaliste et robuste du risque, essentielle pour orienter la prise de décision en contexte incertain.

Dans le cadre des QRA, le percentile 95 % est fréquemment utilisé comme critère décisionnel. Il correspond à un seuil au-delà duquel les conséquences ne sont censées survenir que dans 5 % des cas, ce qui offre une marge de sécurité significative tout en évitant une surestimation excessive du risque [35]. Ce choix repose sur :

- Le percentile 95 % est largement reconnu pour offrir un bon compromis entre prudence et réalisme. Il capte les queues de distribution sans accorder trop d'importance à des événements très improbables. Cette propriété est utile lorsque les données sont très variables ou peu nombreuses. À ce titre, l'*Environmental Protection Agency* (EPA) des États-Unis en recommande l'usage pour estimer des concentrations moyennes en situation d'incertitude élevée. [36]
- Dans le secteur nucléaire, le percentile 95 % est une exigence dans les *Probabilistic Safety Assessments* (PSA). La *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) impose explicitement que les analyses prennent en compte les quantiles supérieurs afin de couvrir les conséquences sévères. [37]
- Le recours aux percentiles, et en particulier au 95e, est également bien documenté dans les études de risque appliquées aux infrastructures critiques, aux systèmes énergétiques et à la santé publique. Ils servent de repères pour l'évaluation des seuils de tolérance au risque tout en intégrant l'incertitude. [38]

Ce chapitre a permis de mettre en lumière les multiples formes d'incertitudes présentes dans les études de risques industrielles, ainsi que les approches disponibles pour leur prise en compte, allant de la simple représentation par intervalles aux simulations probabilistes avancées. Avant d'intégrer ces incertitudes dans une simulation probabiliste, il est nécessaire de s'appuyer d'abord sur une QRA classique, qui servira de base de comparaison. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4

Application de la QRA classique au système débutaniseur

Ce chapitre présente l'application de l'évaluation quantitative des risques selon une approche classique, fondée sur des valeurs déterministes pour l'ensemble des paramètres d'entrée. À partir des scénarios identifiés, les fréquences de défaillance, les conséquences et les effets sont estimés à l'aide de données standard et de conditions fixes.

4.1 Présentation du système à étudier

Le débutaniseur (3200-CB-02) est une colonne de distillation qui joue un rôle essentiel dans le procédé de récupération du GPL. Sa fonction principale est de séparer le butane (C_4H_{10}), récupéré en tête à une pureté supérieure à 98 %, des hydrocarbures plus lourds tels que le pentane et les condensats, extraits en fond de colonne. La figure (4.1) présente la répartition des différentes unités de traitement au sein de l'unité CPF 2, mettant en évidence les principales zones fonctionnelles du site. On y distingue notamment la zone de récupération du GPL (*LPG Recovery Area*), où se situe le débutaniseur (3200-CB-02).

Figure 4.1: Vue d'ensemble de l'implantation par zones fonctionnelles du CPF 2 [1]
(Confidentiel)

4.1.1 Fonctionnement du débutaniseur

Comme l'illustre le diagramme de flux de procédé (PFD) présenté à la figure (4.2), le flux d'alimentation, provenant du fond du dééthaniseur, est introduit dans la colonne du débutaniseur. À l'intérieur de cette colonne, une séparation thermique s'effectue : les composants les plus volatils, notamment le butane, s'évaporent et montent vers la partie supérieure, tandis que les fractions plus lourdes restent à l'état liquide et s'écoulent vers le bas.

Les vapeurs montantes, principalement composées du butane, sont dirigées vers un condenseur à air (3200-HC-02) où elles sont refroidies puis condensées. Le liquide obtenu est collecté dans un accumulateur de reflux (3200-VL-02). Une partie de ce liquide est recyclée dans la colonne par les pompes de reflux, afin d'améliorer l'efficacité de la séparation, tandis que l'excédent est transféré vers les unités de stockage de GPL après refroidissement à 60 °C par un échangeur à air (3200-HC-03). [1]

En fond de colonne, le liquide résiduel, contenant moins de 0,36 mol % de butane, est chauffé à l'aide d'un rebouilleur (3200-HX-02) alimenté en huile thermique. Cette opération permet l'évaporation des dernières fractions légères. Le produit final, principalement composé de pentane

et d'hydrocarbures plus lourds, est ensuite refroidi à 90 °C à l'aide d'un échangeur (3200-HC-04), avant d'être dirigé vers la colonne de stabilisation. [1]

Le bon fonctionnement de l'unité est assuré par un système de régulation automatique, qui contrôle en continu la température en tête de colonne ainsi que le niveau de liquide dans l'accumulateur de reflux, garantissant ainsi la stabilité du procédé et la conformité des produits séparés. [1]

Figure 4.2 : 32 DIAGRAMME DU FLUX DE PROCÉDE du débutaniseur 3200-CB-02

[1](confidentiel)

4.2 Mise en œuvre de l'étude

4.2.1 Données et Hypothèses de l'Étude

Afin de mener à bien l'analyse de risque, plusieurs hypothèses ont été formulées et un ensemble de données a été retenu.

4.2.1.1 Données d'occupation et bâtiments

Le tableau (4.1) ci-dessous présente les données d'occupation du CPF2 ainsi que les bâtiments pris en compte dans le calcul des risques.

Tableau 4.1 : Donnée d'occupation [5] (confidentiel)

4.2.1.2 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques jouent un rôle déterminant dans l'évolution de nombreux scénarios accidentels, notamment ceux impliquant la dispersion de substances inflammables ou toxiques. Elles influencent directement sur les niveaux de létalité, les distances d'impact ainsi que l'étendue des zones exposées, en fonction des paramètres suivants :

- La vitesse du vent et la stabilité atmosphérique, qui affectent la dispersion des nuages de gaz ou vapeurs, ainsi que l'intensité des effets thermiques.
- La direction du vent, qui détermine les zones géographiques potentiellement touchées lors d'un rejet.

Dans le cadre de la modélisation des scénarios d'accident, les combinaisons de vitesses de vent et de catégories de stabilité atmosphérique de Pasquill sont définies sur la base des conditions

climatiques typiquement observées dans la région de Hassi Messaoud. Deux situations représentatives ont été retenues pour la simulation des conséquences [5] :

- **2F** : correspond à une vitesse de vent de 2 m/s ou moins, généralement observée la nuit, sous un ciel partiellement nuageux et avec un vent léger à modéré. Elle est associée à une stabilité atmosphérique de catégorie F, caractérisant une atmosphère stable avec un faible potentiel de dispersion.
- **5D** : correspond à une vitesse de vent de 5 m/s ou moins, typique des périodes diurnes. Cette situation est associée à une stabilité de catégorie D, représentant une atmosphère neutre avec un niveau de dispersion modéré.

Ces deux profils météorologiques sont utilisés dans les modélisations de dispersion afin de couvrir à la fois les conditions les plus défavorables (stabilité F, faible vent) et les conditions standards (stabilité D, vent modéré). Cette approche permet d'assurer une évaluation prudente et représentative des risques potentiels liés aux rejets atmosphériques. [5]

➤ **Distribution de la direction du vent**

La direction du vent constitue un paramètre clé dans la détermination des zones affectées par un rejet atmosphérique. La distribution directionnelle utilisée dans cette étude est basée sur la rose des vents de la station météorologique la plus proche, située à Hassi Messaoud, avec validation des tendances dominantes par des observations locales effectuées sur site. Cette rose des vents, représentée à la figure (4.3), permet d'identifier les secteurs les plus fréquemment exposés en cas d'émission accidentelle, et est utilisée pour pondérer les conséquences selon les directions dominantes. [5]

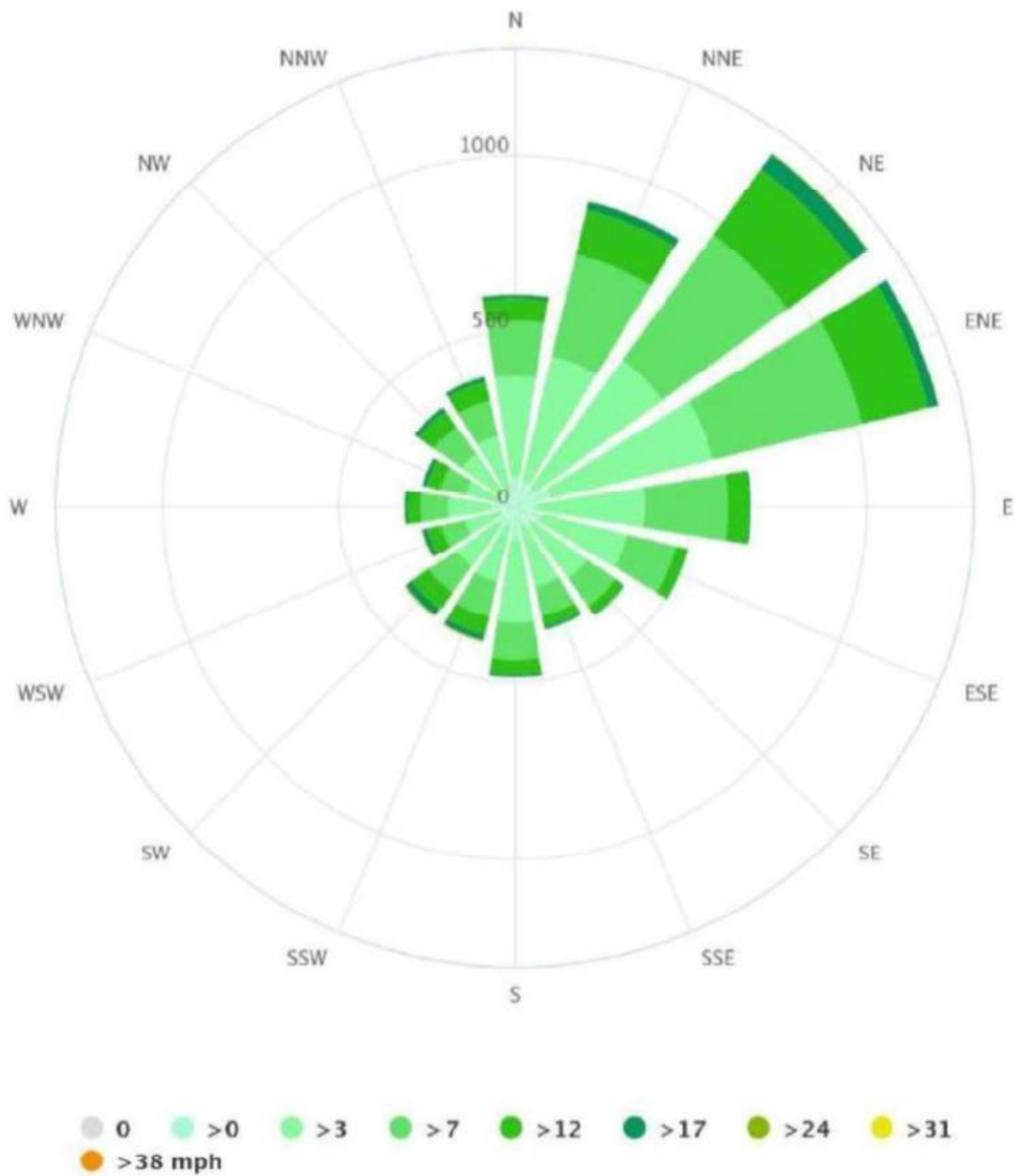


Figure 4.3 : Rose des vents [5]

4.2.1.3 Critères d'acceptabilité du risque

Les critères d'acceptation du risque présenté dans le tableau (4.2) permettent de déterminer si le niveau de risque associé à une installation industrielle peut être jugé acceptable, tolérable ou inacceptable.

En ce qui concerne le risque individuel, ces critères varient en fonction du type d'installation (existante ou nouvelle) ainsi que de la population exposée (travailleurs ou public). [5]

Tableau 4.2 : Critères d'acceptabilité du risque individuel [5]

4.2.1.4 Hypothèses relatives aux tailles de fuite

L'Analyse Quantitative de Risque prend en compte un ensemble de fuites représentatives en définissant un ensemble de tailles de défaillance discrètes [5] comme indiqué dans le tableau (4.3).

Tableau 4.3 : Catégories de taille de trou [5]

Catégorie de taille	Plage de taille	Diamètre de trou équivalent
Petite	3~10 mm	5
Moyenne	10 - 50 mm	25
Grande	50 - 150 mm	100
Rupture	>150 mm jusqu'à l'ouverture complète	Ouverture complète

La plage est utilisée pour la distribution des tailles de trou dans les calculs de fréquence, tandis que le diamètre de trou équivalent est utilisé dans les calculs de conséquences comme taille représentative de trou.

4.2.2 Identification des dangers

L'identification des dangers dans le cadre de la QRA a été réalisée à partir des résultats de l'analyse HAZOP conduite pour le projet RKF2.0 (Annexe A). Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs événements dangereux, principalement des pertes de confinement, susceptibles d'entraîner des accidents majeurs tels que des incendies, des explosions ou des rejets toxiques.

À partir de cette analyse, les scénarios présentant un potentiel significatif en termes de gravité et de probabilité ont été sélectionnés. L'évaluation des risques associés à ces scénarios a ensuite été réalisée à l'aide de la matrice de criticité (Annexe B), développée pour le projet GRKF. Cette approche semi-quantitative permet de hiérarchiser les événements selon leur niveau de risque, défini comme la combinaison de la fréquence estimée et de la gravité des conséquences potentielles.

Les résultats de l'identification des dangers liés au débutaniseur sont présentés de manière synthétique en Annexe C.

4.3 Segmentation des sections isolables

À la suite de l'identification des flux dangereux au sein du débutaniseur, une revue détaillée des P&ID de cette unité a été menée dans le but de définir les sections isolables. Cette étape vise à délimiter avec précision les volumes pouvant être confinés en cas de scénario accidentel, afin d'en évaluer l'inventaire et les propriétés physico-chimiques des substances qu'ils contiennent.

Nomenclature spécifique adoptée dans le cadre du projet RKF2.0, structurée comme suit :

IS-WW-Y, où :

- IS : désigne une *Isolatable Section* (section isolable),
- WW : représente le numéro d'ordre attribué à la section au sein du débutaniseur,
- Y : indique la phase du fluide contenue dans la section, avec :
 - G : gaz,
 - L : liquide,
 - F : fluide (mélange ou phase indéterminée).

Certaines parties du débutaniseur contenant à la fois des phases gazeuses et liquides ont été subdivisées en sous-sections distinctes, afin de permettre une évaluation différenciée des inventaires par phase.

Le tableau (4.4) présente de manière synthétique les différentes sections isolables associées à l'unité du débutaniseur.

Tableau 4.4 : Liste des sections isolables associé à l'unité débutaniseur (**Confidentiel**)

Afin d'illustrer la mise en œuvre complète de la QRA, tant dans son approche déterministe que probabiliste, la section isolable ISO-35-G (Annexe D) a été sélectionnée à titre de scénario de référence. Ce choix s'appuie sur la nature gazeuse du fluide, les pressions en jeu ainsi que le potentiel significatif d'accident majeur (explosion) associé à une perte de confinement à ce niveau de l'unité.

4.3.1 Comptage des composants

Le comptage des composants présents sur la section isolable ISO-35-G a été réalisé à partir des P&ID annotés. Cette étape constitue une base indispensable pour l'évaluation des fréquences de fuite, chaque type d'équipement (vannes, brides, instruments, etc.) étant associé à une probabilité de défaillance spécifique. Les résultats détaillés de ce comptage sont présentés en Annexe E.

4.4 Modélisation des conséquences

4.4.1 Débit de fuite

Afin d'évaluer les conséquences associées aux différents scénarios de fuite, une estimation des débits de fuite a été réalisée pour chaque cas représentatif. Le tableau (4.6) synthétise les scénarios de fuite envisagés pour l'équipement identifié sous ISO-35-G, selon différents diamètres de brèche.

Tableau 4.6 : Débits de fuite associés aux différents scénarios pour l'ISO-35-G
[5](Confidentiel)

Il a été constaté que les débits de fuite retenus dans les différents scénarios (brèches de type 25 mm, 100 mm, FBR, etc.) correspondent aux débits nominaux du procédé, ou s'en approchent fortement.

4.4.2 Dispersion du Gaz inflammable

Dans cette étude, la dispersion du GPL émis depuis la section ISO-35-G du débutaniseur a été modélisée à l'aide du modèle HEGADAS (voir chapitre 2). L'analyse a été réalisée conformément aux méthodologies standards, en simulant l'extension du nuage jusqu'à deux seuils critiques : la limite inférieure d'inflammabilité (LFL) et la moitié de cette valeur (0.5 LFL), considérée comme une zone de vigilance. Deux conditions météorologiques caractéristiques du site de Hassi Messaoud ont été prises en compte : 2F et 5D.

Pour chaque scénario, le modèle permet de calculer, à différentes distances de la source, la concentration centrale du gaz, la fraction molaire associée, ainsi que les surfaces transversales dans lesquelles la concentration dépasse les seuils d'inflammabilité définis. Le tableau (4.7) illustre l'ensemble des résultats obtenus.

Tableau 4.7 : Résultats de la dispersion du GPL des deux scénarios

x (m)	Sy (m)	Sz (m)	C _A (kg/m ³)	A _{inf} LFL (m ²)	A _{inf} 0.5LFL (m ²)	Scénario
10	0.57	0.23	1.3542	1.5	1.78	2F
20	1.13	0.45	1.2226	5.83	6.94	
30	1.69	0.68	1.1038	12.73	15.23	
40	2.26	0.9	0.9965	21.96	26.4	
50	2.82	1.13	0.8997	33.25	40.15	
10	1.2	0.8	0.085	3.0159	3.0159	5D
20	2.5	1.6	0.045	12.5664	12.5664	
30	4.0	2.6	0.027	0.0	32.6726	
40	5.5	3.5	0.018	0.0	0.0	
50	7.0	4.3	0.012	0.0	0.0	

Les surfaces transversales ont ensuite été intégrées sur la longueur du panache pour estimer le volume total inflammable. Cette approche discrète repose sur la formule (2.14) du modèle HEGADAS où $\Delta x = 10$ m représente l'intervalle entre chaque tranche. Le tableau (4.8) présente les volumes obtenus pour chaque scénario :

Tableau 4.8 : Volumes inflammables totaux

Scénario	Volume _{inf} $\geq$ LFL (m ³)	Volume _{inf} $\geq$ 0.5 LFL (m ³)
2F	752.5	904.7
5D	155.81	518.53

L'analyse montre que sous condition 2F, les surfaces inflammables sont significatives jusqu'à 60 mètres, avec un volume total inflammable qui atteint rapidement la limite de 905 m³. Le nuage

reste dense et faiblement dispersé en raison du vent faible et de la stabilité atmosphérique élevée. En revanche, sous condition 5D, la dilution est rapide et limite l'inflammabilité à seulement 20–30 mètres. Le volume inflammable cumulé reste nettement inférieur à celui du scénario 2F. Ces résultats illustrent l'impact déterminant des conditions météorologiques sur la dispersion et le risque d'inflammation.

4.4.3 Surpression d'une explosion de nuage de vapeur

Le tableau (4.9) présente les distances radiales en (m) à partir de la source, pour différents niveaux de surpression, et pour deux combinaisons météo représentatives : 2F et 5D

Tableau 4.9 : Distances de surpression en cas d'explosion tardive de nuage de vapeur [5]

Les résultats montrent que les distances de surpression augmentent avec la gravité du scénario de fuite. Sous les deux conditions météorologiques considérées, les distances sont légèrement plus élevées en 2F, en raison du confinement accru du nuage. Le scénario de rupture totale (FBR) génère les plus grandes distances, atteignant plus de 400 m pour 50 mbar, tandis que les petites fuites (ISO-35-G-5) n'engendrent pas de surpressions significatives.

4.4.3.1 Effet de la surpression sur la vie humaine

Le calcul des effets de la surpression sur la vie humaine repose sur l'application d'une fonction Probit, décrite par l'équation (2.24) du chapitre 2. La probabilité de létalité correspondante est ensuite déterminée à l'aide du tableau de conversion présenté dans la figure (2.5).

Les résultats obtenus seront présentés sous forme d'un tableau récapitulatif (Tableau 4.10), indiquant pour chaque niveau de surpression la probabilité associée de mortalité.

Tableau 4.10 : Probabilité de létalité en fonction de la surpression

Surpression (mbar)	Indice probit Y	Probabilité de létalité (%)
50	4.18	21
100	5.13	55
140	5.59	72
200	6.07	86
300	6.63	95
350	6.84	97

La probabilité de létalité augmente de manière significative avec le niveau de surpression. À partir de 100 mbar, plus de la moitié des personnes exposées risquent des blessures mortelles. Au-delà de 200 mbar, le taux de létalité dépasse 85 %, atteignant 97 % à 350 mbar. Ces résultats confirment que les surpressions générées par une explosion de nuage de vapeur peuvent avoir des conséquences graves, voire fatales, sur la vie humaine à proximité de la source.

4.5 Analyse de fréquence

4.5.1 Probabilité d'ignition

La probabilité d'ignition dépend principalement de la taille et de la composition de la fuite, ainsi que de la présence de sources potentielles d'inflammation. Dans cette étude, les valeurs utilisées sont issues de la base de données de l'Institute of Petroleum et ont été définies en fonction des tailles de trou considérées pour chaque segment. Les probabilités correspondantes sont présentées dans le tableau (4.11).

Tableau 4.11 : Probabilité d'ignition [5]

ID de fuite	Probabilité totale d'ignition	Probabilité de non-ignition	Ignition immédiate	Ignition retardée
ISO-35-G-5	0,0011	0,9989	0,00055	0,00028
ISO-35-G-25	0,0050	0,9950	0,00250	0,00125
ISO-35-G-100	0,0250	0,9750	0,01250	0,00625
ISO-35-G-FBR	0,0250	0,9750	0,01250	0,00625

4.5.2 Fréquences de perte de confinement

La fréquence de fuite adoptée dans cette étude est extraite du *Risk Assessment Data Directory* publié par l'IOGP sous la référence IOGP Report 434-01 (édition 2019). La valeur retenue pour la fréquence de perte de confinement est de 3,48E-03 par an. [5]

4.5.3 Développement d'arbre des événements

La dernière étape de l'analyse de fréquence consiste à élaborer les arbres d'événements. Ces diagrammes permettent de représenter l'enchaînement logique des évolutions possibles à partir d'une perte de confinement, en tenant compte des probabilités associées aux différentes issues. L'arbre d'événements correspondant au scénario ISO-35-G est présenté dans la figure (4.4).

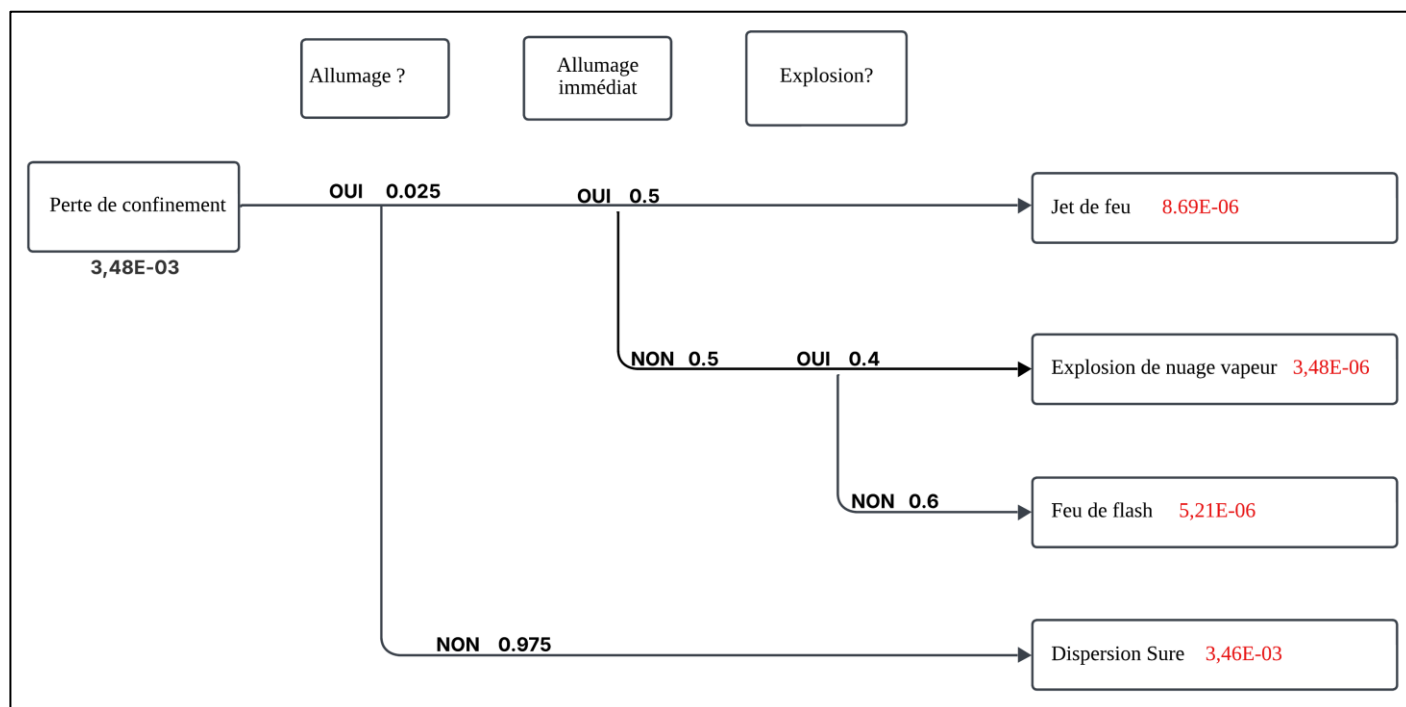


Figure 4.4 : Arbre des événements associé à une perte de confinement

4.6 Calcul des risques

4.6.1 Risque individuel localisé (LSIR)

Le risque individuel localisé associé à la zone du débutaniseur du CPF2 a été évalué à l'aide de l'équation (2.25). Le tableau (4.12) en présente le résultat.

Tableau 4.12 : LSIR de la zone du débutaniseur

Location	LSIR (an ⁻¹)
Zone de récupération du GPL	2.86E-03

4.6.2 Risque individuel annuel (IRPA)

Les niveaux de risque individuel ont été calculés conformément à l'équation (2.26), en multipliant les valeurs de LSIR par le facteur d'exposition. Les résultats obtenus pour les différents groupes de travailleurs sont présentés dans le tableau (4.13).

Tableau 4.13 : Risque individuel annuel par groupe de travailleurs

N°	Groupe de travailleurs	Zone	LSIR (/an)	Facteur d'occupation	IRPA (/an)
1	Opérations	Zone procédé	2.5E-03	0,11	2.75E-04
2	Maintenance	Zone procédé	2.5E-03	0,05	1.25E-04
3	HSE	Zone procédé	2.5E-03	0,025	6.25E-05
4	Personnel labo	Zone procédé	2.5E-03	0,013	3.25E-05

Conformément aux critères de tolérance au risque (Tableau 4.2), la valeur de référence pour l'acceptabilité du risque individuel est fixée à 2×10^{-5} pour les travailleurs et à 1×10^{-6} pour le public. Les valeurs d'IRPA obtenues pour l'ensemble des catégories de personnel se situent en dessous de ces seuils, ce qui les place dans la zone de risque acceptable.

4.6.3 Risque sociétal - Perte potentielle de vies humaines (PLL)

Le PLL pour chaque groupe de travailleurs est calculé en multipliant l'IRPA par le nombre moyen de personnes exposées, conformément à l'équation (2.27). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (4.14).

Tableau 4.14 : PLL pour chaque groupe de travailleurs

N°	Groupe de travailleurs	IRPA (/an)	Nombre moyen de personnes	PLL (/an)
1	Opérations	2.75E-04	9	2.47E-03
2	Maintenance	1.25E-04	9	1.12E-03
3	HSE	6.25E-05	18	1.13E-03
4	Laboratoire	3.25E-05	6	1,9E-04

L'analyse du PLL (Probabilité de Perte de Vie) par groupe de travailleurs montre que le groupe « Opérations » présente le niveau de risque collectif le plus élevé, avec une valeur de $2,47 \times 10^{-3}/\text{an}$, en raison d'une IRPA élevée combinée à un effectif important. Il est suivi des groupes HSE ($1,13 \times 10^{-3}/\text{an}$) et Maintenance ($1,12 \times 10^{-3}/\text{an}$), qui présentent également des niveaux de risque significatifs. Le groupe « Laboratoire », avec un effectif plus réduit et une IRPA modérée, affiche un PLL plus faible ($1,9 \times 10^{-4}/\text{an}$). Ces résultats permettent de hiérarchiser les zones ou les postes nécessitant des efforts prioritaires en matière de réduction du risque.

L'évaluation déterministe conduite sur le système débutaniseur a permis de modéliser les scénarios redoutés, d'en calculer les fréquences et d'en estimer les conséquences. Bien que conforme aux pratiques courantes, cette approche ne reflète pas la variabilité des paramètres ni l'incertitude inhérente aux données utilisées. Cette démarche permet de produire une première estimation des indicateurs de risque, qui servira de base de comparaison à l'approche probabiliste introduite au chapitre suivant.

Chapitre **5**

QRA probabiliste – Intégration de la simulation Monte Carlo

Ce chapitre présente une approche probabiliste de l'évaluation quantitative des risques, basée sur l'intégration explicite des incertitudes à l'aide de la méthode Monte Carlo. Contrairement à l'approche déterministe du chapitre précédent, cette méthode vise à faire varier aléatoirement les paramètres incertains afin d'obtenir des distributions de résultats, offrant ainsi une vision plus réaliste et robuste du risque. L'étude se concentre sur la section isolable ISO-35-G du débutaniseur, déjà analysée selon une démarche classique.

5.1 Analyse des conséquences

L'analyse des conséquences consiste à simuler les effets physiques associés à un scénario de perte de confinement sur les personnes, les biens et l'environnement. Elle comprend le calcul du débit de fuite, la modélisation de la dispersion et l'évaluation des effets d'explosion. À chaque étape, les paramètres critiques sont modélisés sous forme de variables aléatoires, afin de refléter leur incertitude dans les résultats obtenus via la simulation Monte Carlo.

5.1.1 Calcul du Débit

Le scénario considéré correspond à une fuite gazeuse de GPL survenant au niveau de la section isolable ISO-35-G, dont les conditions de procédé sont bien connues : pression amont de 17 bar absolus, température de 63 °C et fluide composé majoritairement de propane et de n-butane. Compte tenu de ces conditions et du rapport de pression aval/amont, le régime d'écoulement est critique. Le débit massique est alors calculé selon la formule (2.2) adaptée aux gaz parfaits.

La figure (5.1) présente le segment de script correspondant à cette étape de calcul dans le script MATLAB de simulation Monte Carlo.

```
% Paramètres fixes
P1 = 1.76e6; % Pa (17 bar abs)
T = 336; % K (63 °C)
gamma = 1.13;
R = 259; % J/kg/K
N = 1e5; % Nombre d'itérations
Cte = P1 * sqrt(gamma/(R*T)) * (2/(gamma+1))^(gamma/(2*(gamma-1))); % constante débit
```

Figure 5.1:Script de calcul du débit massique en cas de fuite de GPL

5.1.1.1 Spécification des paramètres incertains

Deux paramètres d'entrée ont été considérés comme incertains pour le calcul du débit de fuite : la surface de l'orifice (taille de la fuite) et le coefficient de décharge.

➤ Taille de fuite

La surface de fuite dépend directement du diamètre du trou, lequel peut varier considérablement selon le type de défaillance (corrosion, rupture mécanique, bris de bride, etc.). Quatre classes de diamètres de fuite ont été définies pour l'analyse :

- D1 : 3 à 10 mm
- D2 : 10 à 50 mm
- D3 : 50 à 150 mm
- D4 : 150 mm (rupture totale – full bore rupture)

Pour chaque classe, le diamètre est considéré comme une variable aléatoire suivant une loi uniforme, ce qui permet de capturer l'ensemble des tailles possibles à l'intérieur de chaque intervalle.

La figure (5.2) suivante illustre l'implémentation de cette logique dans le script de simulation.

```
11 % % Définition des classes de simulation (diamètre min et max en mm)
12 simulations = {
13     [3, 10], 'Simulation D1 : [3-10] mm';
14     [10, 50], 'Simulation D2 : [10-50] mm';
15     [50, 150], 'Simulation D3 : [50-150] mm';
16     [150, 150], 'Simulation D4 : 150 mm (fixe)';
17 };
18
19 % Boucle sur les 4 classes
20 for i = 1:4
21     D_range = simulations{i,1};
22     titre = simulations{i,2};
23
24     % Tirage aléatoire du diamètre (en m)
25     if D_range(1) == D_range(2)
26         D = ones(N,1) * D_range(1) * 1e-3;
27     else
28         D = (D_range(1) + (D_range(2)-D_range(1)) * rand(N,1)) * 1e-3;
29     end
```

Figure 5.2: Script de génération des diamètres de fuite

➤ Coefficient de décharge

Le coefficient de décharge (C_d) constitue un paramètre essentiel dans le calcul du débit massique de fuite, car il reflète les pertes de charge occasionnées par le passage du fluide à travers l'orifice de fuite. Sa valeur dépend principalement de la géométrie de cet orifice (bords vifs, bords arrondis, ouverture tubulaire, etc.) et peut varier sensiblement d'un cas à

l'autre. Selon les recommandations du Yellow Book), plusieurs valeurs typiques peuvent être retenues : $C_d = 0,62$ pour un orifice à bords vifs, $C_d = 0,82$ pour un orifice droit, $C_d = 0,96$ pour un orifice arrondi, et $C_d = 1,00$ dans le cas d'une rupture complète de tuyauterie (FBR) [39].

Dans le contexte d'une analyse probabiliste, il est souvent difficile de connaître avec précision la configuration géométrique de l'orifice lors d'un scénario de perte de confinement accidentelle. Pour tenir compte de cette incertitude, l'étude adopte une modélisation probabiliste du coefficient de décharge. Plus précisément :

- Pour les classes de fuites D1 à D3 (fuites partielles), le coefficient de décharge est considéré comme une variable aléatoire suivant une loi uniforme continue entre 0,62 et 0,96. Cette plage permet de représenter l'ensemble des configurations réalistes évoquées dans la littérature.
- Pour la classe D4 (rupture totale – FBR), C_d est fixé à 1,00, conformément aux recommandations du Yellow Book, qui stipule qu'une ouverture complète ne présente pas de restriction à l'écoulement.

La figure (5.3) suivante montre l'extrait de code correspondant à la génération du coefficient de décharge dans la simulation.

```

19 % Boucle sur les 4 classes
20 for i = 1:4
21     D_range = simulations{i,1};
22     titre = simulations{i,2};
23
24     % Tirage aléatoire du diamètre (en m)
25     if D_range(1) == D_range(2)
26         D = ones(N,1) * D_range(1) * 1e-3;
27     else
28         D = (D_range(1) + (D_range(2)-D_range(1)) * rand(N,1)) * 1e-3;
29     end
30
31     % Tirage aléatoire de Cd
32     if D_range(1) == 150
33         Cd = ones(N,1) * 1.0;
34     else
35         Cd = 0.62 + (0.96 - 0.62) * rand(N,1);
36     end

```

Figure 5.3:Script de génération des coefficients de décharge

Le script de la figure 5.3 génère de manière aléatoire les paramètres d'entrée nécessaires au calcul du débit de fuite, à savoir le diamètre d'ouverture (en mètre) et le coefficient de décharge (Cd), pour quatre scénarios de simulation définis dans la variable simulations. La boucle for i = 1:4 parcourt les quatre configurations de fuite, en extrayant pour chacune la plage de diamètres D_range et un titre. Si le diamètre minimal et maximal sont identiques, un vecteur constant est généré ; sinon, le diamètre est tiré aléatoirement selon une loi uniforme entre les deux bornes, puis converti en mètres (*1e-3). Ensuite, le coefficient de décharge est attribué : si le diamètre correspond à une valeur fixe de 150 mm (scénario FBR), Cd est fixé à 1.0 ; sinon, il est généré de façon aléatoire dans une plage réaliste comprise entre 0.62 et 0.96, en suivant une loi uniforme. Ce script permet donc d'introduire de l'incertitude dans la modélisation des scénarios de fuite, aussi bien sur la taille de l'orifice que sur le coefficient de décharge.

5.1.1.2 Affichage des résultats

Les résultats de la simulation consistent à estimer, pour chaque classe de diamètre de fuite (D1 à D4), la distribution des débits massiques calculés à partir des tirages aléatoires de diamètre et de coefficient de décharge selon la formule (2.2), en retenant notamment le percentile 95, qui fournit une valeur seuil au 95^e percentile, correspondant à une borne supérieure statistique du débit simulé, utilisée comme référence fiable dans les analyses de sécurité; le script MATLAB ci-dessous (.Figure 5.4) montre le calcul du débit massique, l'extraction de la moyenne et du 95^e percentile, ainsi que leur affichage sur un histogramme (Figure 5.5) pour visualiser les résultats :

```

46 % Affichage
47 figure;
48 histogram(Q, 60, 'FaceColor', [1 0.6 0], 'EdgeColor', 'k', 'Normalization', 'count');
49 hold on;
50 ylims = ylim;
51
52 % Moyenne
53 plot([mean_Q mean_Q], ylims, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Moyenne');
54
55 % 95e percentile
56 plot([prct_95 prct_95], ylims, 'b--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '95e percentile');
57
58 hold off;
59
60 title(['Distribution du débit massique - ' titre], 'Interpreter', 'none');
61 xlabel('Débit massique (kg/s)');
62 ylabel('Fréquence');
63 legend('show');
64 grid on;
65 end

```

Figure 5.4 : Script d’affichage des résultats de calcul des débits massiques par monte carlo

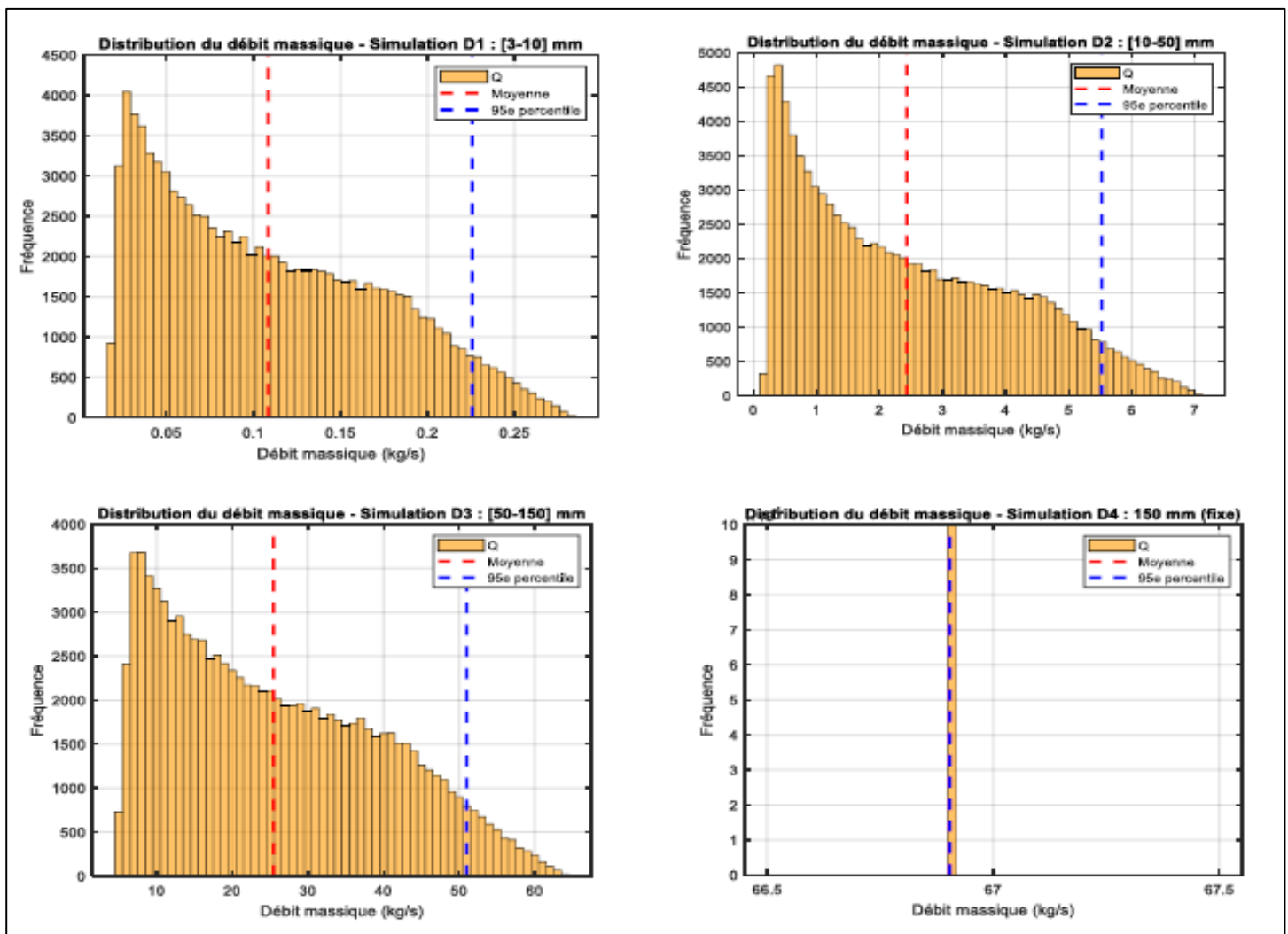


Figure 5.5 : Histogrammes des débits massiques simulés par classe de fuite

5.1.1.3 Estimation probabiliste du débit massique : synthèse des résultats

La simulation Monte Carlo a permis d'évaluer, pour chaque classe de diamètre de fuite (D1 à D4), la distribution probabiliste du débit massique, en tenant compte de l'incertitude sur le diamètre et le coefficient de décharge. Les histogrammes de la figure (5.5) illustrent les distributions obtenues, avec mise en évidence de la moyenne et du 95^e percentile

Conformément aux recommandations des bonnes pratiques en QRA [39], le débit de fuite ne peut excéder durablement le débit nominal du procédé. Toute valeur simulée dépassant ce seuil doit être plafonnée par la valeur du débit procédé. Dans notre cas, ce débit maximal est de 19 kg/s. Le tableau (5.1) donne les débits retenus après application de cette contrainte :

Tableau 5.1 : Débits représentatifs après ajustement au débit nominal du système

Classe	Diamètre (mm)	Débit retenu (P95 plafonné à 19 kg/s)
D1	3 à 10	0.226
D2	10 à 50	5.526
D3	50 à 150	19.00
D4	150 (fixe)	19.00

5.1.2 Calcul de la Dispersion

5.1.2.1 Conditions météorologiques Du GRKF

Les données météorologiques du site GRKF ont été extraites à partir des graphiques publiés sur le site MSN Météo [40], représentant l'évolution mensuelle de la température, de la vitesse du vent et de l'humidité relative au cours des douze derniers mois (Figure 5.6).

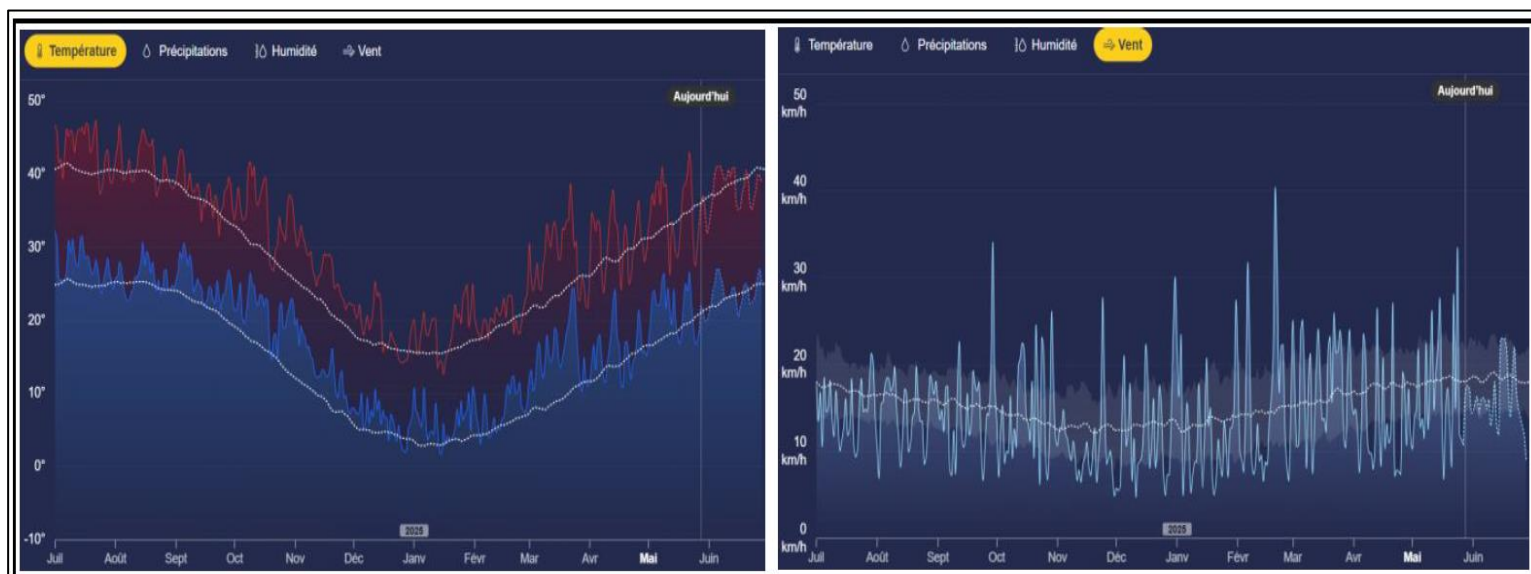


Figure 5.6 : Données météorologiques mensuelles à Berkine (Ouargla) [40]

À partir de ces courbes, les valeurs maximales de chaque paramètre ont été sélectionnées pour chaque mois, puis regroupées et synthétisées dans le tableau (5.2) suivant.

Tableau 5.2 : Paramètres météorologiques mensuels extrêmes

Mois		Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan v	Févr	Mar	Avr	Mai	Juin
Température (°C)	Jour	47	47	43	42	33	25	21	23	39	38	43	41
	Nuit	32	28	29	27	19	11	11	7	22	23	27	29
Vitesse du vent (Km/h)		21.3	20	34.1	26.1	27.7	30.1	27.4	40.3	25.9	27.1	33.5	23

Ces données constituent la base de la définition des scénarios de dispersion étudiés, notamment dans le cadre des simulations Monte Carlo.

5.1.2.2 Spécification des paramètres incertains

Dans cette étude, les principaux paramètres influençant la dispersion atmosphérique du GPL ont été considérés comme incertains et modélisés à l'aide de distributions statistiques adaptées. Les valeurs de la température ambiante et de la vitesse du vent ont été déduites à partir des données météorologiques extrêmes du site GRKF (tableau 5.2). Le débit de fuite a été sélectionné selon trois scénarios représentatifs issus de la simulation du débit (tableau 5.1). Enfin, la classe de stabilité atmosphérique a été modélisée conformément à la classification de Briggs (tableau 2.1).

Le tableau (5.3) suivant résume les caractéristiques statistiques de ces paramètres :

Tableau 5.3 : Caractéristiques statistiques des paramètres incertains

Paramètre incertain	Unité	Type	Distribution	Paramètres / Ensemble de valeurs
Température ambiante (T)	K	Continue	Normale	$\mu = 302,6$; $\sigma = 8,69$
Vitesse du vent (u)	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Continue	Log-normale	$\mu = 2,032$; $\sigma = 0,203$ (sur $\ln u$)
Débit de fuite (Q)	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	Discrète	Uniforme	{0,226 ; 5,526 ; 19,000}
Classe de stabilité (Briggs)	—	Discrète	Uniforme	{A, B, C, D, E, F}

Ces paramètres constituent les variables d'entrée de la simulation Monte Carlo appliquée au modèle de dispersion HEGADAS.

5.1.2.3 Intégration des distributions dans le calcul de la dispersion

Les distributions des paramètres incertains (vitesse du vent, classe de stabilité, débit) sont intégrées dans les équations du modèle HEGADAS (voir Chapitre 2) et simulées aléatoirement à chaque itération de la boucle Monte Carlo. L'intervalle spatial choisi est $\Delta x = 10$ m, ce qui permet de suivre l'évolution du panache à différentes distances de la source.

Le code dans la figure (5.7) ci-dessous illustre comment les variables de vitesse du vent, débit de fuite et classe de stabilité sont générées selon les lois de probabilité définies à la section précédente

:

```
20 % Tirage aléatoire des classes de stabilité
21 idx = randi(6, N, 1); % entiers entre 1 et 6
22 [a,b,c,d] = deal(zeros(N,1));
23 for i = 1:N
24     tmp = coeffs.(stab{idx(i)});
25     [a(i),b(i),c(i),d(i)] = deal(tmp(1), tmp(2), tmp(3), tmp(4));
26 end
27
28 % Débit de fuite pondéré
29 Q_vals = [0.226, 5.526, 19];
30 Q = randsample(Q_vals, N, true, [0.90, 0.09, 0.01]);
31
32 % Paramètres supplémentaires incertains
33 u = lognrnd(log(2.032), 0.203, N, 1); % vitesse du vent (m/s)
```

Figure 5.7 : Script d'intégration des paramètres incertains dans la modélisation de la dispersion

Le script de la figure 5.7 permet d'intégrer les principales incertitudes dans la modélisation probabiliste de la dispersion d'un gaz. Il commence par un tirage aléatoire des classes de stabilité atmosphérique (de A à F, représentées ici par des indices de 1 à 6), chaque classe étant associée à un ensemble de coefficients spécifiques utilisés dans les calculs de dispersion. Ensuite, le script génère un débit de fuite à partir de trois valeurs fixes pondérées selon leur probabilité d'occurrence (0.226 kg/s avec 90 %, 5.526 kg/s avec 9 % et 19 kg/s avec 1 %), afin de refléter la fréquence relative des scénarios de fuite. Enfin, la vitesse du vent est modélisée comme une variable aléatoire suivant une loi log-normale, caractérisée par une moyenne géométrique de 2.032 m/s et un écart-type logarithmique de 0.203, ce qui permet de représenter la variabilité naturelle du vent dans l'environnement étudié.

5.1.2.4 Synthèse et interprétation des résultats

La simulation Monte Carlo a été exécutée pour cinq distances représentatives en aval de la source de fuite (10 m à 50 m). Le tableau (5.4) regroupe les résultats obtenus pour le percentile 95 % de chaque variable simulée.

Tableau 5.4 : Paramètres de dispersion simulés au 95e percentile

x (m)	S _y 95 (m)	S _z 95 (m)	C95 (kg/m ³)	A _{inf} LFL95 (m ²)	A _{inf} 0.5 LFL95 (m ²)
10	3.97	1.89	0.1999	15.89	18.86
20	7.41	3.3	0.0463	10.62	25.05
30	10.68	4.56	0.0171	6.51	14.41
40	13.83	5.74	0.0076	0.0	8.44
50	16.91	6.86	0.0037	0.0	0.0

La concentration centrale diminue fortement avec la distance. À 10 m, elle reste bien au-dessus du seuil de LFL (0,012 kg/m³), mais devient inférieure à ce seuil dès 40 m. Les largeurs de dispersion (S_y, S_z) augmentent avec la distance, traduisant l'élargissement du nuage. Les surfaces à risque ($\geq$ LFL ou $\geq 0.5 \cdot \text{LFL}$) disparaissent au-delà de 40 m et 50 m respectivement, indiquant une dilution suffisante pour écarter tout danger d'inflammation dans 95 % des cas. Les zéros observés traduisent donc une dissipation naturelle du risque.

5.1.3 Calcul des effets du VCE

Dans le cadre du calcul des effets d'une explosion de type VCE (Vapour Cloud Explosion), l'incertitude la plus significative concerne l'indice d'explosion, qui dépend du degré de confinement, de l'obstruction des équipements et des conditions d'amorçage. Étant donné que l'environnement du site étudié est caractérisé par un confinement partiel fort (CPF), l'indice d'explosion a été modélisé comme une variable incertaine discrète, suivant une distribution uniforme sur l'ensemble des indices élevés : {7, 8, 9, 10}.

Les volumes de nuage explosif, préalablement obtenus par simulation de dispersion, sont fixés pour chaque scénario de fuite :

- ISO-35-G-D1 : 25 m³
- ISO-35-G-D2 : 113 m³
- ISO-35-G-D3 : 411 m³
- ISO-35-G-D4 : 945 m³

5.1.3.1 Intégration des distributions dans le calcul des effets VCE

Les effets de l'explosion sont calculés selon le modèle Multi-Énergie (MEM) du TNO, qui relie l'énergie de l'explosion au niveau de surpression via une courbe de surpression réduite ΔP (figure

2.3). L'extrait du script MATLAB correspondant illustre comment procède la simulation Monte Carlo (figure 5.8)

```

7      % Paramètres constants
8      P0 = 101325;          % Pression atmosphérique (Pa)
9      EC = 1e6;             % Densité énergétique volumique (J/m³)
10     N = 10000;            % Nombre d'itérations Monte Carlo
11
12     % Surpressions cibles en mbar
13     P_mbar = [50, 100, 140, 200, 300, 350];
14     DeltaP_star = (P_mbar*100)/P0 + 1;
15
16     % Coefficients 'a' pour indices d'explosion I=7,8,9,10 (courbes MEM)
17     a_vals = [1.3, 2.0, 3.5, 5.5];
18
19     % Scénarios corrigés (Volumen ramenés à 10 m)
20     scenarios = {
21         'ISO-35-G-D1', 25;
22         'ISO-35-G-D2', 113;
23         'ISO-35-G-D3', 411;
24         'ISO-35-G-D4', 945;
25     };

```

Figure 5.8 : script d'implémentation du modèle Multi-Énergie dans la simulation probabiliste

Ce script prépare les données d'entrée nécessaires à la simulation Monte Carlo du modèle Multi-Énergie (MEM) pour l'explosion de nuage (VCE). Il définit d'abord les paramètres constants, notamment la pression atmosphérique (P_0), la densité d'énergie volumique (EC), et le nombre d'itérations ($N = 10\,000$). Les surpressions cibles sont précisées en mbar, puis converties en facteur de surpression relatif ΔP_{star} , utilisé ensuite dans les calculs de distance. Les coefficients 'a' correspondent aux différents indices d'explosion ($I = 7$ à 10) et permettent d'intégrer l'effet du confinement et de la congestion sur la violence de l'explosion. Enfin, le tableau scenarios contient les quatre scénarios de fuite identifiés, chacun avec son volume explosif ramené à une distance de référence de 10 m, ce qui sert de base pour estimer la distance d'effet de chaque surpression dans l'approche probabiliste.

5.1.3.2 Synthèse des résultats

Le tableau (5.5) présente les distances maximales atteintes pour six niveaux de surpression, en fonction du scénario de fuite. Les valeurs correspondent au percentile 95 % de la simulation Monte Carlo.

Tableau 5.5 : Distances atteintes (m) pour chaque surpression au 95e percentile

Fuite ID	Surpression (mbar)					
	50 mbar	100 mbar	140 mbar	200 mbar	300 mbar	350 mbar
ISO-35-G-D1	29.24 m	21.93 m	19.00 m	16.08 m	11.69 m	10.23 m
ISO-35-G-D2	48.34 m	36.25 m	31.42 m	26.59 m	19.33 m	16.92 m
ISO-35-G-D3	74.34 m	55.76 m	48.32 m	40.89 m	29.74 m	26.02 m
ISO-35-G-D4	98.13 m	73.59 m	63.78 m	53.97 m	39.25 m	34.34 m

5.2 Analyse des fréquences

5.2.1 Fréquences des pertes de confinement

Plusieurs bases de données industrielles sont disponibles, chacune proposant des valeurs issues de retours d'expérience différents. Dans cette étude, trois bases ont été prises en compte : IOGP 434-01 (2019), OREDA (2015) et CCPS (1989).

Dans une approche probabiliste, et afin de refléter la variabilité des données disponibles, les fréquences de fuite issues de ces différentes bases de données ont été considérées comme des paramètres incertains. À titre d'exemple, pour un même type d'équipement, la fréquence annuelle de fuite est estimée à $1,32 \times 10^{-2}$ selon l'IOGP, à $6,29 \times 10^{-3}$ selon OREDA, et peut atteindre $9,07 \times 10^{-1}$ d'après le CCPS. Ces valeurs, extrait du tableau en annexe F, ont été intégrées dans les étapes suivantes de l'étude, notamment pour la construction des arbres d'événements et le calcul du risque.

5.2.2 Arbre des événements

L'arbre des événements a été développé en utilisant les trois fréquences de perte de confinement. Les calculs ont permis d'estimer, pour chaque valeur de fréquence initiale, la fréquence d'occurrence des différents événements indésirables, tels que le jet de feu, l'explosion de nuage vapeur, le feu de flash ou la dispersion sans allumage.

Les résultats correspondants sont indiqués en rouge à droite de chaque événement dans la figure (5.9) suivante :

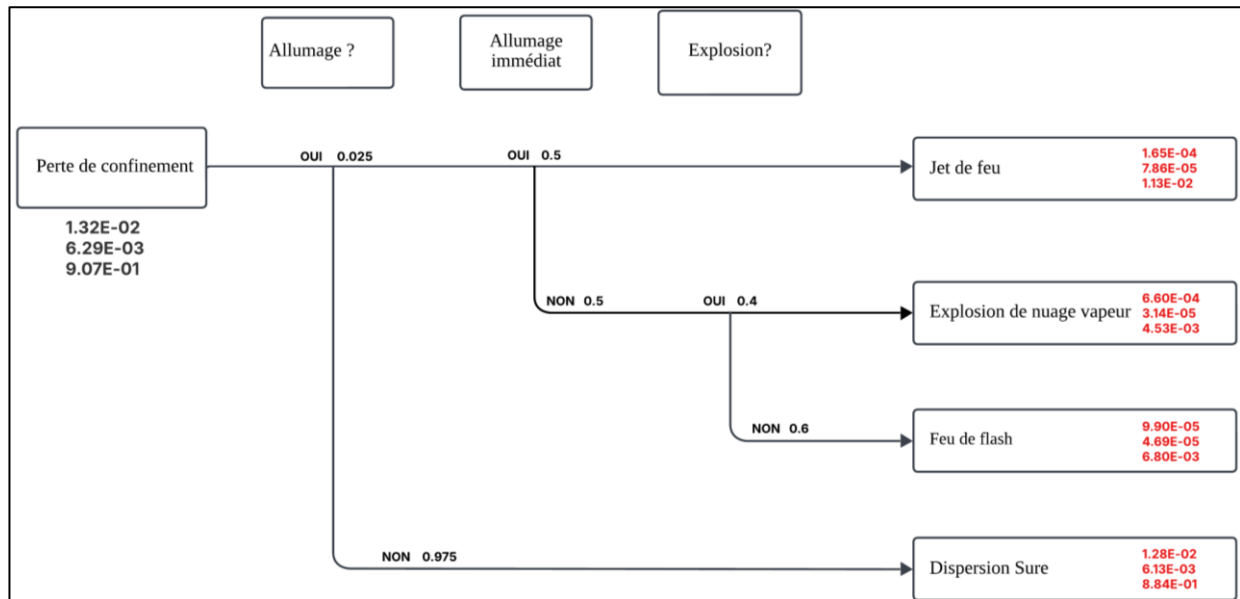


Figure 5.9 : Arbre des événements basé sur trois fréquences de perte de confinement

5.3 Estimation des risques

5.3.1 Calcul du Risque individuel localisé (LSIR) par Monte Carlo

Le risque individuel localisé (LSIR) est évalué à partir de la fréquence des scénarios accidentels et de la probabilité de létalité (Human Impact), conformément à l'équation (2.25). Dans une approche probabiliste, ces deux paramètres sont traités comme incertains. Trois valeurs de fréquence, issues de l'arbre des événements du scénario d'explosion, ont été retenues : 6.60e-4, 3.14e-5, 4.53e-3.

Pour intégrer cette incertitude, les fréquences sont tirées aléatoirement parmi ces trois valeurs, avec une variation supplémentaire de $\pm 10\%$ appliquée à chaque tirage. La probabilité de létalité est quant à elle modélisée par une loi uniforme sur l'intervalle $[0,97 ; 1]$, reflétant l'imprécision liée aux effets humains. La méthode de Monte Carlo est ensuite utilisée pour propager ces incertitudes et obtenir une distribution plus représentative du LSIR.

La figure (5.10) illustre un extrait du script MATLAB associé.

```

1  % Nombre d'échantillons
2  N = 10000000;
3
4  % Fréquences fi et pondérations
5  f_vals = [6.60e-4, 3.14e-5, 4.53e-3];
6  weights = [0.5, 0.25, 0.25];
7
8  % Tirage aléatoire pondéré
9  fi = randsample(f_vals, N, true, weights)';
10
11 % Perturbation ±10 %
12 fi_perturbed = fi .* (1 + (rand(N,1) * 0.2 - 0.1));
13
14 % Hi entre 0.97 et 1.00
15 Hi = 0.97 + rand(N,1) * 0.03;
16
17 % Calcul du LSIR
18 LSIR = fi_perturbed .* Hi;
19
20 % Calcul du percentile 95
21 P95 = prctile(LSIR, 95);

```

Figure 5.10 : Extrait du script MATLAB utilisé pour la simulation Monte Carlo du LSIR

5.3.1.1 Synthèse des résultats

Les résultats de la simulation Monte Carlo sont présentés sous forme de boîte à moustaches dans la figure (5.11).

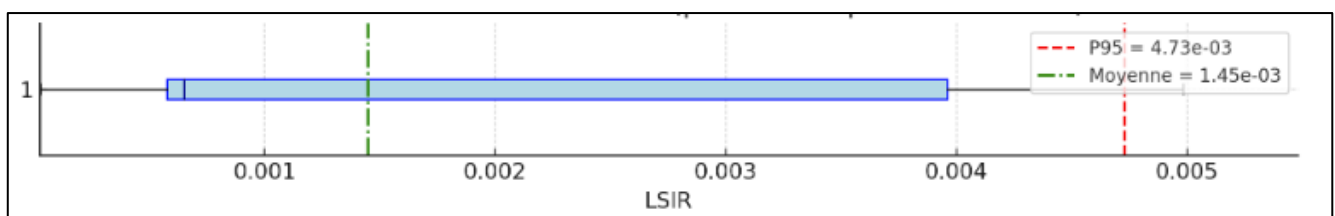


Figure 5.6 : Représentation boîte à moustaches du LSIR simulé par la méthode de Monte Carlo

Ce graphique permet de visualiser la dispersion des valeurs simulées du LSIR, ainsi que les principaux indicateurs statistiques. Deux repères importants sont indiqués : la moyenne de la distribution ($1,43 \times 10^{-3}$), représentée en vert, et le 95^e percentile ($P95 = 4,73 \times 10^{-3}$), en rouge. Ce dernier correspond à une valeur seuil au-delà de laquelle ne se trouvent que les 5 % des cas les plus pessimistes, c'est-à-dire les scénarios extrêmes avec les risques les plus élevés. En prenant le 95^e percentile comme référence, on adopte donc une approche prudente qui exclut volontairement les situations les plus rares mais potentiellement les plus graves.

Le tableau (5.6) donc résume les résultats de la simulation :

Tableau 5.7: Valeur du LSIR (P95) estimée pour la zone de récupération du GPL

Location	LSIR 95 (an ⁻¹)
Zone de récupération du GPL	4.73E-03

5.3.2 Calcul du Risque individuel annuel (IRPA)

Les niveaux de risque individuel annuel (IRPA) ont été estimés conformément à l'équation (2.26), en multipliant le LSIR au 95^e percentile par le facteur d'occupation propre à chaque groupe de travailleurs.

Le tableau (5.7) résume les résultats obtenus :

Tableau 5.8: Risque individuel annuel par groupe de travailleurs

N°	Groupe de travailleurs	Zone	LSIR 95 (an ⁻¹)	Facteur d'occupation	IRPA (/an)
1	Opérations	Zone procédé	4.73E-03	0,11	5.20E-04
2	Maintenance	Zone procédé	4.73E-03	0,05	2.36E-04
3	HSE	Zone procédé	4.73E-03	0,025	1.11E-04
4	Personnel labo	Zone procédé	4.73E-03	0,013	6.14E-05

Le graphique dans la figure (5.12) suivante permet de comparer visuellement les niveaux d'exposition au risque en fonction des postes et des temps de présence, tout en les positionnant par rapport aux seuils réglementaires de criticité.

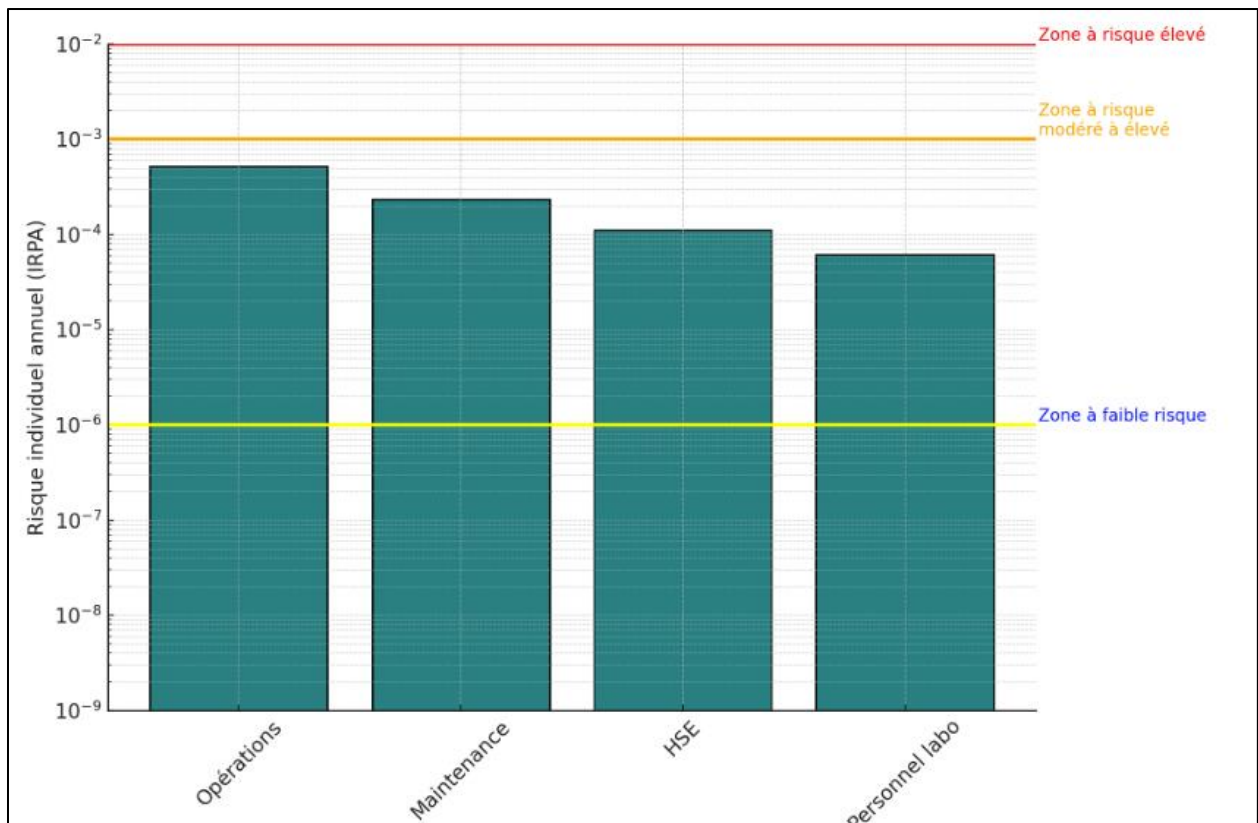


Figure 5.9: Comparaison des risques individuels (IRPA)

D'après les valeurs d'IRPA calculées pour les travailleurs du site RKF 2.0 et leur comparaison aux critères d'acceptabilité du risque individuel, l'ensemble des groupes de personnel se situe dans la zone de risque acceptable, plus précisément dans la zone tolérable.

L'analyse montre que le groupe Opérations présente l'IRPA la plus élevée, avec une valeur de 5,20E-04/an. Ce niveau de risque s'explique par une présence prolongée dans la zone procédée, se traduisant par un facteur d'occupation élevé. Toutefois, cette valeur reste inférieure au seuil supérieur tolérable, fixé à 1,0E-03/an, correspondant à la limite du risque individuel jugé acceptable selon les standards internationaux.

À l'opposé, le personnel de laboratoire affiche un IRPA beaucoup plus faible, de l'ordre de 6,14E-05/an, malgré sa localisation dans la même zone. Cette disparité est principalement liée à un facteur d'occupation très réduit, illustrant de manière claire l'importance du temps d'exposition dans le calcul du risque individuel.

5.3.3 Risque sociétal - Perte potentielle de vies humaines (PLL)

Le risque sociétal est évalué à travers la perte potentielle de vies humaines, qui tient compte à la fois de l'exposition individuelle au danger et du nombre de personnes exposées. Le calcul de la PLL repose sur l'équation (2.27) et consiste à multiplier, pour chaque groupe de travailleurs, l'IRPA par le nombre moyen de personnes exposées dans la zone à risque.

Le tableau (5.8) suivant présente les valeurs obtenues pour les différents groupes de personnel opérant dans la zone procédé du CPF2 :

Tableau 5.10: PLL pour chaque groupe de travailleurs

N°	Groupe de travailleurs	IRPA (/an)	Nombre moyen de personnes	PLL (/an)
1	Opérations	5.20E-04	9	4.68E-03
2	Maintenance	2.36E-04	9	2.12E-03
3	HSE	1.11E-04	18	2.00E-03
4	Laboratoire	6.14E-05	6	3.68E-03

Les résultats montrent que les groupes « Opérations » et « Maintenance » contribuent le plus au risque sociétal, en lien avec leur présence régulière en zone procédé. À l'inverse, le personnel de laboratoire présente une contribution faible, reflétant une exposition limitée.

En conclusion, L'approche probabiliste appliquée à la section ISO-35-G du débutaniseur a permis d'intégrer explicitement les incertitudes dans toutes les étapes de la QRA. La simulation Monte Carlo a fourni des résultats sous forme de distributions, offrant une évaluation plus complète et représentative du risque. L'utilisation du P95 comme indicateur de référence permet de prendre des décisions plus robustes et conservatrices. Ce travail met en évidence l'apport significatif de la simulation probabiliste dans les analyses de risque, notamment lorsqu'il s'agit d'équipements critiques ou de scénarios proches des seuils réglementaires.

Chapitre 6

Évaluation Comparative des Approches Déterministe et Probabiliste : Résultats et perspectives

Ce chapitre vise à comparer de manière approfondie les résultats issus de l'approche déterministe et ceux de l'approche probabiliste appliqués à la QRA du débutaniseur du CPF2. Il met en lumière les différences relevées sur les valeurs de débits, les phénomènes de dispersion, les effets d'explosion de nuage ainsi que les indicateurs de risque, afin d'évaluer l'impact réel de l'incertitude sur la prise de décision en matière de sécurité industrielle.

6.1 Écarts dans l'analyse des conséquences

6.1.1 Débit de fuite : valeur fixe vs simulation Monte Carlo

Le débit de fuite est un paramètre clé de l'analyse des conséquences, car il influence directement la quantité de matière relâchée, la dispersion et les effets potentiels. En approche classique, il est déterminé à partir de valeurs fixes, conduisant souvent à des estimations maximales. À l'inverse, l'approche probabiliste utilise la simulation Monte Carlo pour faire varier ces paramètres selon des lois de probabilité

Le tableau (6.1) ci-dessous illustre les différences entre les deux approches :

Tableau 6.1: Débit massique de fuite – Approche classique vs approche probabiliste (P95)

ISO n°	ID du fuite	Débit Probabiliste P95	Débit Classique
ISO-35-G	ISO-35-G-5/D1	0.226	19.00 kg/s
	ISO-35-G-25/D2	5.526	
	ISO-35-G-100/D3	19.00	
	ISO-35-G-FBR/D4	19.00	

Comme l'indique le tableau, les écarts entre les deux approches sont particulièrement marqués pour les scénarios de fuites partielles (D1 et D2). Dans l'approche classique, un débit maximal identique (19 kg/s) est attribué à toutes les classes, ce qui conduit à une surestimation importante dans les cas où la fuite réelle est plus modérée (0.226Kg/s et 5.526 Kg/s). À l'inverse, l'approche probabiliste permet de moduler le débit selon des distributions réalistes, et d'en extraire une valeur représentative via le P95. Ce dernier reste prudent mais beaucoup plus cohérente avec la nature physique du scénario.

Dans le cas des scénarios D3 et D4, qui correspondent à de grandes fuites (jusqu'à la rupture totale), les deux approches convergent naturellement vers la valeur maximale admise par le procédé, expliquant l'absence d'écart entre les deux méthodes.

6.1.2 Distances de dispersion simulées : classique vs P95

Afin de mieux illustrer les différences entre les deux approches, les résultats des tableaux 4.7 (pour l'approche classique) et 5.7 (pour l'approche probabiliste) ont été regroupés dans un seul graphique. Ce dernier, présenté à la figure (6.1) suivante, permet de comparer visuellement l'évolution des surfaces de nuage inflammable (0,5 LFL) en fonction de la distance, pour différents scénarios simulés.

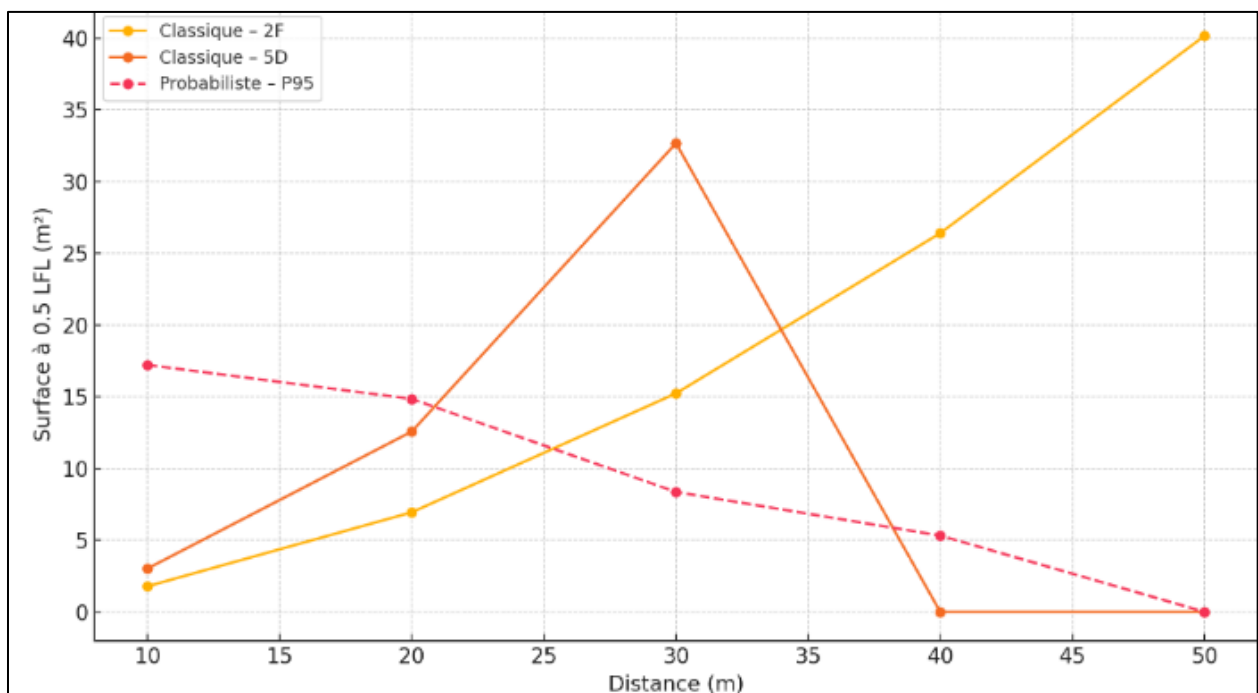


Figure 6.1: Comparaison des surfaces de nuage inflammable entre approches

- La courbe jaune (Classique – 2F) représente un scénario déterministe basé sur une faible vitesse de vent (2 m/s) et des conditions atmosphériques stables, qui limitent la dispersion du nuage.
- La courbe orange (Classique – 5D) correspond à un autre scénario déterministe, simulé avec un vent plus fort (5 m/s) et une atmosphère instable, favorisant une dispersion plus rapide du gaz.

- La courbe pointillée rouge (Probabiliste – P95) illustre les résultats issus de la simulation Monte Carlo, où différentes vitesses de vent et classes de stabilité atmosphérique ont été prises en compte.

L'analyse montre que pour le scénario 2F, la faible vitesse de vent limite la dispersion du nuage, ce qui augmente sa concentration dans l'espace et, par conséquent, la surface où la concentration atteint 0.5 LFL. Cette surface croît régulièrement avec la distance, atteignant un maximum de 40 m² à 50 m.

En revanche, dans le scénario 5D, la vitesse de vent plus élevée favorise une dispersion rapide du gaz. Cela entraîne une dilution plus rapide du nuage, qui atteint une surface maximale à 30 m (≈ 32.7 m²), mais chute brusquement au-delà, avec une disparition complète du nuage inflammable à 40 m.

Concernant l'approche probabiliste, le résultat obtenu reflète une moyenne conservatrice issue de la variation de nombreux paramètres météorologiques et techniques (vitesse du vent, stabilité de l'atmosphère, débits de fuite, etc.). Cette courbe est donc plus représentative de la réalité, car elle intègre l'incertitude sur les conditions d'occurrence. On observe que la surface diminue progressivement avec la distance, traduisant une dispersion plus réaliste du nuage dans le temps et l'espace. Cela montre aussi qu'une seule simulation comme en classique peut soit surestimer soit sous-estimer la zone à risque, alors que l'approche probabiliste donne une estimation plus robuste, notamment à travers le percentile 95 % utilisé ici.

6.1.3 Surpression VCE : variation liée à l'incertitude

Pour mettre en évidence les écarts entre les approches déterministe et probabiliste, les distances associées à différentes valeurs de surpression (de 50 à 350 mbar) ont été extraites des tableaux 4.6 (résultats classiques) et 5.4 (résultats probabilistes). Ces données ont été synthétisées dans un graphique en barres groupées comme illustré dans la figure (6.2) suivante, afin de comparer visuellement les distances atteintes par l'onde de choc pour chaque scénario étudié.

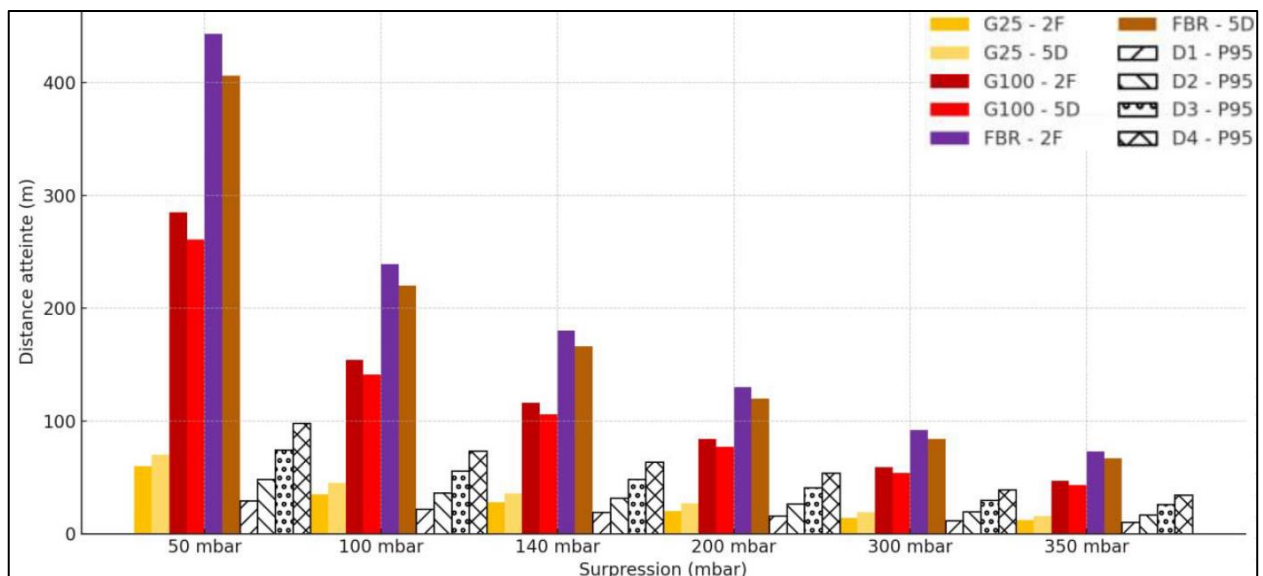


Figure 6.2 : Distances de surpression VCE - Classique vs Probabiliste (P95)

Dans ce graphique, chaque groupe représente une surpression donnée, tandis que les barres indiquent les distances atteintes pour :

- Les scénarios classiques G25, G100 et FBR, chacun simulé sous deux conditions météorologiques différentes (2F et 5D), représentés par des barres colorées.
- Les scénarios probabilistes D1 à D4, issus d'une simulation Monte Carlo intégrant l'incertitude sur plusieurs paramètres, représentés par des barres à motifs.

L'analyse visuelle révèle un écart net entre les deux approches : les distances associées à l'approche probabiliste sont systématiquement inférieures à celles de l'approche classique, et ce pour toutes les plages de surpression étudiées. Cette différence est particulièrement marquée dans les cas des scénarios G100 et FBR. Par exemple, pour une surpression de 50 mbar, le scénario FBR-2F affiche une distance de près de 440 m, tandis que les scénarios probabilistes plafonnent autour de 100 m. Cet écart significatif illustre la tendance de l'approche classique à amplifier les effets, en raison d'hypothèses conservatrices, qui ne tiennent pas compte de la variabilité réelle des conditions.

En revanche, les résultats issus de la simulation probabiliste reposent sur une base statistique plus riche : chaque valeur correspond ici au 95e percentile d'une série de milliers de simulations, ce qui permet d'obtenir une borne supérieure crédible, sans excès de pessimisme. Cette visualisation démontre concrètement que l'approche probabiliste est plus robuste et plus équilibrée, tandis que l'approche classique a tendance à surestimer les zones d'impact du VCE, parfois de plusieurs centaines de mètres.

6.2 Impact du choix de base de données sur l'analyse des fréquences

Le choix de la base de données utilisée pour estimer les fréquences de fuite constitue un facteur déterminant dans une analyse quantitative des risques. Chaque base repose sur des retours d'expérience issus de contextes industriels spécifiques, avec des méthodologies, des périodes d'observation et des typologies d'équipements variables. Le tableau (6.2) présente les fréquences estimées issues du tableau de l'annexe F, et met en évidence des variations significatives d'une base de données à l'autre.

Tableau 6.2 : Données comparatives de fuite et de VCE : IOGP, OREDA et CCPS

Base de donnée	Fréquence de fuite (/an)	Probabilité d'occurrence du VCE
IOGP (2019)	1.32E-02	6.60E-04
OREDA (2015)	6.29E-03	3.14E-05
CCPS (1989)	9.07E-01	4.53E-03

La base IOGP propose une fréquence modérée (1.32E-02), tandis que OREDA donne une valeur environ deux fois plus faible (6.29E-03). En revanche, la base CCPS fournit une estimation extrêmement élevée (9.07E-01), dépassant de plusieurs ordres de grandeur les deux autres sources.

Ces écarts, parfois de plusieurs ordres de grandeur, se répercutent directement sur la probabilité d'occurrence des scénarios de VCE. En effet, cette probabilité est de l'ordre de 6.60E-04 avec IOGP, chute à 3.14E-05 avec OREDA, et atteint jusqu'à 4.53E-03 avec CCPS.

6.3 Influence des écarts dans l'évaluation des risques

6.3.1 Mise en parallèle des résultats LSIR

Le tableau (6.3) suivant présente une comparaison des valeurs du LSIR obtenues selon les deux démarches d'évaluation : classique et probabiliste.

Tableau 6.3 : Résultats comparés du LSIR

Location	LSIR P95 (an ⁻¹)	LSIR classique (an ⁻¹)	Rapport P95 / Classique
Zone de récupération du GPL	4.73E-03	2.86E-03	1,65

Le LSIR obtenu par l'approche probabiliste (P95) est environ 1,65 fois plus élevé que celui calculé de manière déterministe. Cela signifie que le risque individuel est sous-estimé de plus de 60 % lorsqu'on adopte une démarche classique fondée sur des hypothèses fixes.

6.3.2 Comportement des valeurs IRPA selon l'approche adoptée

La figure (6.3) ci-dessous présente une comparaison directe des IRPA déterministes (barres orange) et probabilistes (barres vertes) pour les quatre groupes de personnel concernés : opérations, maintenance, HSE et personnel laboratoire.

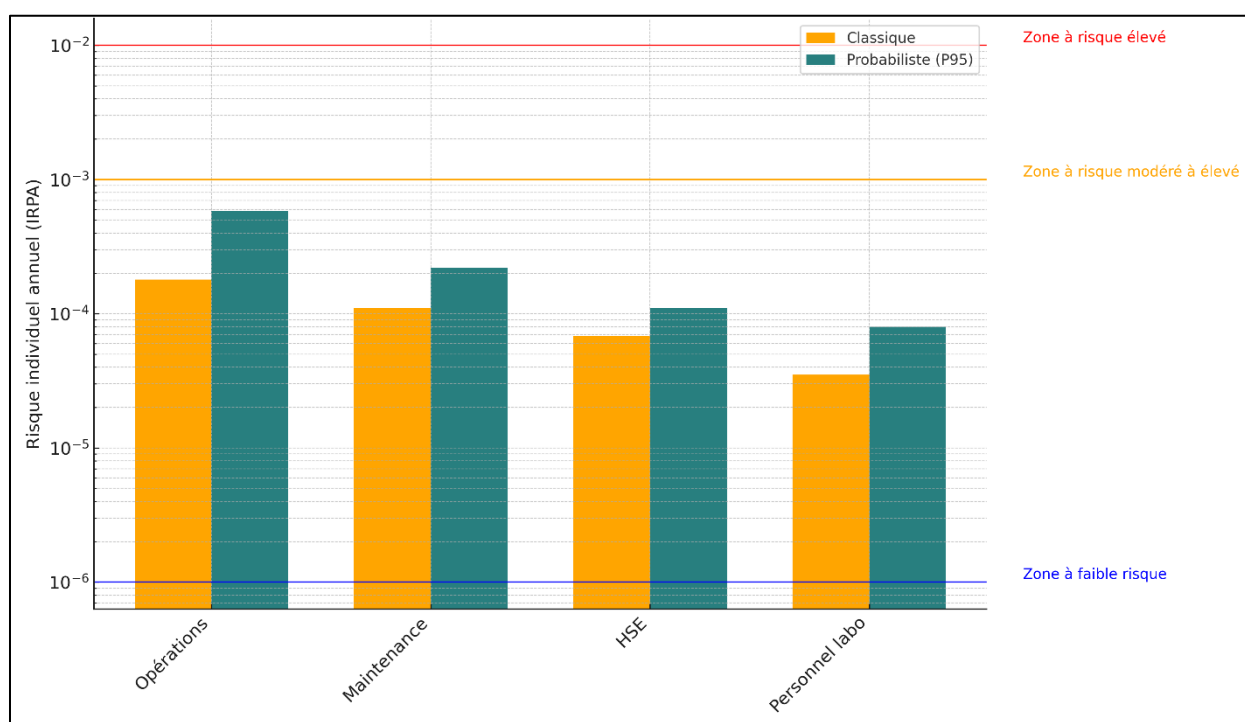


Figure 6.3 : Comparaison des IRPA classique et probabiliste

Les résultats montrent systématiquement des IRPA plus élevées lorsque l'approche probabiliste est utilisée. L'écart le plus important est observé pour le personnel d'exploitation, dont l'IRPA passe

de 2.75×10^{-4} avec l'approche classique à 5.20×10^{-4} dans l'approche probabiliste fondée sur le P95, soit près du double. Des augmentations similaires apparaissent pour les autres groupes de personnel, ce qui confirme que la prise en compte explicite des incertitudes dans les paramètres critiques conduit à des estimations de risque plus conservatrices. Ainsi, il apparaît clairement que l'approche classique tend à sous-estimer le risque réel.

6.3.3 Évolution des estimations PLL en contexte incertain

Afin d'apprécier l'impact de l'incertitude sur les estimations de pertes potentielles de vies humaines (PLL), la figure ci-dessous présente un graphique radar comparant les résultats obtenus selon deux approches. Les valeurs représentées concernent différentes zones d'exposition autour de l'installation, notamment les zones Maintenance, HSE, Laboratoire et Opérations.

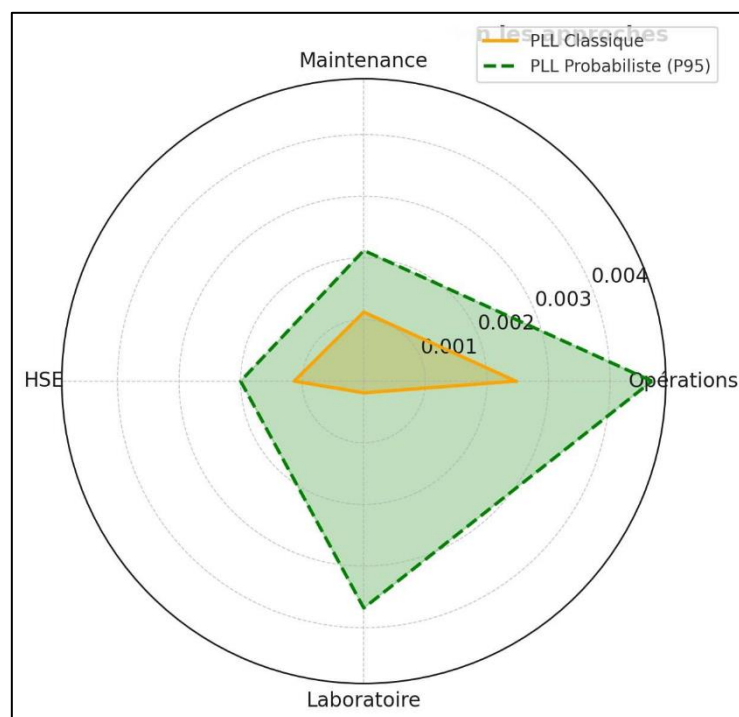


Figure 6.4 : Comparaison des valeurs PLL selon les approches

Le graphique montre un écart systématique entre les deux approches. Dans toutes les zones analysées, la courbe verte en pointillés, représentant l'approche probabiliste (P95), englobe la courbe orange de l'approche classique. Cette différence visuelle montre la tendance de l'approche classique à sous-estimer les pertes humaines potentielles, en raison de l'utilisation de paramètres figés qui ne tiennent pas compte de la variabilité réelle des situations. Par exemple, dans la zone Opérations, la PLL obtenue par l'approche probabiliste atteint 4.68E-03 décès/an, contre

seulement $2.47E-03$ en approche classique. Cela confirme que l'intégration des incertitudes permet non seulement de mieux encadrer les résultats, mais aussi d'éviter une fausse impression de maîtrise du risque.

6.4 Recommandation : Développement d'une interface de calcul probabiliste pour la QRA (Proba QRA)

Dans le cadre de cette étude, les calculs probabilistes de la QRA ont initialement été réalisés à l'aide de scripts développés sous MATLAB, notamment pour la modélisation Monte Carlo appliquée aux différentes étapes de la QRA.

Cependant, afin de rendre ces outils plus accessibles et exploitables dans un cadre opérationnel, une interface complète a été développée sous Microsoft Excel, en intégrant du code VBA. Cette interface permet d'automatiser les calculs probabilistes directement dans Excel, un environnement largement maîtrisé par les ingénieurs, sans nécessiter de connaissances en programmation avancée.

6.4.1 Description détaillée de l'interface Proba QRA

Chaque feuille de calcul constituant l'interface Proba QRA sera présentée de manière spécifique et détaillée, afin d'expliquer clairement son rôle, son fonctionnement et les interactions avec les autres feuilles. Nous allons parcourir chacune de ces pages et en fournir une description spécifique et détaillée.

6.4.1.1 Page « Home »

Lorsque l'utilisateur ouvre le fichier Excel, la première page affichée est la Home Page (voir Figure 6.5). Elle joue le rôle de tableau de bord central pour accéder à toutes les fonctionnalités de l'interface développée. Cette page présente une vue d'ensemble du contenu du fichier et contient des zones interactives telles que des liens hypertexte intégrés aux cellules ou des boutons qui redirigent automatiquement l'utilisateur vers les différentes feuilles dédiées : *Inputs – Process*, *Consequence Analysis* et *Risk Results*.

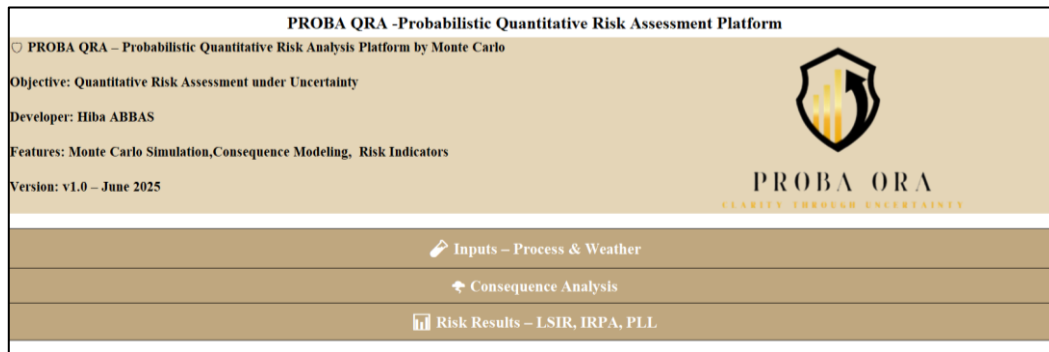


Figure 6.5 : Interface principale de navigation (Home Page)

6.4.1.2 Page « Inputs – Process »

La feuille *Inputs – Process* présentée dans la figure (6.6) ci-dessous, contient l'ensemble des données d'entrée nécessaires aux calculs probabilistes, organisées en deux sections. La première section regroupe les paramètres du procédé : température d'opération, pression, débit nominal, constante des gaz, etc. La seconde section est dédiée aux conditions météorologiques : vitesse moyenne du vent, écart-type, etc. À côté de chaque section, un bouton de commande a été intégré via VBA. Le premier bouton exécute la simulation des débits de fuite. Le deuxième bouton intitulé « Simulate Dispersion » déclenche l'exécution du module de simulation Monte Carlo de la dispersion. Les résultats sont automatiquement transférés et affichés dans la feuille *Consequence Analysis*.

Fluid Parameters and Weather Conditions		
Fluid Input Data		
Operating Temperature (°C)		63
Upstream Pressure (bar abs)		17
Adiabatic Coefficient (gamma)		1,13
Gas Constant (J/kg·K)		259
Nominal Process Flowrate		19
Monte Carlo Iterations		10000
Total Static Volume (m³)		945
Weather Conditions		
Mean Wind Speed (m/s)		2,032
Wind Speed Std Dev (lognormal)		0,203

Simulate Leak Flow Rates
P95

Simulate Heavy Gas

Figure 6.6 : Données d'entrée procédé et météorologie (Inputs – Process Page)

6.4.1.3 Page « Consequence Analysis »

La feuille *Consequence Analysis* est dédiée à l’affichage des résultats liés aux calculs de conséquences. Les débits de fuite P95 ainsi que les résultats de la dispersion, présentés dans la figure (6.7) ci-dessous, sont générés à partir de simulations Monte Carlo lancées depuis la page Inputs – Process

Consequence Analysis (Release Rate, Dispersion, VCE)					
					
Class	Diameter (mm)	P95 Flow Rate (kg/s)			
D1	3–10				
D2	10–50				
D3	50–150				
D4	150–150				
x (m)	C95	Sy95	Sz95	A_LFL95	A_0.5LFL95
10					
20					
30					
40					
50					

Figure 6.7 : Résultats des débits et de la dispersion (Consequence Analysis - Partie haute)

Dans la partie inférieure de la page, deux tableaux présentent respectivement les volumes inflammables et les distances associées aux surpressions VCE (de 50 à 350 mbar). Le volume D4 affiché correspond au volume nominal statique, saisi directement par l’utilisateur dans la feuille d’entrée. Comme illustré dans la figure (6.8), ces résultats sont générés automatiquement via les boutons situés à côté de chaque tableau. »

Volume D1 (m³)	Volume D2 (m³)	Volume D3 (m³)	Volume D4 (m³)	Calculate Volumes		
			945			
Fuite ID	50 mbar	100 mbar	140 mbar	200 mbar	300 mbar	350 mbar
ISO-35-G-D1						
ISO-35-G-D2						
ISO-35-G-D3						
ISO-35-G-D4						

Simulate VCE Overpressure Distances

Figure 6.2: Volumes inflammables et distances VCE (Consequence Analysis - Partie basse)

6.4.1.4 Page « Risk Results »

La feuille *Risk Results*, présentée dans la figure (6.9) ci-dessous, est dédiée à l’estimation des indicateurs de risque associés aux événements accidentels simulés.

Risk Indicators Results: LSIR, IRPA, PLL



PROBA ORA
CLARITY THROUGH UNCERTAINTY

Location	Human vulnerability interval (%)	Leak Frequency (/year)	VCE Occurrence Probability	LSIR P95
	0,97 - 1	1.32E-02	0,00066	
		6.29E-03	0,0000314	
		9.07E-01	0,00453	

Worker Group	Zone	LSIR 95 (an-1)	Occupancy Factor	IRPA (/an)
	Indoor			0,00E+00
	Outdoor			0,00E+00
				0,00E+00
				0,00E+00

Worker Group	IRPA (/an)	Average Number of People	PLL (/an)
			0,00E+00
			0,00E+00
			0,00E+00
			0,00E+00

Figure 6.3: Calcul des indicateurs LSIR, IRPA et PLL (Risk Results Page)

L'utilisateur commence par saisir dans la section supérieure trois fréquences de fuite, extraites de différentes bases de données, ainsi qu'un intervalle de vulnérabilité humaine (par exemple : 0.97–1). Le bouton Calculate LSIR P95, situé à droite du tableau, lance alors une simulation Monte Carlo en VBA, en tenant compte de l'incertitude sur les fréquences et la vulnérabilité. Le résultat est automatiquement affiché dans la colonne LSIR P95.

La partie centrale de la feuille permet de prendre en compte la répartition des travailleurs selon leur groupe d'exposition (Worker Group) et leur zone d'occupation (Zone). Cette dernière est sélectionnée via un menu déroulant permettant de choisir entre Indoor ou Outdoor, ce qui facilite l'assignation des conditions de travail réelles dans l'installation. À partir de la valeur du LSIR et du facteur d'occupation, la valeur de IRPA est automatiquement calculée.

Enfin, dans la partie inférieure de la feuille, la PLL est déterminée en multipliant la valeur de IRPA par le nombre moyen de personnes exposées, également saisi par l'utilisateur. Ces calculs sont réalisés à l'aide de formules Excel standards, garantissant ainsi la lisibilité et la simplicité d'utilisation. Toutes les valeurs se mettent à jour dynamiquement dès la modification d'un paramètre d'entrée.

6.4.2 Business Model Canvas :

Le *Business Model Canvas* (BMC) est un outil visuel indispensable qui permet de représenter de manière synthétique les éléments stratégiques clés d'un modèle économique. Il constitue un support structurant pour la conception d'une solution innovante, facilitant à la fois l'identification des opportunités, des partenaires, des ressources nécessaires et des sources de revenus. Dans le cadre de ce projet, notre BMC correspond à l'interface Proba QRA développée pour la simulation probabiliste des risques industriels. Le modèle est détaillé dans l'Annexe G.

Chacun des neuf blocs du canevas est détaillé afin d'expliquer les choix stratégiques adoptés

1. Segments clients :

Les utilisateurs visés par l'interface Proba QRA partagent le besoin d'une solution avancée d'analyse de risques technologiques selon une approche probabiliste. Les segments ciblés sont :

- Bureaux d'études spécialisés en QHSE et Gestion des Risques Industriels.
- Consultants indépendants en sécurité industrielle
- Ingénieurs HSE dans les secteurs pétroliers, gaziers, chimiques
- Organismes de contrôle technique et inspection
- Centres de formation en sécurité industrielle

2. Proposition de valeur :

L'interface Proba QRA constitue une solution unique par :

- L'intégration de la QRA probabiliste dans un environnement Excel familier
- Une automatisation complète via des scripts VBA pour le calcul de : débits, dispersion, effets VCE, LSIR, IRPA et PLL
- Une prise en main intuitive, grâce à une interface graphique et des boutons d'exécution
- Une compatibilité avec les normes industrielles et exigences réglementaires
- La facilité d'utilisation sur le terrain sans connaissance en programmation

3. Canaux :

Pour toucher les utilisateurs cibles, plusieurs canaux de diffusion sont envisagés :

- Démarchage direct des bureaux d'études et services HSE
- Présentation lors de salons professionnels

- Plateformes numériques d'ingénierie
- Publications et démonstrations via LinkedIn et groupes professionnels
- Vidéos explicatives, tutoriels et webinaires

4. Relations clients :

Afin d'assurer l'engagement et la satisfaction client, les actions prévues sont :

- Fourniture d'un guide d'utilisation complet
- Formations en présentiel ou à distance
- Support technique (e-mail, forum communautaire)
- Mises à jour continues du code VBA
- Possibilités de personnalisation selon les besoins clients

5. Sources de revenus :

Le modèle économique est basé sur :

- Licence annuelle.
- Version gratuite limitée (freemium), avec version PRO payante
- Formations payantes pour entreprises ou consultants
- Offres spécifiques pour étudiants et centres académiques

6. Ressources clés :

- Ressources humaines : développeur VBA, expert QRA/QHSE
- Ressources immatérielles : algorithmes MATLAB, base de données des fréquences, scripts VBA
- Infrastructure : environnement Microsoft Excel, outils de développement et de documentation

7. Activités clés :

- Conception, maintenance et mise à jour du code VBA
- Validation des modules sur cas réels et synthétiques
- Création de contenus didactiques (guides, tutoriels)
- Promotion de l'interface auprès des cibles (salons, web)

8. Partenaires clés :

- Universités et laboratoires en sécurité industrielle
- Experts QRA pour relecture scientifique
- Bureaux pilotes pour tests sur site
- Distributeurs de logiciels et solutions QHSE
- Associations professionnelles HSE

9. Structure de coûts :

- Coûts fixes : développement initial, outils bureautiques, création interface
- Coûts variables : support client, évolutions fonctionnelles, maintenance
- Coûts marketing : participation à des salons, publicité ciblée, production vidéo

En conclusion, cette comparaison a permis de constater que l'approche déterministe tend à sous-estimer le risque réel, car elle ne prend pas en compte la variabilité et l'incertitude des paramètres critiques. À l'inverse, l'approche probabiliste, fondée sur la simulation Monte Carlo, offre une représentation plus complète et plus crédible des risques associés au débutaniseur, en s'appuyant sur des valeurs de percentile 95 qui constituent une estimation conservatrice. De plus, le développement d'une interface Proba QRA rend cette méthode accessible et facilement exploitable dans un contexte industriel.

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche d'évaluation et de maîtrise des risques technologiques majeurs à travers l'application d'une Analyse Quantitative des Risques, appliquée à une section critique du centre de traitement CPF2, à savoir le débutaniseur. L'objectif général a été de comparer deux approches complémentaires, l'approche classique et l'approche probabiliste, afin d'évaluer leur impact respectif sur les résultats de l'analyse de risques, tout en proposant des outils concrets pour faciliter l'intégration opérationnelle de la simulation probabiliste dans un contexte industriel.

Dans une première phase, une QRA classique a été mise en œuvre conformément aux référentiels sectoriels. Cette approche repose sur l'utilisation de valeurs fixes et représentatives pour chaque paramètre du modèle, comme les fréquences de fuite issues de la base IOGP, les diamètres moyens de rupture et les conditions atmosphériques standard. Ces hypothèses ont permis de simuler les conséquences, notamment les débits, la dispersion et les effets de type explosion de nuage, pour en déduire les indicateurs de risque tels que le LSIR, l'IRPA et PLL. Cette méthode fournit une vision ponctuelle du niveau de risque, souvent suffisante dans un cadre réglementaire, mais qui ne prend pas en compte les incertitudes associées aux données d'entrée.

Dans un deuxième temps, une modélisation probabiliste a été déployée afin d'intégrer explicitement les incertitudes associées aux paramètres critiques tels que le diamètre de fuite, le coefficient de décharge, la vitesse du vent, ainsi que les fréquences d'occurrence issues de trois bases de données de référence (IOGP, OREDA et TNO). Contrairement à l'approche déterministe fondée sur des valeurs figées, cette démarche probabiliste repose sur des lois de distribution permettant de représenter la variabilité réelle des données d'entrée. La simulation Monte Carlo a été utilisée comme méthode numérique pour générer des milliers de scénarios aléatoires, reconstruire les distributions statistiques des indicateurs et en extraire notamment le percentile 95 comme mesure représentative et crédible du risque.

La modélisation probabiliste a été d'abord implémentée sous MATLAB à l'aide de scripts développés spécifiquement pour chacune des étapes, qu'il s'agisse du calcul des débits incertains, de la modélisation de la dispersion, de l'évaluation des effets VCE ou encore du calcul des indicateurs de risque. La comparaison menée au chapitre 6 a mis en évidence que l'approche déterministe tend à sous-estimer les niveaux de risque tels que l'IRPA et la PLL. Ces écarts, parfois significatifs, soulignent l'importance de tenir compte des incertitudes dans toute démarche sérieuse de prévention.

Afin de faciliter l'appropriation de l'approche probabiliste par les ingénieurs HSE et les bureaux d'études, une troisième étape du projet a consisté à développer une interface automatisée appelée Proba QRA. Cette interface a été conçue dans Microsoft Excel avec une architecture modulaire reposant sur du code VBA. Elle a été construite en réintégrant, après conversion, l'ensemble des algorithmes MATLAB précédemment développés. L'interface comprend plusieurs feuilles interconnectées : la feuille d'entrée des données (Inputs – Process), la feuille de visualisation des résultats de conséquence (Consequence Analysis) et la feuille d'évaluation des indicateurs de risque (Risk Results). Chaque feuille est dotée de boutons déclencheurs permettant de lancer les simulations de façon autonome, sans nécessité de manipuler du code ou d'utiliser des logiciels externes.

Cette interface représente une innovation pédagogique et opérationnelle majeure. Elle permet d'exécuter des calculs complexes en quelques clics. Elle répond également à un besoin croissant d'outils pratiques pour intégrer les incertitudes dans l'analyse des risques industriels, dans un langage et une plateforme accessible à tous les acteurs du secteur.

Références

- [1] GRKF, «Document interne : Étude de danger,» Hassi Messaoud, 2023.
- [2] O. Consulting, «What is Quantitative Risk Assessment (QRA)?,» En ligne , ORS Consulting, 2023.
- [3] Risktec, « Introduction to QRA,» En ligne , 2023.
- [4] I. d. S. P. d. Catalunya, « Document HSELUP,» ISPC, En ligne , 2023.
- [5] GRKF, «Document interne : Analyse quantitative de risques (QRA) – Site RKF2,» SONATRACH, 2022.
- [6] GSE, «Document interne: Analyse quantitative de risques (QRA) – Site BRN,» 2024.
- [7] I. A. o. O. & G. Producers, «Risk Assessment Data Directory, Report 434-01,» Londres , IOGP, 2000.
- [8] R. S. Ltd, Oil & Gas and Process Industry QRA – Lesson 4: Frequency Assessment, TÜV Rheinland Risktec, 2017.
- [9] I. Sellami, Contribution à l’analyse quantitative des risques industriels : Application à l’industrie des procédés, Batna: Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2019.
- [10] U. d. Babylone, «Effect Models for Consequence Analysis – Chapitre 6,» Département de Génie, Université de Babylone, n.d.
- [11] TNO, Green Book: Methods for the Determination of Possible Damage to People and Objects Resulting from Releases of Hazardous Materials, The Hague: Ministry of Social Affairs and Employment, 1992.
- [12] T. Bott, Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis, Oxford: Gulf Professional Publishing, 2010.

- [13] S. G. Solutions, «HGSYSTEM Technical Reference Manual,» Shell, 1994.
- [14] A. Messadh, «Modélisation de la dispersion atmosphérique dans le cas de la défaillance d'un ballon de séparation haute pression – cas de SONATRACH DP,» École Nationale Polytechnique, Alger, 2016.
- [15] INERIS/AIDA, «Note technique UVCE,» Verneuil-en-Halatte, 2010.
- [16] S. e. J. Hébrard, «Verneuil-en-Halatte,» 2021.
- [17] M. S. Hellas, «Contribution à l'application des techniques de l'intelligence artificielle à l'analyse quantitative des risques industriels – étude de cas,» Université Frères Mentouri – Constantine 1, Constantine , 2021.
- [18] Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases), The Hague: Committee for the Prevention of Disasters (CPR), 1997, p. P_483.
- [19] M. Hassani, R. Bouzerara et R. Chaïb, «Évaluation de la vulnérabilité humaine, matérielle et environnementale face aux divers accidents industriels majeurs ou aux catastrophes,» Université Frères Mentouri – Constantine 1, Constantine, 2021.
- [20] International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), «Risk Assessment Data Directory – Part 4: Vulnerability of Humans to Effects of Hazardous Releases,» IOGP, London, 2023.
- [21] O. Participants, Offshore Reliability Data Handbook, 6^e édition éd., Høvik, Norway: Det Norske Veritas (DNV GL), 2015.
- [22] C. f. C. P. S. (CCPS), Guidelines for Process Equipment Reliability Data, 1^{re} édition éd., New York: American Institute of Chemical Engineers (AIChE), 1989.
- [23] d. l. d. T. e. d. l. Ministère du Logement, Lignes directrices pour l'évaluation quantitative des risques (PGS 3), Pays-Bas: Ministère du Logement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2005.
- [24] Risktec Solutions Limited, «Lesson 5: Event Trees,» Risktec Solutions Limited, 2018.

- [25] C. P. M. & U. G. Colombini, « QRA Analysis of Different Liquefied Natural Gas Supply Alternatives: A Case Study,» Angers, France, 2021.
- [26] Risktec Solutions Ltd., «Lesson 8: Risk Analysis.Oil & Gas and Process Industry QRA,» Risktec Solutions Ltd., Warrington, UK, 2017.
- [27] M. Abrahamsson, «Uncertainty in Quantitative Risk Analysis – Characterisation and Methods of Treatment,» Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund, Sweden, 2002.
- [28] IBM, «Simulation Monte Carlo,» [En ligne]. Available: <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/monte-carlo-simulation>. [Accès le 04 Juin 2025].
- [29] Parm AG, «Mieux comprendre les risques, gérer les incertitudes et prendre des décisions éclairées grâce à la simulation Monte Carlo,» Parm AG, St. Gallen, Suisse.
- [30] F. Dupont, «Distribution normale – définition et propriétés,» StatisticsEasily.
- [31] G. C. R. D. C. Montgomery, Applied Statistics and Probability for Engineers, 5^e édition éd., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011, p. P 162–165.
- [32] R. H. M. S. L. M. K. Y. R. E. Walpole, Probability and Statistics for Engineers and Scientists, 9^e édition éd., Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2012, p. P 215–218.
- [33] S. U. P. A. Papoulis, Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002, p. P 125–127.
- [34] N. B. A. S. P. & B. F. Devictor, «State of the Art on the Probabilistic Safety Assessment (PSA); État de l'art sur les études probabilistes de sûreté (EPS),» Paris, France, 2008.
- [35] M. R. B. Nielsen, «Application of Monte Carlo Simulation in Offshore Hydrocarbon QRA Modelling – A Feasibility Study Utilizing Monte Carlo Simulation and Computational Crowd Simulation in the Modelling of Hydrocarbon QRAs for Offshore Installations,» Faculty of Engineering and Science, Aalborg University - Esbjerg, Esbjerg, Denmark, 2018.
- [36] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), «Supplemental Guidance to RAGS: Calculating the Concentration Term,» U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, DC, USA, 2002.

- [37] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), «Regulatory Guide 1.174: An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis,» U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Washington, DC, USA, 2018.
- [38] T. Aven, « Risk Assessment and Risk Management: Review of Recent Advances on Their Foundation,» *European Journal of Operational Research*, vol. 253, n° 11, pp. 1-13, 2016.
- [39] C. & D. N. van den Bosch, Méthodes de calcul des effets physiques – Yellow Book (CPR 14E), 3^e édition, M. o. S. A. a. E. T. Committee for the Prevention of Disasters (CPR), Éd., La Haye, Pays-Bas: TNO, 2005, p. Chapitre 2 – Écoulement et dispersion par pulvérisation.
- [40] Microsoft Corporation, «Prévisions météo à Berkine, Ouargla, Algérie,» Microsoft Corporation.

Annexe A : HAZOP du nœud

Débutaniseur 3200-CB-02

Cette annexe présente l'analyse HAZOP du nœud Débutaniseur 3200-CB-02. Elle a été menée dans le cadre d'identifier de manière systématique les déviations potentielles, leurs causes, conséquences et mesures de prévention ou de mitigation associées.

(CONDIDENTIEL)

Annexe B : Matrice de criticité de GRKF

Cette annexe présente la matrice de criticité utilisée dans le cadre de l'évaluation des risques liés au projet GRKF, dans le cadre de l'analyse QRA. Elle permet de croiser la gravité des conséquences avec la probabilité d'occurrence des événements indésirables identifiés, afin de hiérarchiser les scénarios à traiter en priorité.

(CONDIDENTIEL)

Annexe C : Identification de dangers

Cette annexe présente les résultats de l'analyse d'identification des dangers appliquée au nœud Débutaniseur 3200-CB-02, dans le cadre du projet RKF 2.0. L'objectif de cette démarche est d'identifier les principaux dangers, leurs causes, conséquences potentielles et les mesures existantes, afin de contribuer à la maîtrise des risques dès la phase d'ingénierie. L'identification des dangers dans le cadre de la QRA a été réalisée à partir des résultats de l'analyse HAZOP. Cette analyse a permis de recenser les scénarios potentiellement dangereux à intégrer dans la QRA.

(CONDIDENTIEL)

Annexe D : Section isolable ISO-35-G

Cette annexe présente des extraits des schémas P&ID relatifs à la section isolable ISO-35-G, laquelle englobe trois équipements : la colonne Débutaniseur 3200-CB-02, le condenseur 3200-HC-02 et l'accumulateur de reflux 3200-VL-02. Ces documents techniques permettent d'identifier avec précision les éléments concernés par le scénario (vannes d'isolement, instrumentation, lignes de purge, équipements associés) et servent de base à l'estimation de l'inventaire de volume, des conditions opératoires ainsi que des points potentiels de perte de confinement.

(CONFIDENTIEL)

Annexe E : Compte de parties

Cette annexe présente les résultats détaillés du comptage des composants présents dans la section isolable ISO-35-G, tels qu'identifiés sur les schémas P&ID annotés du projet RKF 2.0 dans l'annexe D.

Chaque type de composant est recensé en vue de l'évaluation des fréquences de fuite, étape indispensable dans le cadre de l'analyse QRA.

> <	Equipement Item	Category	NO. Of Items / Length of Pipework(m)	Total
1	Flanges	3/4"		
		2"	2+2	4
		6"	1+2+2+2+	7
		8"	1+2+2	5
		10"	2+2+	4
		24"	2+1+1+1+2	7
2	Actuated control valve	3/4"		
		1/2"	1	1
		2"	1	1
		6"		
		10"	1	1
3	Manual Block & bleed Valve	3/4"	4+2+3+2+1	12
		2"	2+1+1+2+2	8
		6"	1+2	3
		10"	2+	2
4	NC valves	3/4"		
		2"	1+2+1+1+1	6
		3"	1	1
		6"	1	1
		8"	1	1
		10"		
5	Pressure safety valve	6"	2	
6	Actuated SDV	3/4"		
		2"		
		6"	1	1
		8"	1	1
		10"		
7	Actuated BDV	3/4"		
		2"		
		8"	2	2
		10"		
8	Pressure vessel (Vertical)	Distillation column (debutaniser)	1	1
	Pressure vessel (Horizontal)	column reflux accumulator	1	1
		Column Condenser	1	1
9	Instruments		1+12+3+2+3+7	28

Annexe F : Fréquences de fuites

Cette annexe présente les valeurs de fréquence de perte de confinement utilisées dans le cadre de la QRA, en fonction des types de composants identifiés dans la section isolable ISO-35-G.

> <	Equipment Item	Category	IOGP 434-01 (2019) Leak frequency (per year)					OREDA(2015) Leak frequency (per year)						CCPS 1989 Leak frequency (per year)				
			1 to 3	3 to 10	10 to 50	50 to 150	>150 ---	1 to 3	3 to 10	10 to 50	50 to 150	>150 ---		1 to 3	3 to 10	10 to 50	50 to 150	>150 ---
1	Flanges	2"	4.4E-06	2.0E-06	9.1E-07	3.8E-07	0	1.70E-06	1.70E-06	1.70E-06	1.70E-06	0		5,00E-06	5,00E-06	5,00E-06	5,00E-06	0,00E+00
		6"	7.0E-06	3.1E-06	1.4E-06	3.2E-07	5.7E-07	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05		2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
		8"	1.00E-05	4.05E-06	1.65E-06	3.5E-07	9.35E-07	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05		2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
		10"	1.15E-05	4.75E-06	1.80E-06	3.6E-07	1.10E-06	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05		2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
		24"	2.1E-05	6.9E-06	2.2E-06	3.3E-07	2.2E-06	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05	1.26E-05		5,00E-07	5,00E-07	5,00E-07	5,00E-07	5,00E-07
2	Actuated control valve	1/2"	1.4E-04	5.8E-05	2.3E-05	0	0	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	0	0		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	0,00E+00	0,00E+00
		2"	1.4E-04	5.8E-05	2.3E-05	7.3E-06	0	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	0		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	0,00E+00
		10"	7.63E-05	3.57E-05	1.65E-05	3.77E-06	3.23E-06	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
3	Manual Block & bleed Valve	3/4"	1.5E-05	8.0E-06	4.6E-06	0	0	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	0	0		5,00E-06	5,00E-06	5,00E-06	0,00E+00	0,00E+00
		2"	1.5E-05	8.0E-06	4.6E-06	2.7E-06	0	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	0		5,00E-06	5,00E-06	5,00E-06	5,00E-06	0,00E+00
		6"	1.7E-05	8.0E-06	3.8E-06	9.1E-07	7.2E-07	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6		2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
		10"	2.5E-05	1.3E-05	6.9E-06	1.8E-06	1.8E-06	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6	3.12E-6		2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06	2,00E-06
4	NC valve	2"	1.4E-04	5.8E-05	2.3E-05	7.3E-06	0	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	0		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	0,00E+00
		3"	1.1E-04	4.7E-05	2.0E-05	5.8E-05	0	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	0		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	0,00E+00

		6"	7.9E-05	3.7E-05	1.8E-05	4.3E-06	3.6E-06		9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
		8"	7.7E-05	3.5E-05	1.65E-05	3.8E-05	2.9E-06		9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5	9.0E-5		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
5	Pressure safety valve	6"	7.9E-05	3.7E-05	1.8E-05	4.3E-06	3.6E-06		1.9E-04	1.9E-04	1.9E-04	1.9E-04	1.9E-04		1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4	1,0E-4
6	Actuated SDV	6"	7.9E-05	3.7E-05	1.8E-05	4.3E-06	3.6E-06		1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
		8"	7.7E-05	3.5E-05	1.65E-05	3.8E-05	2.9E-06		1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05	1.9E-05		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
7	Actuated BDV	8"	7.7E-05	3.5E-05	1.65E-05	3.8E-05	2.9E-06		2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06		3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04	3,00E-04
8	Pressure vessel (Vertical + Horizontal)	Inlets 50 to 150 mm diameter	3.3E-04	1.7E-04	9.3E-05	4.9E-05	0		1.58E-5	1.58E-5	1.58E-5	1.58E-5	0		6,36E-02	6,36E-02	6,36E-02	6,36E-02	0,00E+00
	Pressure vessel (Vertical + Horizontal)	Inlets >150 mm diameter	3.3E-04	1.7E-04	9.3E-05	2.5E-05	2.4E-05		1.58E-5	1.58E-5	1.58E-5	1.58E-5	1.58E-5		6,36E-02	6,36E-02	6,36E-02	6,36E-02	6,36E-02
9	Instruments	2" DIA (50 mm)	1.2E-04	5.0E-05	2.0E-05	6.6E-06	0		1.79E-6	1.79E-6	1.79E-6	1.79E-6	0						
Total			6.74E-03	2.95E-03	1.30E-03	2.11E-03	9.00E-05		1.27E-03	1.27E-03	1.27E-03	1.24E-03	1.24E-03		1.94E-01	1.94E-01	1.94E-01	1.94E-01	1.30E-01
			1.32E-02						6.29E-03						9.07E-01				

Annexe G : Business Model Canvas de Proba QRA

Cette annexe présente le Business Model Canvas développé autour de l'outil Proba QRA, conçu pour faciliter l'analyse d'incertitude en évaluation quantitative des risques.

Le Business Model Canvas

Réalisé pour :

Réalisé par :

Date :

Version :

Partenaires Clés	Activités Clés	Propositions de Valeur	Relations avec les Clients	Segments de Clientèle
Universités et laboratoires spécialisés en QHSE et sécurité industrielle Validation scientifique des modèles probabilistes Veille technologique et méthodologique Bureaux d'études QHSE pilotes Retour d'expérience terrain Tests de l'interface sur des cas industriels réels Développeurs VBA / ingénieurs informatiques Optimisation du code VBA Amélioration de l'ergonomie et des performances Plateformes de distribution d'outils QHSE Hébergement et diffusion de l'interface Gestion des licences et support Réseaux professionnels et associations HSE Promotion ciblée de l'outil Collecte de feedback utilisateurs	Pour notre proposition de valeur : – Développement et maintenance du code VBA de l'interface (Production) – Traduction des modèles MATLAB en modules Excel automatisés (Production) – Intégration des simulations Monte Carlo (Production) – Mise à jour régulière selon les normes QRA ou les retours utilisateurs (Résolution de problèmes) Pour nos canaux de distribution : – Démarchage commercial auprès des bureaux d'études (Résolution de problèmes) – Animation de démonstrations en ligne et salons spécialisés (Production) – Publication de tutoriels et vidéos sur LinkedIn ou YouTube (Plateforme / Réseau) Pour notre relation client : – Rédaction de guides d'utilisation et de supports pédagogiques (Production) – Organisation de sessions de formation (Plateforme / Réseau) – Mise en place d'un support technique (Résolution de problèmes) Pour nos sources de revenus : – Gestion des licences (freemium, PRO) et abonnements (Production) – Personnalisation de l'interface sur demande (Résolution de problèmes) – Suivi des prospects et relances commerciales (Plateforme / Réseau) Ressources Clés Ressources clés – Interface Proba QRA Ressources humaines : - Un développeur spécialisé en VBA/Excel pour la conception, l'optimisation et la maintenance de l'interface - Un ingénieur expert en QHSE et QRA pour valider les modèles scientifiques et assurer la conformité aux normes - Un formateur pour accompagner les utilisateurs et assurer les formations clients Ressources intellectuelles : - Scripts MATLAB reconvertis en VBA (propriété intellectuelle interne) - Bibliothèque de modèles de risques (dispersion, VCE, LSIR, IRPA, PLL...) - Documentation technique (guide utilisateur, tutos vidéo, cas d'étude) - Identité visuelle de l'interface (nom, structure, boutons, navigation) Ressources physiques : - Poste informatique avec environnement Microsoft Excel/VBA - Logiciels complémentaires pour le développement, la documentation, la présentation (Word, PowerPoint, outils de capture d'écran...) Ressources financières : - Fonds de démarrage pour le développement initial et les tests - Budget pour la communication, la participation aux salons, et les activités commerciales (démarchage, publicité) - Eventuels investissements pour l'hébergement en ligne si l'interface est distribuée via une plateforme web	Permet l'analyse de risques selon une approche probabiliste, plus réaliste que la méthode déterministe (Réduction de risques) – Intégration directe dans Excel avec automatisation complète via VBA (Accessibilité, Confort / Utilité) – Exécution des calculs Monte Carlo sans connaissance en programmation (Accessibilité) – Simulation de débits, dispersion, VCE, LSIR, IRPA et PLL en quelques clics (Performance) – Design intuitif avec boutons de commande, feuilles dédiées et navigation simplifiée (Design, Confort) – Possibilité d'adapter l'interface aux besoins spécifiques des clients (Personnalisation) – Elimination du besoin d'outils externes comme MATLAB (Réduction de coûts) – Approche pédagogique : livrée avec guide d'utilisation, tutoriels et exemples (Confort / Utilité) – Valorisation de l'expertise QHSE et amélioration de la prise de décision en sécurité industrielle ("Mission à accomplir") – Image professionnelle et innovante auprès des partenaires et autorités (Marque / Notoriété)	Relations avec les Clients – Assistance personnalisée : - Accompagnement par e-mail ou visio pour les premiers utilisateurs (mise en place, explications fonctionnelles) - Possibilité de séances de formation en ligne ou en présentiel - Réponse personnalisée en cas de bug ou de demande d'adaptation – Libre-service : - Fourniture d'un manuel d'utilisation clair et illustré - Tutoriels vidéo ou PDF accessibles gratuitement - FAQ intégrée ou fournie en annexe – Services automatisés : - L'interface fonctionne de manière autonome via des boutons et des modules VBA intégrés - Les calculs sont lancés sans intervention complexe de l'utilisateur – Communauté (à envisager à terme) : - Création d'un espace LinkedIn ou forum pour échanger sur les mises à jour, retours d'expérience et améliorations – Coûts : - Faibles en phase initiale (support assuré par le développeur/porteur du projet) - Augmentent si mise en place de formation certifiée ou support dédié à grande échelle – Intégration au modèle économique : - La relation client fait partie intégrante de l'expérience utilisateur - Elle permet de justifier le modèle payant (licence Pro) et d'assurer la satisfaction et la fidélisation - Les services associés (support, formation) peuvent devenir une source de revenus complémentaire Canaux de Distribution – Quels sont les canaux préférés de nos clients ? - Plateformes bureautiques accessibles (comme Excel) - Accès direct à des outils via téléchargement ou cloud - Formations pratiques accompagnées de supports numériques – Quels canaux utilisons-nous actuellement ? - Démarchage ciblé auprès de bureaux d'études et experts QHSE - Démonstrations en ligne (vidéos explicatives, ateliers web) - Présence sur LinkedIn et autres réseaux professionnels spécialisés – Nos canaux sont-ils intégrés ? - Oui : le canal de diffusion (Excel) est relié à la documentation, au support technique et à la formation - L'interface Excel est livrée avec des boutons d'exécution et un guide utilisateur intégré – Quels canaux donnent les meilleurs résultats ? - Démonstrations directes (présentations ciblées) - Formations intégrées avec exemples concrets issus d'études réelles – Quels canaux sont les plus rentables ? - Partage via réseau professionnel et bouche-à-oreille dans les communautés HSE - Distribution en ligne via plateforme dédiée (fichier + support) – Comment allons-nous les intégrer avec les routines des clients ? - En intégrant les boutons de simulation dans l'interface Excel que les ingénieurs utilisent déjà - En fournissant des fichiers préconfigurés adaptés aux types d'équipements étudiés - En proposant des formations et tutoriels pour un usage fluide dans les tâches quotidiennes	- Pour qui créons-nous de la valeur ? • Pour les professionnels en charge de l'analyse des risques industriels dans des contextes où l'incertitude a un impact critique. – Qui sont nos clients principaux ? - Bureaux d'études spécialisés en QHSE et en Gestion des Risques Industriels (GRI) - Consultants indépendants en sécurité industrielle - Ingénieurs HSE dans les industries pétrolières, gazières, chimiques ou manufacturières - Formateurs et centres académiques dans le domaine de la sécurité industrielle – Type de marché visé : - Marché de niche : ciblage précis des professionnels du risque industriel et de la QRA - Marchés segmentés : adaptation possible de l'outil aux profils académiques (étudiants, enseignants) ou aux structures de conseil privées - Plate-forme mono-face à potentiel évolutif : actuellement un outil direct, mais possibilité future de plateforme collaborative ou interconnectée avec d'autres outils de gestion des risques
Structure des Coûts	Sources de Revenues			
– Quels sont les coûts les plus importants inhérents à notre modèle économique ? • Développement initial de l'interface Excel (codage VBA + validation des modules) • Mise à jour continue des algorithmes pour intégrer de nouveaux scénarios QRA • Communication et marketing (création de supports, diffusion sur réseaux pro, participation à des salons) • Support technique (assistance aux utilisateurs, correction de bugs, adaptation personnalisée) – Quelles sont les ressources clés les plus coûteuses ? • Ressources humaines : - Développeur VBA/Excel expérimenté – Expert en QRA/QHSE pour validation scientifique des modèles • Ressources immatérielles : - Transposition des algorithmes MATLAB en VBA - Acquisition ou construction de bases de données (fréquences de fuite, toxicité, vulnérabilité humaine, etc.) – Quelles sont les activités clés les plus coûteuses ? • Développement des modules de simulation Monte Carlo (dispersion, VCE, LSIR...) • Tests et validation sur des scénarios réels pour garantir la robustesse des résultats • Personnalisation pour les entreprises partenaires (ex : ajout d'un module BLEVE ou toxicité)	– Pour quelle valeur ajoutée nos clients sont-ils prêts à payer ? • Pour une interface fiable, automatisée, facile à utiliser et conforme aux pratiques industrielles • Pour éviter l'usage de logiciels complexes comme MATLAB, tout en gardant la rigueur scientifique • Pour des résultats rapides, reproductibles, et directement exploitables dans les rapports QHSE • Pour la possibilité de personnaliser l'outil aux besoins spécifiques (ajout de modules, adaptation de seuils, etc.) Pour quelle offre payent-ils actuellement ? • Accès à la version complète de l'interface (Proba QRA – version PRO) • Formations initiales ou avancées à l'utilisation de l'interface • Personnalisation ou développement de modules spécifiques (toxicité, BLEVE...) Comment payent-ils ? • Paiement par licence annuelle (modèle SaaS) • Paiement à la prestation pour les formations ou les développements spécifiques Comment préféreraient-ils payer ? • Offres flexibles selon leur profil : – Formule étudiants/indépendants (abonnement mensuel ou licence académique)			

• Formation des utilisateurs (en ligne ou en présentiel) – Modèle économique privilégié : • Axé sur la valeur : – L'objectif est de proposer une solution à haute valeur ajoutée (analyse probabiliste automatisée, résultats fiables directement exploitables) – Le prix de vente reflète la qualité technique, la rigueur méthodologique et l'automatisation intégrée • Automatisation poussée permet cependant une limitation des coûts récurrents une fois l'interface stabilisée	– Formule entreprise (licence annuelle avec mises à jour et support) • Paiement sécurisé en ligne (carte, virement, plateforme de paiement) – Quelle est la contribution de chaque flux de revenus à l'ensemble des revenus ? • Flux principal : licence annuelle de l'interface (70 %) • Flux secondaire : formations et prestations personnalisées (25 %) • Flux mineur : licence académique à tarif réduit (5 %) Types de tarification proposés : Prix fixes : • Prix listé pour la version PRO de l'interface • Formule de formation standard (pack 3h ou 6h) Prix variables : • Tarification personnalisée selon le degré de personnalisation demandé • Formule abonnement mensuel (freelancers ou étudiants) • Réductions éventuelles selon le nombre d'utilisateurs (entreprises multi-sites)
--	---

