



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

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

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Sécurité Industrielle et Environnement**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Hygiène et Sécurité Industrielle

**Spécialité :** Sécurité Prévention et Intervention

### **Thème**

**Analyse, évaluation et optimisation des performances de  
système de détection Feu & Gaz d'une section de stockage à  
l'aide d'Add et PHAST**

Présenté et soutenu publiquement par :

**MEHOUENE Karim**

Devant le jury composé de :

| <b>Nom et Prénom</b> | <b>Grade</b> | <b>Etablissement</b>     | <b>Qualité</b>      |
|----------------------|--------------|--------------------------|---------------------|
| Mr. MECHKEN          | MAA          | Université d'Oran2 /IMSI | <b>Président</b>    |
| Mr. HABBAR           | Professeur   | Université d'Oran2 /IMSI | <b>Examineur</b>    |
| Mr. MANSOUR          | MAA          | Université d'Oran2 /IMSI | <b>Encadreur</b>    |
| Mr. BENOMAR          | MAA          | Université d'Oran2 /IMSI | <b>CO-Encadreur</b> |

**Année 2020/2021**

## REMERCIEMENT

*Avant tout, je tiens à remercier **Dieu Allah** le tout puissant de m'avoir accordé la chance en m'ayant évité le trépas, et de m'avoir permis d'achever cet humble travail malgré les péripéties.*

*Tout d'abord, je remercie **mes deux parents** pour la fierté qu'ils éprouvent à mon égard ainsi que pour leur amour indescriptible, je n'oublierai pas aussi les gens qui m'ont soutenu de près ou de loin lors de la période difficile à laquelle j'ai dû faire face dernièrement.*

*Ce travail ne serait pas aussi riche sans l'aide et l'encadrement de **Mme MANSOUR & Mme BENOMAR**. On les remercie pour la qualité de leurs encadrement exceptionnel, pour leurs patiences, leurs rigueurs et leurs disponibilités durant notre préparation de ce mémoire.*

*Je remercie mon encadreur **Mme MANSOUR** pour sa bienveillance, et j'en profite pour faire éloge de son humilité, sa simplicité, son bon-vivant ainsi que sa grande compétence, et d'avoir cru en moi et en le thème que j'ai proposé.*

*Merci également et avec ferveur **toute la famille enseignante et administratrice de l'IMSI** pour les beaux moments et les bons souvenirs qu'ils m'ont laissé tout au long de cette formation.*

*Nos remerciements s'adressent également à **tous les professeurs de l'IMSI** pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire.*

*Je remercie de même **mes tuteurs** sur le site industriel GP2/Z, pour ses précieux conseils et lui souhaite une carrière prospère.*

*Et enfin, à ma collègue en qui j'ai trouvé une des meilleurs amis et avec qui j'ai eu le plaisir de travailler. Merci « **SENOUCI ILHEM** » pour +ton soutien, ta présence, et ta gentillesse.*

## DEDICACE

*Puisse dieu vous donne santé, courage et surtout réussite.*

*On remercie **Allah** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

### *A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes coté à toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

### *A mon très cher père*

*Merci d'être toujours là pour me soutenir et m'encourager. Que ce modeste travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*Hommage à **mes grands-parents** qui nous ont quittés.*

### *A mes très chers frères*

*A ma sœur **Hanaa** pour son soutien indéfectible durant les moments les plus durs. Sans oublier ma chère petite sœur **Mouna** et mon petit frère **Rafik** qui je les aime à la folie*

### *A mes chers amis*

*A **Kader, Abderezak, Zaki, Nabil, Bilal** et toute mes amis qui ont souri de mon succès et m'ont soutenu dans les moments les plus lourds.*

*A ma chère amie **Ilhem** qui est toujours prête à faire tout ce qui est en son pouvoir pour m'aider tout au long de ce cheminement universitaire jusqu'à ce jour, son altruisme, son amour et sa gentillesse ne seront jamais oubliés.*

*A toute personne m'ayant soutenu de près ou de loin durant mes moments de faiblesse,*

*A tous mes détracteurs, aux jaloux et antagonistes qui m'ont souhaité l'échec et la défaite, or ils n'ont fait qu'attiser le feu de ma détermination.*

## LISTE DES ABREVIATIONS

- **GPL** : GAZ DU PETROLE LIQUEFIE.
- **C.J.B**: CONSTRUCTOR JOHN BROWN.
- **IHI**: ISHIKAWAJIMA HARIMA HEAVY INDUSTRIES
- **C3H8**: GAZ DU PROPANE.
- **C4H10**: GAZ DU BUTANE.
- **RTO** : RESEAU TRANSPORT DE L'OUEST.
- **PPM**: PARTICULE PAR MILLION.
- **ASTM**: L'AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATÉRIELS.
- **PLC**: PROGRAMMABLES LOGIC CONTROLLER.
- **PHAST**: (PROCESS HAZARD ANALYSIS SOFTWARE TOOL)
- **CFD**: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS
- **FLACS**: FLAME ACCELERATOR SIMULATOR
- **RBI**: RISK BASED INSPECTION
- **IEC**: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
- **ISA**: INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION
- **APSAD** : ASSEMBLEE PLENIERE DES SOCIETES D'ASSURANCES DOMMAGES
- **ATEX**: ATMOSPHERE EXPLOSIBLE
- **TR**: TECHNICAL REPORT
- **MZ**: MONITORED ZONE
- **PDF**: PROBABILITÉ OF FAILURE ON DEMAND
- **LOPA**: LAYER OF PROTECTION ANALYSIS
- **AICHE**: AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING
- **SIL**: SAFETY INTEGRITY LEVEL
- **SIS**: SAFETY INSTRUMENTED SYSTEM
- **SIF**: SAFETY INSTRUMENTED FUNCTION

## RESUME

L'Analyse quantitative des risque liée au section de stockage (fuites, et perte de confinement) & L'évaluation des performances du système de détection automatique feu et gaz (F&Gs) de lasection de stockage 61 du complexe GP2/Z est le thème pour lequel nous avons opté dans le contexte de l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude de professionnalisation en HSE, ceci pour le simple fait qu'on ait jugé pertinent d'accorder la primauté à l'application les connaissances techniques inhérentes au domaine de l'engineering acquises durant la formation de spécialisation au niveau de l'IMSI.

L'initiation d'un projet de revamping du système de détection automatique F&G mettant en cause la totalité de l'unité GP2/Z constitue la raison principale justifiant le choix de ce thème, en effet la phase d'étude du projet est prévue pour le premier trimestre de l'année 2021 ce qui signifie que la phase de rédaction du cahier de charge n'est pas encore amorcée.

Notre orientation vers ce thème est ainsi motivée par la volonté d'apporter une valeur ajoutée à l'élaboration du volet technique relatif au cahier de charges afférent au projet. Cette contribution s'illustrera par l'optimisation des configurations de l'implantation géographique et du nombre de détecteurs F&G tout en soulignant que la justification de ce choix sera axée sur les différents écarts d'ordre technique et managérial soulevés en s'appuyant sur des références normatives et standards spécifiques à la performance des systèmes instrumentés desécurité notamment les F&Gs pour ce cas de figure.

Le système F&G actuellement implémenté présente en effet pour des raisons d'obsolescence due à l'absence de normes et standards régissant la performance des F&Gs des lacunes résidant dans les philosophies opératoire et d'implantation, nous citerons pour exemple ; l'adoption d'une approche purement qualitative basée sur le zonage ATEX ne mettant pas en cause une quelconque quantification des risques pour l'implantation des détecteurs.

### **Mots Clés :**

F&Gs, AdD, Simulation, section de stockage 61, revamping, cahier de charge, l'optimisation des configurations, implantation géographique, systèmes instrumentés de sécurité, étude de dispersion, fréquences de fuites, données heuristiques, diagnostic des performances,

## **ABSTRACT**

The quantitative analysis of the risks related to the storage section (leaks, and loss of containment) & The performance evaluation of the automatic fire and gas detection system (F & Gs) of the storage section 61 of the GP2 / Z complex is the theme for which we opted in the context of the development of this end of study thesis on professionalization in HSE, this for the simple fact that it was deemed relevant to give primacy to the application of the technical knowledge inherent in the field of engineering acquired during specialization training at IMSI.

The initiation of a revamping project for the F&G automatic detection system involving the entire GP2/Z unit is the main reason justifying the choice of this theme, in fact the study phase of the project is planned for the first quarter of 2021, which means that the specification drafting phase has not yet begun.

Our orientation towards this theme is thus motivated by the desire to bring added value to the development of the technical component relating to the specifications relating to the project. This contribution will be illustrated by the optimization of the configurations of the geographical location and the number of F&G detectors while emphasizing that the justification of this choice will be centered on the various technical and managerial discrepancies raised by relying on normative references and standards specific to the performance of safety instrumented systems, in particular the F&Gs for this case.

The F&G system currently implemented has indeed, for reasons of obsolescence due to the absence of norms and standards governing the performance of F&Gs, shortcomings residing in the operational and implementation philosophies, we will cite for example; the adoption of a purely qualitative approach based on ATEX zoning that does not call into question any quantification of the risks for the installation of detectors.

### **Keywords:**

F&Gs, AdD, simulation, storage section 61, revamping, specifications, optimization of configurations, geographic location, safety instrumented systems, dispersion study, leak frequencies, heuristicdata, performance diagnostics,

## المخلص

موضوع التحليل الكمي للمخاطر المتعلقة بقسم التخزين (التسريبات وفقدان الاحتواء) وتقييم أداء نظام الكشف التلقائي عن الحريق والغاز (F&Gs) لقسم التخزين 61 في مجمع GP2 / Z التي اخترناها في سياق تطوير أطروحة نهاية الدراسة المهنية الخاصة بالصحة والسلامة والبيئة، لحقيقة بسيطة هي أنها اعتبرت ذات صلة بمنح الأولوية لتطبيق المعرفة التقنية المتأصلة في مجال الهندسة المكتسبة. خلال التدريب التخصصي على مستوى IMSI.

إن بدء مشروع تجديد لنظام الكشف التلقائي F&G الذي يتضمن وحدة GP2 / Z بأكملها هو السبب الرئيسي الذي يبرر اختيار هذا الموضوع، في الواقع تم التخطيط لمرحلة دراسة المشروع في الربع الأول من عام 2021، مما يعني أن لم تبدأ بعد مرحلة صياغة المواصفات.

وبالتالي فإن توجهنا نحو هذا الموضوع مدفوع بالرغبة في تحقيق قيمة مضافة لتطوير المكون الفني المتعلق بالمواصفات المتعلقة بالمشروع. سيتم توضيح هذه المساهمة من خلال تحسين تكوينات الموقع الجغرافي وعدد أجهزة الكشف عن F&G مع التأكيد على أن تبرير هذا الاختيار سينتقل على التناقضات الفنية والإدارية المختلفة التي أثرت من خلال الاعتماد على المراجع المعيارية والمعايير الخاصة بأداء أنظمة السلامة المجهزة، ولا سيما F&Gs لهذه الحالة.

إن نظام F&G المطبق حاليًا، لأسباب تتعلق بالتقدم بسبب غياب القواعد والمعايير التي تحكم أداء F&G، وأوجه القصور الكامنة في فلسفات التشغيل والتنفيذ، سوف نذكر على سبيل المثال؛ اعتماد نهج نوعي بحث قائم على تقسيم مناطق ATEX والذي لا يدعو إلى التشكيك في أي تحديد كمي لمخاطر تركيب أجهزة الكشف.

### الكلمات المفتاحية:

قسم التخزين 61 ، التجديد ، المواصفات ، تحسين التكوين ، الموقع الجغرافي ، أنظمة السلامة المجهزة ، F&Gs ، دراسة التشنج ، ترددات التسرب ، البيانات الإرشادية ، تشخيصات الأداء ، AdD ،

# SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

|  |          |
|--|----------|
| Introduction generale.....   | 1        |
| <b>Chapitre I : Description de l'unité GP2/Z et du process de fabrication .....</b>                                  | <b>4</b> |
| I-1. Introduction .....  | 4        |
| I-2. Présentation du complexe GP2/Z.....   | 4        |
| I-2-1. Fiche technique du complexe GP2/Z.....  | 4        |
| I-2-2. Situation géographique du complexe.....   | 5        |
| I-2-3. Historique Du Complexe Gp2/Z.....   | 6        |
| I-2-4. Organisation du complexe GP2/Z.....   | 8        |
| I-3. Description des infrastructures et installations.....   | 8        |
| I-4. Description du procédé de fabrication.....  | 9        |
| 1-4-1. Sections de réception et stockage du GPL .....  | 9        |
| 1-4-2. La Section de déshydratation.....   | 10       |
| 1-4-2-1. Le but de l'opération .....   | 10       |
| 1-4-2-2. Description du principe de fonctionnement de la section de déshydratation de la charge d'alimentation ..... | 11       |
| 1-4-2-3. Description de l'opération de régénération.....   | 12       |
| 1-4-3. La Section séparation .....   | 15       |
| 1-4-4. La section réfrigération.....   | 17       |
| 1-4-4-1. Circuit Propane commercial.....   | 18       |
| 1-4-4-2. Circuit Butane commercial .....   | 18       |
| 1-4-4-3. Circuit propane pur réfrigérant.....  | 18       |
| 1-4-5. Le stockage.....  | 20       |



# SOMMAIRE

|   |           |
|---|-----------|
| 1-5. Les caractéristiques du GPL .....  | 21        |
| I-6. Description du département de sécurité .....                                   | 23        |
| I-6-1. Service surveillance des installations (IS) .....                            | 24        |
| I-6-2. Service intervention (II) .....  | 24        |
| I-6-3. Service de prévention (IP) .....   | 24        |
| <b>Chapitre II : l'évaluation des risques professionnels.....</b>                   | <b>25</b> |
| II-1. Introduction.....   | 25        |
| II-2. Cadre réglementaire .....   | 25        |
| II-3. Notions de base .....   | 26        |
| II-3-1. Généralité.....   | 26        |
| II-3-2. Notion de système.....  | 27        |
| II-4. Principaux risques professionnels.....  | 28        |
| II-5. Principaux étapes d'évaluation du risque .....                                | 29        |
| II-5-1. La phase préparatoire.....  | 30        |
| II-5-2. Identification des dangers ou phénomènes dangereux .....                    | 31        |
| II-5-3 Hiérarchisation des risques .....  | 32        |
| II-5-4 Actions de prévention .....  | 32        |
| II-6. Concept de base sur l'analyse par sûreté de fonctionnement.....               | 33        |
| II-6-1. Définition de la SDF.....   | 33        |
| II-6-2. Composants de la SdF .....  | 34        |
| II-6-3. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement.....                               | 36        |
| II-7. Suivi et mise à jour du document.....   | 36        |
| II-8. Documents comportant des informations utiles à l'évaluation des risques ..... | 37        |
| <b>Chapitre III : Généralités sur la sûreté de fonctionnement .....</b>             | <b>38</b> |
| III-1. Introduction .....   | 38        |

# SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| III-2. Historique .....  | 38        |
| III-3. Définition.....   | 38        |
| III-4. Le but de la sûreté de fonctionnement .....                           | 39        |
| III-5. Mesures de la sûreté de fonctionnement.....                           | 39        |
| III-5-1. Fiabilité.....  | 39        |
| III-5-2. Maintenabilité.....   | 42        |
| III-5-3. Disponibilité .....   | 42        |
| III-5-4. Sécurité.....   | 43        |
| III-6. Quelques lois usuelles.....   | 43        |
| III-6-1. Loi exponentielle.....  | 43        |
| III-6-2. La loi de Weibull .....   | 45        |
| III-6-3. Loi Gamma.....  | 46        |
| III-6-4. La Loi Normale .....  | 48        |
| III-6-5. Loi Log-Normale.....  | 50        |
| III-7. Conclusion .....  | 52        |
| <b>Chapitre IV : Terminologie relative à la sécurité fonctionnelle .....</b> | <b>53</b> |
| IV-1. Introduction .....   | 53        |
| IV-2. Termes et définitions .....  | 53        |
| IV-2-1. Notion de danger.....  | 53        |
| IV-2-2. Notion de risque .....   | 53        |
| IV-2-3. Sécurité fonctionnelle.....  | 55        |
| IV-2-4. Systèmes E/E/EP relatifs aux applications de sécurité.....           | 55        |
| IV-3. Normes relatives à la sécurité fonctionnelle.....                      | 55        |
| IV-3-1. Norme CEI 61508 et ses normes filles.....                            | 55        |
| IV-3-2. Limites de la norme IEC 61508 .....                                  | 60        |

## SOMMAIRE

|  |           |
|--|-----------|
| IV-3-3. Systèmes instrumentés de sécurité (SIS) .....  | 60        |
| IV-3-3-1. Définition d'un SIS .....  | 60        |
| IV-3-3-2. Intégrité de sécurité.....   | 61        |
| IV-3-3-3. Modes de fonctionnement d'un SIS et mesures cibles de défaillances...              | 62        |
| IV-4. Allocation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL requis) .....                        | 62        |
| IV-4-1. Risque tolérable et principe ALARP.....  | 63        |
| IV-4-2. Méthodes qualitatives.....   | 64        |
| IV-4-2-1. Le graphe de risque conventionnel .....  | 64        |
| IV-4-2-2. Matrice de gravité (matrice de risque, matrice des couches de protection)<br>..... | 65        |
| IV-4-3. Méthodes quantitatives.....  | 66        |
| IV-5. Conclusion.....  | 68        |
| <b>Chapitre V : Traitement des incertitudes dans l'évaluation des risques .....</b>          | <b>69</b> |
| V-1. Introduction.....   | 69        |
| V-2. Terminologie des informations imparfaites .....   | 69        |
| V-2-1. Introduction .....  | 69        |
| V-2-2. Notions d'incertitude .....   | 70        |
| V-2-3. Représentations numériques de connaissances imparfaites.....                          | 72        |
| V-2-4. Niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques .....                  | 72        |
| V-3. Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis ...           | 74        |
| V-3-1. Méthode de Monte Carlo.....   | 74        |
| V-3-1-1. Définition .....  | 74        |
| V-3-1-2. Nombre d'essai de la méthode de Monte Carlo .....                                   | 75        |
| V-3-1-3. Description de la méthode.....  | 75        |
| V-3-2. L'incertitude statistique dans la méthode de Monte Carlo .....                        | 76        |

## SOMMAIRE

|   |            |
|---|------------|
| V-3-3. Analyse de sensibilité .....   | 77         |
| V-3-3.1 Méthodes de criblage ou « screening » .....   | 78         |
| V-3-3-2. Méthodes d'analyse de sensibilité locale .....   | 78         |
| V-3-3-3. L'analyse de sensibilité globale .....   | 78         |
| V-3-3-4. Indices de sensibilité .....   | 79         |
| V-3-3-5. Indicateurs classiques d'analyses de sensibilité .....   | 80         |
| V-3-3-6. Méthodes d'estimation des indices de sensibilité globale .....   | 81         |
| V-3-4. Théorie des sous-ensembles flous (Fuzzy Logic).....  | 82         |
| V-3-5. Théorie des fonctions de croyance (DST) .....  | 83         |
| V-4. Procédure de calcul de la fréquence d'accident via la méthode Nœud Papillon ....   | 84         |
| V-6. Conclusion .....   | 87         |
| <b>Chapitre VI : Calcul des fréquences de fuite.....</b>  | <b>88</b>  |
| VI-1. INTRODUCTION .....  | 88         |
| VI-2. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE.....   | 88         |
| VI-2-1. Segmentation schématique du process de la section .....   | 88         |
| VI-2-2. Identification des paramètres de fonctionnement ainsi que les phases et ratios du fluide spécifiques à chaque section et segment .....                          | 91         |
| VI-2-3. Identification des segments composant la section de stockage 61 .....   | 94         |
| VI-2-4. Identification des isométriques de tuyauterie et vannerie de la section de stockage 61 A/G/E/F, les restrictions, ainsi que leurs dimensions et agencement..... | 98         |
| VI-2-5. Calcul des fréquences de fuite de l'aire de stockage tampon GPL .....   | 104        |
| VI-2-6. Calcul des fréquences de fuite de l'aire de stockage C4 ambiant .....   | 106        |
| VI-2-7. Résultat final du calcul des fréquences de fuites de la section de stockage 61 : .....  | 108        |
| VI-3. Conclusion.....   | 108        |
| <b>Chapitre VII : Application de la nœud papillon sur la section de stockage tampon .....</b>   | <b>109</b> |

# SOMMAIRE

|  |            |
|--|------------|
| VII-1. Introduction .....  | 109        |
| VII-2. Méthodologie .....  | 109        |
| VII-2-1. Construction des noeuds papillon .....                                      | 109        |
| VII-2-2. Quantification de la probabilité .....                                      | 111        |
| VII-2-3. Quantification de la gravité .....  | 113        |
| VII-3. Hiérarchisation des risques - Positionnement dans la matrice GP .....         | 116        |
| VII-4. Arbre de défaillance d'UVCE par logiciel arbre Analyste win2-3-2 .....        | 117        |
| <b>Chapitre VIII : Étude de dispersion des fluides inflammables.....</b>             | <b>122</b> |
| VIII. INTRODUCTION .....   | 122        |
| VIII-1. DEMARCHE OBSERVEE .....  | 122        |
| IV-1-1. MECANISMES PHYSIQUES .....   | 122        |
| IV-1-2. CONDITIONS DE REJET .....  | 123        |
| IV-1-3. REACTIVITE AVEC L'ATMOSPHERE (STABILITE CHIMIQUE) .....                      | 123        |
| IV-1-4. MODE D'EMISSION .....  | 123        |
| IV-1-5. CONDITIONS METEOROLOGIQUES .....   | 124        |
| IV-1-6. ENVIRONNEMENT .....  | 126        |
| IV-2. Modélisation .....   | 129        |
| IV-2-1. Simulation par le modèle Gaussien PHAST .....                                | 129        |
| IV-2-3. Choix des termes sources .....   | 132        |
| Conclusion .....   | 142        |
| VII-1. Introduction .....  | 143        |
| VII-2. Optimisation de la couverture de détection.....                               | 144        |
| VII-3. Optimisation de la couverture de détection de flamme .....                    | 145        |
| VII-4. Optimisation de la couverture de détection de gaz .....                       | 149        |
| VII-5. Optimisation de la fiabilité et sûreté de fonctionnement des détecteurs ..... | 152        |

# SOMMAIRE

|   |     |
|---|-----|
| VII-5-1. Défaillances stochastiques .....                     | 152 |
| VII-5-2. Défaillances générées lors des tests .....           | 153 |
| VII-5-3. Défaillances à caractère indépendant.....            | 153 |
| VII-5.4. Inspection .....                                     | 155 |
| VII-5-5. Test fonctionnel .....                               | 155 |
| VII-5-6. Auto-vérification.....                               | 155 |
| VII-5-7. Auto-vérification des composants électroniques ..... | 156 |
| Conclusion .....  | 157 |
| CONCLUSION GENERALE.....                                      | 158 |
| Bibliographie.....  | 160 |

# REPertoire des Figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Carte d'identification du complexe GP2/Z.....                                      | 4  |
| Figure 2 : Localisation du complexe GP2/Z dans la zone industrielle d'Arzew .....             | 5  |
| Figure 3 : Carte satellitaire de la situation du complexe GP2Z dans la zone industrielle..... | 5  |
| Figure 4 : Organigramme du complexe GP2/Z .....   | 8  |
| Figure 5 : Schéma synoptique du complexe GP2/Z .....  | 9  |
| Figure 6 : Schéma synoptique de la section réception et stockage de charge.....               | 10 |
| Figure 7 : Schéma synoptique de la section déshydratation .....                               | 15 |
| Figure 8 : Schéma synoptique de la section séparation.....                                    | 17 |
| Figure 9 : Schéma synoptique de la section réfrigération.....                                 | 20 |
| Figure 10. Schéma synoptique du procédé de production du complexe GP2Z.....                   | 22 |
| Figure 11 : Organigramme du département de sécurité.....                                      | 23 |
| Figure 12 : Décomposition d'un système mécanique en composants élémentaires .....             | 28 |
| Figure 13 : Schéma des principales étapes d'évaluation du risque.....                         | 29 |
| Figure 14 : Les composantes de la sûreté de fonctionnement [23].....                          | 34 |
| Figure 15 : La fiabilité décroissante avec le temps [22] .....                                | 35 |
| Figure 16 : Métriques de la Sûreté de Fonctionnement .....                                    | 36 |
| Figure 17 : Fonctionnement d'un équipement .....  | 40 |
| Figure 18 : Courbe en baignoire.....  | 41 |
| Figure 19 : Système série.....  | 41 |
| Figure 20 : Système parallèle.....  | 41 |
| Figure 21 : Densité de probabilité.....   | 44 |
| Figure 22 : Fonction de répartition .....   | 44 |
| Figure 23 : Papier de Weibull.....  | 46 |
| Figure 24 : Densité de probabilité.....   | 47 |
| Figure 25 : Fonction de répartition .....   | 48 |
| Figure 26 : Densité normale avec $\sigma$ .....   | 49 |

# REPertoire des Figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 27 : Densité de probabilité $\mu=0$ .....  | 51 |
| Figure 28 : Fonction de répartition $\mu=0$ .....   | 51 |
| Figure 29 : L'espace du risque .....  | 54 |
| Figure 30 : Relation entre les notions de danger et de risque .....   | 54 |
| Figure 31 : CEI 61508 et ses déclinaisons par secteur d'application.....  | 56 |
| Figure 32 : Cycle de vie de sécurité globale [60].....  | 58 |
| Figure 33 : Concept de risque et d'intégrité de sécurité.....   | 59 |
| Figure 34 : Allocation des prescriptions de sécurité aux systèmes de sécurité E/E/PE (SIS), systèmes de sécurité basés sur une autre technologie et dispositifs externes de réduction de risque ..... | 59 |
| Figure 35 : Système instrumenté de sécurité (SIS ou SRS E/E/PE) .....   | 61 |
| Figure 36 : Principe ALARP.....   | 63 |
| Figure 37 : Schéma général du graphe de risque conventionnel .....  | 65 |
| Figure 38 : Exemple de matrice de gravité (principes généraux) .....  | 65 |
| Figure 39 : Concept d'analyse par couches de protection (LOPA).....   | 67 |
| Figure 40 : Niveau de traitements des incertitudes [84]. .....  | 74 |
| Figure 41 : Les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo [107] .....   | 76 |
| Figure 42 : Démarche d'analyse de sensibilité [111] .....   | 77 |
| Figure 43 : Exemple d'un nombre flou .....  | 83 |
| Figure 44 : Intervalle flou trapézoïdal .....   | 83 |
| Figure 45 : Exemple d'un schéma de nœud de papillon [62]. .....   | 85 |
| Figure 46 : Schéma P&ID du raccordement au réseau fuel gas des sphères 6105 Butane .....  | 89 |
| Figure 47 : Schéma P&ID des entrées et sorties de Sphères 6105 Butane .....   | 89 |
| Figure 48 : Schéma P&ID du raccordement au réseau torchère des sphères A/G/E/F 6105.....  | 90 |
| Figure 49 : Schéma P&ID comparatif des Intel des sphères 6105 A/G et E/F .....  | 90 |
| Figure 50 : Segmentation de la section de stockage 61.....  | 94 |
| Figure 51 : Identification des éléments composant le segment d'entrée et sortie des sphères A/G GPL .....   | 95 |
| Figure 52 : Identification des éléments composant le segment d'entrée de charge GPL .....   | 95 |



# REPertoire des Figures

|   |     |
|---|-----|
| Figure 53 : Identification des éléments du segment raccordement commun au réseau FG des sphères A/G/E/F .....           | 95  |
| Figure 55 : Identification des éléments du segment de raccordement au réseau torchère des sphères A/G ..                | 96  |
| Figure 56 : Identification des éléments constituant la tuyauterie de l'entrée et sortie des sphères A/G .....           | 96  |
| Figure 57 : Identification des éléments de la tuyauterie du raccordement au réseau FG des sphères A/G .....             | 96  |
| Figure 58 : Identification des éléments de tuyauterie de l'alimentation en GPL des sphères A/G .....                    | 97  |
| Figure 59 : Identification des éléments de tuyauterie du raccordement au réseau torchère des sphères A/G/E/F .....      | 97  |
| Figure 60 : Identification des éléments de tuyauterie du raccordement FG des sphères F/E .....                          | 97  |
| Figure 61 : Identification des éléments de tuyauterie de l'alimentation en C4 des sphères F/E .....                     | 98  |
| Figure 62 : Isométrie de piping et vannerie du segment de sortie C4 des sphères 6105E/F Butane ambiant .....            | 98  |
| Figure 63 : Isométrie de piping du segment réseau torchère de la section de stockage 61 A/G/E/F .....                   | 99  |
| Figure 64 : Isométrie de piping et vannerie du segment de tête des sphères A/G/F/E .....                                | 99  |
| Figure 65. Isométrie de piping et vannerie du segment de bas de sphères A/G/E/F .....                                   | 100 |
| Figure 66 : Isométrie de piping et vannerie du segment d'entrée de charge GPL de la section de stockage 61 .....        | 100 |
| Figure 67 : Onglet spécifique à la dispersion PHASTv8.0.0 .....   | 108 |
| Figure 68 : Formalisme d'une séquence accidentelle avec la méthode des nœuds papillons [79] .....                       | 110 |
| Figure 69 : Sous-système (fuite de gaz) .....   | 117 |
| Figure 70 : Sous-système (agression externe – sur-remplissage) .....  | 118 |
| Figure 71 : Sous-système (fuit su accessoires – fuite à cause erreur opératoire) .....                                  | 118 |
| Figure 72 : Sous-système (fuite d'un équipement – fuite à cause mécanique) .....  | 119 |
| Figure 73 : Arbre de défaillance de l'événement : perte de confinement .....  | 120 |
| Figure 74 : Onde de papillon : perte de confinement .....   | 121 |
| Figure 75 : Visualisation satellite de la section de stockage 61 du complexe GP2/Z .....                                | 124 |
| Figure 76 : Rose des vents de la région du complexe GP2/Z .....   | 125 |
| Figure 77 : Image satellite démontrant le facteur de réflexion et de rugosité du sol de la section de stockage 61 ..... | 128 |

## REPertoire des figures

|  |     |
|--|-----|
| Figure 78. : Comportement d'un nuage de vapeur en contact avec un obstacle en présence d'un sol non-poreux et rugueux (cas de la section 61) .....   | 128 |
| Figure 79 : Inventorisation des scénarios de danger relatifs au stockage C4 ambiant tel que présenté dans le software DNVGL PHAST v8.0.0 .....   | 131 |
| Figure 80 : Inventorisation des scénarios danger relatifs au stockage tampon GPL ambiant tel que présenté dans le software DNVGL PHAST v8.0.0 .....  | 131 |
| Figure 81 : Comparaison entre les études de dispersion hivernales (à gauche) et estivales (à droite) de la fuite 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambiant. 134 |     |
| Figure 82 : Représentation graphique d'une coupe longitudinale du nuage gazeux issu d'une fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambiant .....              | 134 |
| Figure 83 : Graphique illustrant une coupe transversale d'un nuage gazeux issu d'une fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambiant.....                    | 135 |
| Figure 84 : Localisation des points bas des sphères de stockage par NAVISWORKS Manage v2020.....   | 137 |
| Figure 85 : Représentation 3D de la bride 420/6105/N-3 du raccordement FG de la sphère 6105F C4 ambiant .....  | 138 |
| Figure 86 : Modélisation CFD de la fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambiant.....  | 138 |
| Figure 87 : Schématisation par NVW v2020 de la distance nécessaire à la condensation du panache de C4 de la fuite de la bride 420/6105/N-3 .....   | 140 |
| Figure 88 : Représentation 3D de la vanne YONEKI LCB D3U-7005-PX 3/4" .....  | 140 |
| Figure 89 : Modélisation CFD de la fuite de 13mm de la vanne manuelle YONEKI LCB D3U-7005-PX 4" de la sphère 6105F C4 ambiant .....  | 141 |
| Figure 102 : Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection actualisée de la zone de monitoring C4 ambiant .....  | 146 |
| Figure 103 : Représentation tridimensionnelle de la couverture de détection actualisée de la zone de monitoring C4 ambiant .....   | 146 |
| Figure 104 : Allure comparative actualisée du champ de vision effectif et intrinsèque du détecteur de flamme 1 .....   | 147 |
| Figure 105 : Optimisation de la couverture de détection de flamme de la section de stockage 61 .....   | 148 |
| Figure 106 : Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection de gaz actualisée de la zone de monitoring C4 ambiant .....   | 149 |
| Figure 107. Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection de gaz actualisée de la zone de monitoring GPL tampon .....  | 150 |
| Figure 108. Représentation isométrique de l'implantation générale optimisée des détecteurs de gaz de la section de stockage 61 .....   | 151 |

# REPertoire des Tableaux

|   |     |
|---|-----|
| Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques du GPL.....  | 21  |
| Tableau 2 : Niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) en fonction des mesures cibles de défaillances. ....  | 62  |
| Tableau 3 : Exemple de tableau LOPA .....   | 67  |
| Tableau 4 : Caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques. ....  | 71  |
| Tableau 5 : Bilan de matière de l'entrée GPL des sphères 6105 .....   | 91  |
| Tableau 6 : Bilan de matières de l'entrée/sortie des sphères 6105 C4 .....  | 92  |
| Tableau 7 : Bilan de matières de l'entrée/sortie des sphères 6105 GPL .....   | 92  |
| Tableau 8 : Bilan de matières de l'alimentation en Fuel Gas des sphères 6105 GPL/C4.....  | 93  |
| Tableau 9 : Bilan de matière des soupapes de sécurité RV-6105G/A/E/F.....   | 93  |
| Tableau 10 : Fréquences de fuites des Vannes Manuelles YONEKI WCB.....  | 101 |
| Tableau 11 : Fréquence de fuite de Brides de raccordement KOSO45 .....  | 101 |
| Tableau 12 : Fréquence de fuite du Piping K91618 en acier au carbone .....  | 101 |
| Tableau 13 : Fréquence de fuite des Vannes Pneumatiques Automatisées à clapet sphérique KOSO150.....  | 102 |
| Tableau 14 : Fréquence de fuite des Vannes Manuelles YONEKI LCB .....   | 102 |
| Tableau 15 : Fréquence de fuite des Soupapes de sécurité EMERSON (Relief Valve).....  | 102 |
| Tableau 16 : Fréquence de fuite des soupapes de sécurité ANDERSON GREENWOOD .....   | 102 |
| Tableau 17 : Fréquence de fuite des clapets anti-retour TYCO-GRISS.....   | 103 |
| Tableau 18 : Fréquence de fuite soupape de sécurité CROSBY.....   | 103 |
| Tableau 19 : Légende des événements figurant sur le modèle de nœud papillon .....   | 111 |
| Tableau 20 : Echelle de probabilité .....   | 113 |
| Tableau 21 : Degrés de stabilité Atmosphérique de l'échelle Pasquill .....  | 126 |
| Tableau 22 : Facteurs de correction de modélisation par corrélation des classes de stabilité et rugosité du sol .....   | 127 |
| Tableau 23 : Exemple de données de dispersion générées par le rapport de modélisation d'une fuite de 13mm de la bride 4" 420/6105F/N-3 du raccordement FG de la sphère 6105F C4 ambient ..... | 136 |
| Tableau 24 : Interface des inputs de la modélisation CFD du software INSIGHT NUMERICS IN : FLUX v1.27   | 136 |
| Tableau 25 : Procédure générale d'optimisation des systèmes F&G par ISA TR84.00.07 .....  | 143 |

## INTRODUCTION GENERALE

Le traitement de grandes quantités de gaz liquéfiés, de vapeurs (émises par des liquides volatils) inflammables et/ou toxiques dans les sites industriels engendre des risques particuliers pour les personnes et les biens matériels, en cas de fuites accidentelles.

La mise en forme statistique des données et leur enregistrement dans la base ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) et le CSB (Chemical Safety Board) a montré que les défaillances matérielles, essentiellement dues à une mauvaise maintenance, étaient les principales causes des accidents industriels. Les données de la base ARIA démontrent qu'environ 33% des accidents recensés ont pour causes les défauts matériels, et 11% d'accident ont pour causes les pertes de contrôle de procédé (dérives de paramètres de fonctionnement).

A titre d'exemple nous pouvons citer l'accident de la GLIK de Skikda dont les incidences financières estimées étaient d'environ 900 millions de dollars, entre coûts liés aux pertes de matériels, de produits, à l'arrêt de la production, pertes de client et pénalités de retard.

Ces risques majeurs liés aux activités industrielles sont des événements accidentels se produisant sur un site industriel, aux conséquences immédiates graves pour le personnel, les biens et l'environnement. Les risques majeurs se caractérisent par une faible fréquence mais une extrême gravité faisant qu'ils sont moins bien tolérés par la société que d'autres risques considérés comme plus communs. Du fait de leur faible fréquence, il est par ailleurs très difficile d'estimer les probabilités de ces accidents.

Les accidents industriels ont des effets néfastes, vu dramatiques, d'où on peut enregistrer des décès, la perte et la destruction des moyens de production, atteinte à l'environnement, et des pertes économiques colossales.

Les intérêts d'un haut niveau de sécurité sont nombreux pour notre département HSE : réduire le risque de blessures et de décès, éviter la perte de vies, économiser les coûts directs et indirects dus aux accidents de travail...

Les détecteurs de gaz fixes sont les premiers éléments des systèmes instrumentés de sécurité dans plus de 70 % des sites industriels, les détecteurs de gaz concourent à la maîtrise des risques industriels et à la protection des travailleurs, face aux risques d'inflammation / d'explosion, de toxicité ou de déficience en oxygène lors de la présence de gaz ou de vapeurs dangereux.

En prenant en considération l'importance primordiale de cette catégorie de système instrumenté de sécurité, il est nécessaire de veiller à la bonne conduite de la phase de conception de ce dernier. Un design et un dimensionnement faits en bonne et due forme ne peut se faire qu'en garantissant la fiabilité des résultats obtenus lors des étapes d'engineering.

Les opérateurs du service intervention du département HSE sont des passionnés entraînés pour apporter de l'aide à n'importe quel travailleur au sein du complexe GP2/Z qui en a besoin, quelles que soient les circonstances. Ils interviennent principalement pour des accidents industriels (incendie, explosions, feux...etc), et aussi pour des urgences médicales (secourisme).

Afin de prévenir ces risques, Il est important de détecter les fuites le plus tôt possible en mesurant en continu la concentration des gaz incriminés dans l'atmosphère de la zone à risque. Les détecteurs de gaz, fixes ou portables, sont utilisés dans de nombreuses industries avec des activités variées : chimie, pétrochimie, chimie fine, entretien de réseaux souterrains, transport de gaz & travail en milieu confiné.

# PROBLEMATIQUE

Actuellement, la compagnie SONATRACH fournit des efforts considérables en matière de gestion des risques afin de prévenir les accidents, tout en optant de maîtriser techniquement et économiquement les systèmes de production par l'assurance d'une maintenance appropriée, ce qui nous a amené à se poser une question axée sur les deux préoccupations :

- ❖ La maîtrise des risques industriels
- ❖ L'optimisation de la maintenance et de la fiabilité des systèmes de sécurité.

« Comment réduire et maîtriser les risques majeurs liée aux sections de stockage à partir d'une meilleure planification des tâches de maintenance et une optimisation d'un système instrumenté de sécurité afin de garantir la sécurité industrielle dans les systèmes de production ? ».

La problématique soulevée lors de cette étude est relative à des écarts d'ordre technique décelés via des références normatives inhérentes à l'implémentation d'un système de détection automatique feu et gaz dans le domaine pétrolier, à cet effet nous avons mis en exergue des lacunes en termes d'implantation et de choix de la technologie adéquate des organes de détection par exemple.

Pour faire mon rapport, j'ai choisi de me concentrer sur l'identification ou bien le recensement des différents moyens de lutte contre l'incendie, les statistiques concernant les exercices de simulation par le logiciel PHAST, ainsi que les permis de travail établis par le service intervention.

## PERSPECTIVES ET PLAN DE TRAVAIL

En vue d'aboutir aux résultats souhaités notre plan de travail se scindera en cinq chapitres, pratiques structurés en vases-communicants pour faire en sorte que l'output de l'un constitue l'input d'autre.

Cependant, l'organisation du présent travail est établie comme suit :

### Pour la partie théorique :

- **Premier chapitre** : Pour répondre à cette question, nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la présentation du complexe et la description du procédé de fabrication.
- **Deuxième chapitre** : Dans le deuxième chapitre nous avons débuté par présenter quelques concepts et définitions fondamentaux relatives aux risques et aux différentes formes de la maintenance, et rapporter des notions de base sur les risques et la démarche de prévention.
- **Troisième chapitre** : contiendra des généralités sur la sûreté de fonctionnement et la fiabilité d'un système ;
- **Quatrième chapitre** : au niveau de ce chapitre seront présentés, dans un premier temps, quelques concepts et définitions liés à la démarche d'analyse des risques. Nous évoquerons ensuite l'organisation de la norme CEI 61508 qui constitue, rappelons-le, le document de référence pour la mise en œuvre des SIS. Enfin, nous définirons les méthodes qualitatives et quantitatives d'analyse des risques.
- **Cinquième chapitre** : ce chapitre est d'abord consacré à une étude bibliographique ayant pour objet d'établir un état de l'art relatif aux notions d'incertitudes, ce chapitre est fondé sur trois parties : la première consiste à présenter les notions d'incertitudes

## PROBLEMATIQUE

épistémique et stochastiques et aussi les niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques. Dans la deuxième partie nous présentons les Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis comme Monte Carlo, Fuzzy Logic et DSP. Cependant dans la dernière partie nous expliquons la procédure de calcul de la fréquence d'accident utilisé dans notre mémoire.

### **Pour la partie pratique:**

- ***Le premier chapitre*** : sera dédié au calcul des fréquences de fuites de la section de stockage 61 en prenant en compte trois types de fluides inflammables différents (GPL, C4, Fuel Gas) cecidans le but de diversifier les scénarios dangereux à simuler.
- ***Le deuxième chapitre*** : exploitera les données issues du chapitre précédent pour appliquer une analyse des risques liée aux pertes de confinement par la méthode de nœud papillon.
- ***Le troisième chapitre*** : établir une étude de dispersion et définir le comportement du fluide après rejet dans l'atmosphère viasimulation.
- ***Le quatrième chapitre*** : sera l'aboutissement de ce thème par l'émission de recommandations et suggestions fournies par l'optimisation des aspects traités dans le diagnostic de performances.

**CHAPITRE I : DESCRIPTION DE L'UNITE GP2/Z ET DU PROCESS DE FABRICATION****I-1. INTRODUCTION**

Les hydrocarbures (Gaz, Pétrole) sont les produits énergétiques les plus exploités et consommés à travers le monde, cela même avec le développement d'autres sources d'énergies (charbon, nucléaire, soleil (photovoltaïque), éoliennes...).

Le complexe GP2/Z relève de la Sonatrach, société nationale chargée du transport, du raffinage et de la commercialisation des hydrocarbures, laquelle a été construit par la société anglaise C.J.B (Constructor John Brown) et mis en service en 17 Mars 1973. Il comporte deux trains (semi-modulaires) et un autre nouveau train en arrêt, utilisant le procédé de distillation sous pression pour produire du propane et du butane. Son organisation est basée sur les activités d'approvisionnement énergétique nationales, du développement et de l'exploitation des gisements d'hydrocarbures.

**I-2. PRESENTATION DU COMPLEXE GP2/Z****I-2-1. FICHE TECHNIQUE DU COMPLEXE GP2/Z [1, 3]**

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <b>Localisation</b>                  | : ARZEW   |
| <b>Superficie</b>                    | : 29 hectares   |
| <b>Objectif</b>                      | : 1.8 Millions t/an de GPL  |
| <b>Produit</b>                       | : Propane commercial / Butane commercial  |
| <b>Procédé Utilisé</b>               | : Distillation sous pression  |
| <b>Nombre de Trains</b>              | : 2 trains (semi-modulaires)  |
| <b>Date de mise en production</b>    | : 17/03/1973  |
| <b>Capacité de production totale</b> | : 1.400.000 tonnes par an   |
| <b>Capacité totale de stockage</b>   | :   |
|                                      | ➤ Un bac de 70.000 m <sup>3</sup> pour le butane réfrigéré                            |
|                                      | ➤ Un bac de 70.000 m <sup>3</sup> pour le propane réfrigéré.                          |
|                                      | ➤ Deux sphères de 1220 m <sup>3</sup> chacune, pour le butane ambiant                 |
|                                      | ➤ Deux sphères de 1220 m <sup>3</sup> chacune, pour le GPL                            |
| <b>Source d'approvisionnement</b>    | : Gaz en provenance des champs gaziers et pétroliers de Hassi R'Mel et Hassi Messaoud |

*Figure 1 : Carte d'identification du complexe GP2/Z*

**I-2-2. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU COMPLEXE [1, 3]**

Le complexe se situe à Arzew sur une superficie de 29 hectares, il est implanté sur le plateau de l'ancienne plage « les Ablettes » entre GL4-Z (ex la Camel) au nord/ouest et FERTIAL (Ammoniac) au sud/est. Il est situé à environ 1 Kilomètre de la ville d'Arzew.

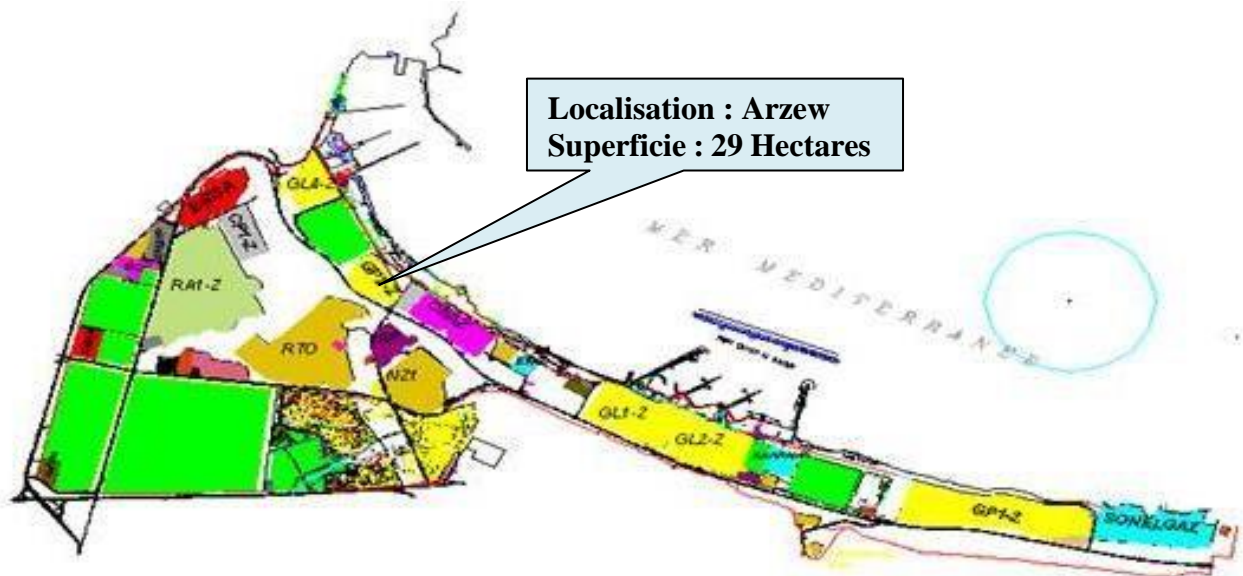


Figure 2 : Localisation du complexe GP2/Z dans la zone industrielle d'Arzew



Figure 3 : Carte satellitaire de la situation du complexe GP2Z dans la zone industrielle



### I-2-3. HISTORIQUE DU COMPLEXE GP2/Z [1, 2, 3]

Le complexe GP2/Z a presque trente (30) ans d'existence. Le projet de construction a été lancé en mille neuf cent soixante-dix (1970) par la compagnie anglaise CJB.

Les dates importantes à retenir sont :

- **1973** : Mise en service du complexe destiné à traiter une charge de 4 millions de tonnes d'un mélange de condensât / GPL.
- **1984** : Arrêt du complexe suite à la mise en service des unités de stabilisation du condensât au niveau des champs de Hassi R'Mel et de Hassi Messaoud.
- **1990** : Redémarrage du complexe après la reconversion de son procédé de rebouillage pour le traitement d'une capacité de 0,6 million de tonne par an.
- **1996** : Extension du complexe pour traiter une capacité de 1,2 million de tonnes de GPL par an. De plus, des travaux de modification ont été réalisés tels que :
  - ✓ La reconversion des deux (02) colonnes de séparation de condensat /GPL en colonnes de dépropanisations ;
  - ✓ La mise en place des rebouilleurs au niveau des colonnes reconverties et adaptation de leurs boucles de régulation ;
  - ✓ La rénovation des aéroréfrigérants et des compresseurs du système boil off ;
  - ✓ La construction d'une nouvelle salle de contrôle et remplacement des instruments de contrôle pneumatique par le système DCS ;
  - ✓ La rénovation des turbines à gaz, des bras de chargement, des compresseurs d'air, des postes électriques HT et MT ;
  - ✓ L'implantation d'une nouvelle unité de déshydratation de la charge.
- **1999** : Extension de la capacité de traitement du complexe pour traiter 1,8 million de tonne par an. Lors de cette extension, plusieurs travaux de modification ont été réalisés comme :
  - ✓ Le remplacement des plateaux des colonnes de séparation de GPL par des plateaux dont le rendement est supérieur ;
  - ✓ L'installation de nouveaux ballons séparateurs et des échangeurs de chaleur de grande capacité au niveau de la zone de réfrigération ;
  - ✓ Le remplacement des pompes de circulation du fluide caloporteur et des pompes de charge de GPL par des pompes de plus grande capacité.
- **2000** : Projet d'extension : la capacité de production devait être portée à 2,5 millions de tonnes. L'étendue du projet d'extension devait se limiter aux réalisations suivantes :
  - ✓ Une unité supplémentaire de séparation de GPL de 160 T/ h ;
  - ✓ L'installation d'une nouvelle unité de réfrigération ;
  - ✓ L'augmentation de la capacité du stockage des produits réfrigéré ;

- ✓ L'extension du réseau électrique basse tension ;
- ✓ L'installation d'un nouveau four de gasoil ;
- ✓ ☐ une nouvelle unité de déshydratation.

Suite à un incident survenu au niveau du mot-compresseur en date du 24/07/2003, il a été décidé IHI/ITOCHU pour la sécurisation et la fiabilisation du complexe. Ce prestataire a procédé aux modifications suivantes :

**Au niveau de la section de stockage de la charge GPL :**

- ✓ Montage d'une nouvelle sphère de stockage tampon 420/6105G.
- ✓ Installation de nouvelles vannes XV au niveau de déshydratation de la charge GPL pour la séquence de régénération.

**Au niveau de la section séparation :**

- ✓ Installation de nouvelles vannes de refoulement des motopompes GPL.
- ✓ Calorifugeage de la partie supérieure des deux splitter A&B.
- ✓ Délocalisation de trois motopompes de la charge GPL.
- ✓ Mise en place de deux nouveaux filtres en aval des sécheurs de la déshydratation du propane commercial.
- ✓ Délocalisation des quatre motopompes de reflux de l'intérieur vers l'extérieur des trains de séparation.

**Au niveau de la section de réfrigération :**

- ✓ Installation de vannes de niveau LV pour réguler le niveau de propane réfrigérant des trois stades BP, MP, et HP.

**Au niveau du système de chauffage d'huile TORADA TC :**

- ✓ Montage de la motopompe 425/6215E d'huile chaude pour alimenter le circuit du fluide caloporteur.
- ✓ Montage d'un nouveau four 401/6201D pour huile TORADA TC.

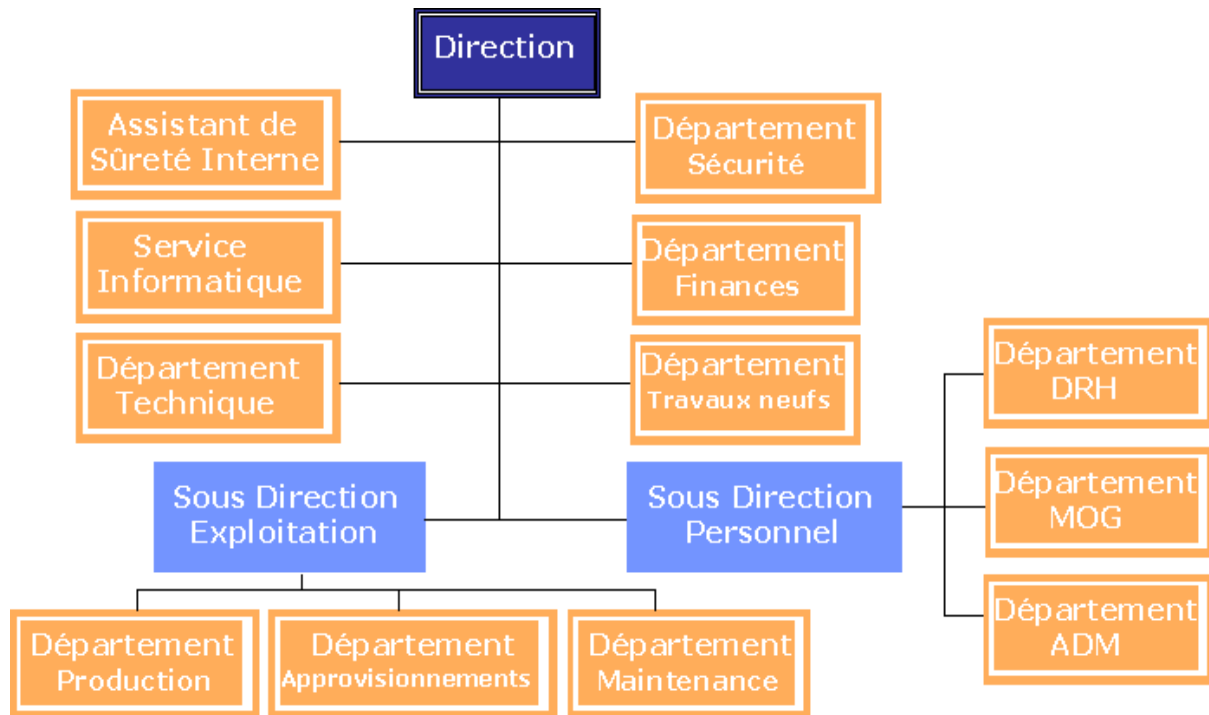
**I-2-4. ORGANISATION DU COMPLEXE GP2/Z [2]**

Figure 4 : Organigramme du complexe GP2/Z

**I-3. DESCRIPTION DES INFRASTRUCTURES ET INSTALLATIONS [1, 4, 5]**

Le complexe sépare le GPL provenant des champs sud, pour obtenir du Butane et du Propane par une distillation sous pression. Ce procédé est assuré par deux trains semi-modulaires comprenant :

- Une section déshydratation commune
- Une section séparation
- Une section réfrigération commune
- Une section d'huile chaude commune
- Une section d'air instrument commune
- Une zone BOG

Le contrôle et la surveillance du procédé sont assurés par une salle de contrôle DCS. En ce qui concerne les autres infrastructures on trouve :

- Le bloc administratif principal
- Bloc Technique, Travaux neufs, et ressources humaines
- Bloc Moyen généraux
- Atelier maintenance
- Salle de contrôle sécurité
- Atelier chaudronnerie
- Laboratoire
- CMT
- Réfectoire
- Les bureaux des différents services de sécurité, maintenance, production, etc.

### I-4. DESCRIPTION DU PROCEDE DE FABRICATION [1, 2, 4]

Le procédé comprend trois sections : séparation, réfrigération et stockage (Figure 5) auxquelles il faudra ajouter la boucle du fluide caloporteur.

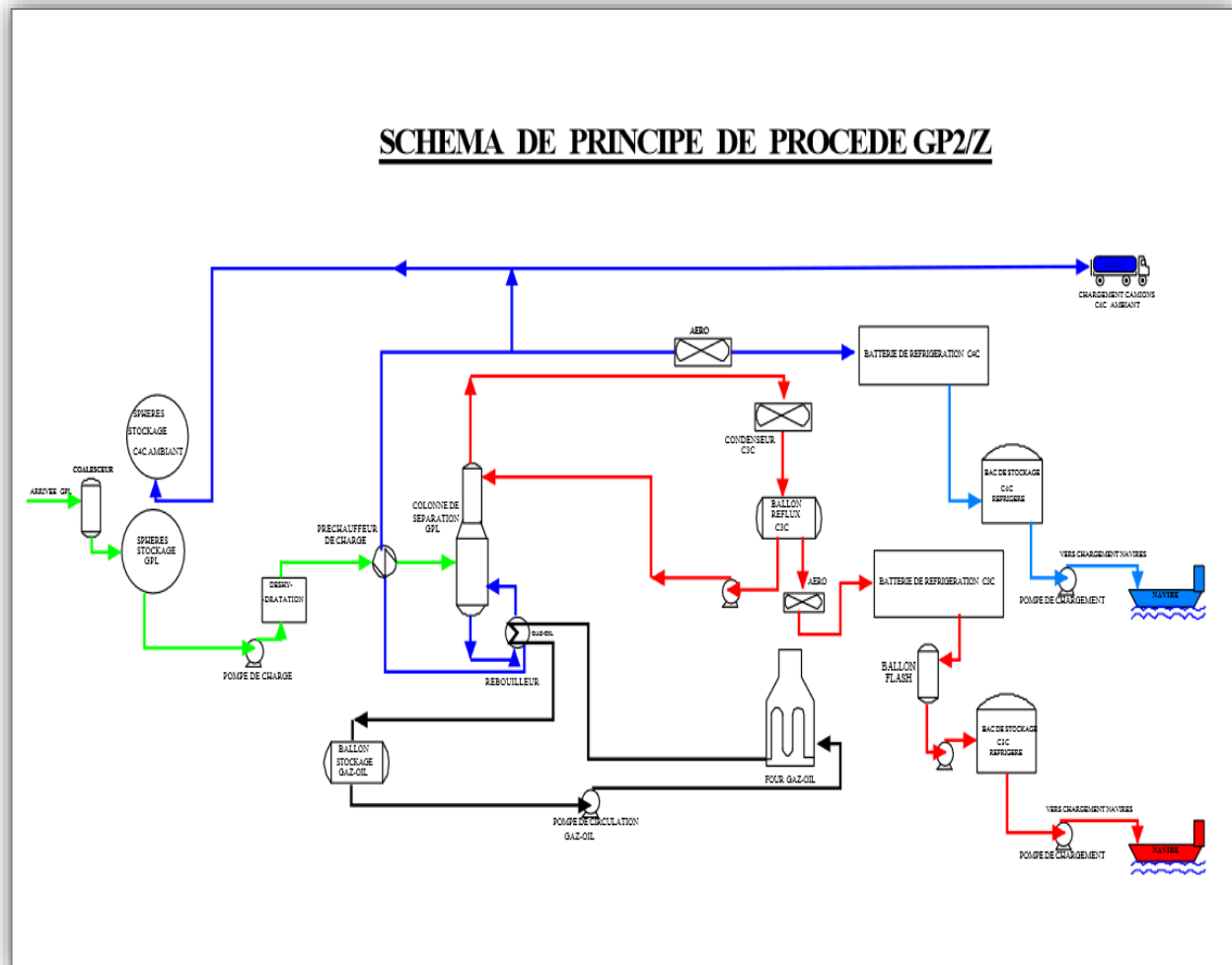


Figure 5 : Schéma synoptique du complexe GP2/Z

#### 1-4-1. SECTIONS DE RECEPTION ET STOCKAGE DU GPL

Le GPL provient du terminal RTO/TRC jusqu'au complexe GP2Z par pipe de 16" de diamètre, à une pression d'environ 20 bars et à la température ambiante.

Une vanne XV-6501 activée par le système ESD (Emergency Shut Down) est installée juste au niveau de l'arrivée du GPL pour assurer la sécurité du complexe.

La charge d'alimentation de GPL peut contenir des impuretés (sable, poussières, corps étrangers ...). Deux filtres (440/6502A/B) sont installés pour enlever ces matières. Dans les conditions normales de fonctionnement l'un des deux filtres est en marche, tandis que l'autre est en arrêt. Le bouchage des éléments filtrant du filtre est détecté par l'indicateur de pression différentielle PDI-6501A/B pour avertir l'exploitant de la nécessité de nettoyage.

La permutation se fait manuellement par deux vannes manuelles, une en amont du filtre et l'autre en aval.

Après l'élimination des corps étrangers lourds, le GPL est susceptible de contenir des gaz non condensables (hydrocarbures légers et gaz inertes). L'élimination de ces gaz se fait par le biais du dégazeur (410/6502) par phénomène de séparation par densité. Les gaz légers sont envoyés vers torche et le GPL continue son chemin pour rejoindre les sphères de stockage. L'élimination de ces gaz est importante tant pour mesurer correctement le débit que pour stabiliser la pression dans les sphères de stockage de GPL.

Le GPL filtré et dégazé, sera ensuite stocké dans deux sphères de 1220 m<sup>3</sup> chacune (420/6105 A/G). Dans les conditions normales de fonctionnement, les deux sphères sont en service simultanément. Dans le cas des travaux d'entretiens, juste une sphère sera en service. La charge de GPL est envoyée à la section déshydratation par les pompes (425/6205 B/C/G). Deux pompes sont en service tandis qu'une sert de réserve.

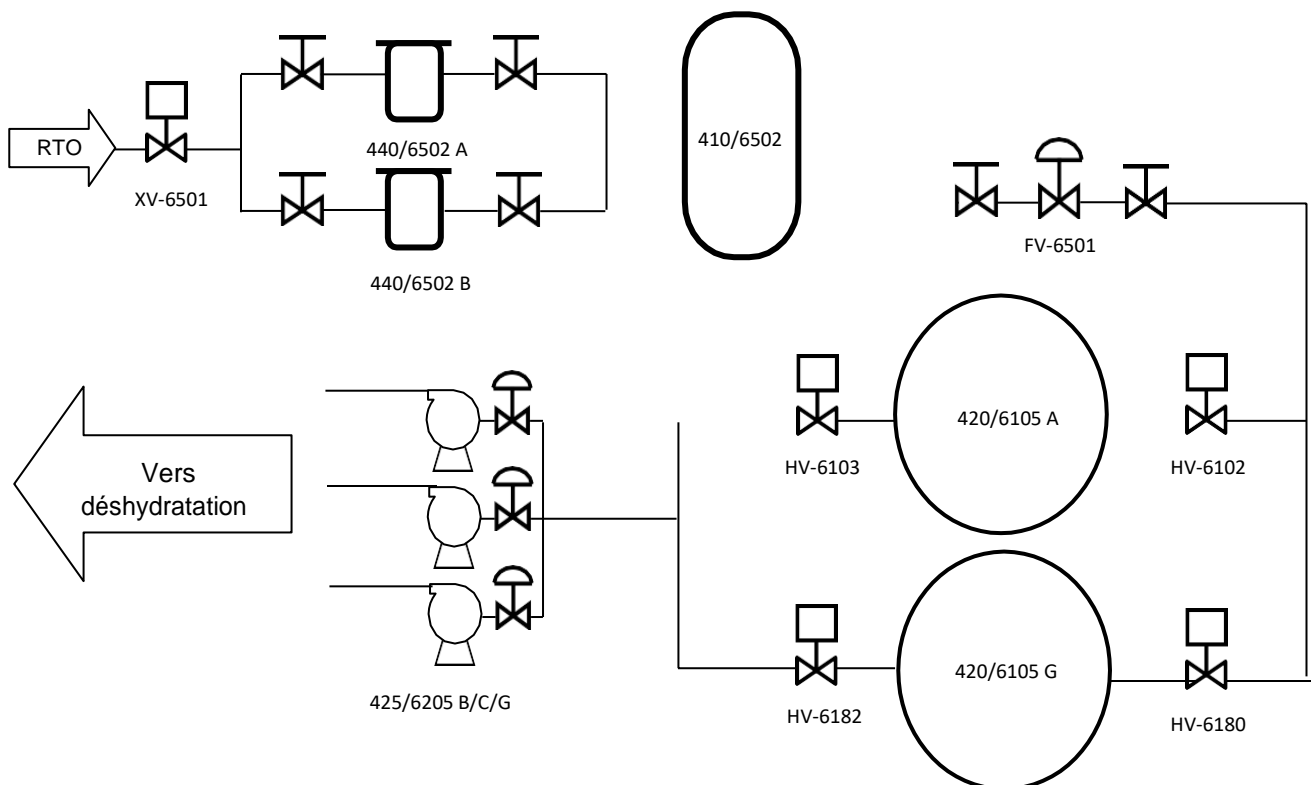


Figure 6 : Schéma synoptique de la section réception et stockage de charge

## 1-4-2. LA SECTION DE DESHYDRATATION

### 1-4-2-1. Le but de l'opération

Cette opération unitaire très importante utilisée en générale dans les traitements des gaz en amont de la partie séparation et réfrigération est considérée comme un pré traitement afin d'éviter :

- Le Risque de solidification dans les procédés cryogéniques.
- Le Risque de corrosion des pipes (surtout en présence de gaz acide)
- Le Risque de formation des hydrates

- L'écoulement biphasique et augmentation de la perte de charge.
- La Diminution du pouvoir calorifique du gaz

#### **1-4-2-2. Description du principe de fonctionnement de la section de déshydratation de la charge d'alimentation**

L'unité est constituée des équipements suivants :

##### **❖ Un coalesceur 440/6203**

Le principe de fonctionnement du coalesceur 440/6203 est comme suit :

C'est un séparateur à 4 cartouches de fibres de 120'' chacun séparant les gouttelettes d'eau dont la taille est supérieure à 10 micromètres. Ces gouttelettes d'eau se joignent et se forment à plus grandes gouttelettes dans le filtre coalescent, et elles sont séparées par gravitation.

La séparation est généralement réalisée par les éléments filtrants à 3 étapes par émulsion à 2 phases immiscibles : (collection, coalescence et séparation par gravité).

L'interface entre l'eau et GPL dans le pot de purge est contrôlée entre le niveau bas LSL702 et le haut niveau LSH703. L'eau séparée est évacuée du pot de purge du coalesceur de la charge au pot d'étanchéité 440/6220. Le débit de décharge est limité par RO701 pour empêcher l'excès de débit.

Le pot d'étanchéité sépare la vapeur dissoute dans l'eau pour dégager la vapeur à l'atmosphère à une hauteur suffisamment élevée, tandis que l'eau est drainée vers égout.

##### **❖ Deux sécheurs 440/6202A/B**

L'adsorbant utilisé pour le séchage est le tamis moléculaire UOP MOLSIV 4A (1/8").

La charge d'alimentation GPL issue du coalesceur passe dans le déshydrateur (sécheur) en cycle d'adsorption et elle s'écoule de haut vers le bas en traversant le lit de tamis moléculaire. A la sortie de ce dernier la teneur en eau dans la charge est inférieure à 1ppm en poids.

##### **❖ Deux filtres 440/6205 A/B**

Après achèvement de l'opération de séchage, la charge GPL passe à travers les filtres 440/6205 A/B pour l'élimination des particules solides provenant du lit de tamis.

Le bouchage des éléments filtrants est détecté par l'indicateur de pression différentielle PDI 704 pour informer l'exploitation de la nécessité de nettoyage.

L'analyseur d'humidité (MRE-700) dont les points de prélèvement sont situés en amont et en aval du coalesceur et en aval du filtre assure la surveillance sur la teneur d'eau dans la charge. Les trois prélèvements sont sectionnés par commande manuelle.

Si l'opération de la Section de déshydratation commence par la séquence d'adsorption, la teneur en eau dans la charge d'alimentation GPL et/ou le produit C3 doit être surveillée soigneusement pour éviter le problème de la formation de givrage et/ou d'hydrates dans le système de basse température.

La charge GPL déshydratée et filtrée est fournie à la section de séparation.

La vanne d'arrêt à commande à distance XV 6201 qui est actionnée par le système ESD est installée avant la section de séparation afin d'isoler la section de déshydratation de la section de séparation.

### 1-4-2-3. Description de l'opération de régénération

La régénération du lit se fait par les étapes suivantes :

|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| <b>Drainage :</b>         | <b>180 min</b>  |
| <b>Dépressurisation :</b> | <b>5 min</b>    |
| <b>Chauffage :</b>        | <b>810 min</b>  |
| <b>Refroidissement :</b>  | <b>540 min</b>  |
| <b>Pressurisation :</b>   | <b>5 min</b>    |
| <b>Remplissage :</b>      | <b>120 min</b>  |
| <b>Stand-by :</b>         | <b>1100 min</b> |
| <b>En attente :</b>       | <b>60 min</b>   |

La description ci-dessous sur le cycle de régénération commence par :

#### a) Commutation de déshydrateurs (sécheurs)

Après que le déshydrateur (A par exemple) ait terminé 48 heures d'adsorption, le déshydrateur est commuté au cycle de régénération, le lit en attente (déshydrateur B) est la première mise en ligne par l'ouverture de la XV708 et XV712 avant que le lit saturé du déshydrateur A soit retiré d'en ligne par fermeture de la XV705 & XV709.

#### b) Drainage

Le drainage du déshydrateur est démarré par l'ouverture des vannes XV-715 et HV-705. La charge d'alimentation de GPL est vidangée sous pression du gaz naturel (1,4 MPaG) introduit du sommet du déshydrateur. Le GPL est alors évacué du déshydrateur (sécheur-A) vers la sphère de stockage de la charge d'alimentation de GPL. Le temps de drainage est approximativement de 3 heures. L'étape de drainage est terminée quand LSL-715 détecte le bas niveau de liquide du déshydrateur A (sécheur-A) et que les vannes XV-715 et HV-705 sont fermées. Le temporisateur pour l'étape de drainage est réglé à 3 heures. Quand le temporisateur expire, alors la séquence de commande passe au mode manuel par l'inter- verrouillage.

#### c) Dépressurisation

Après l'achèvement de drainage, le PIC-703 est activée, et le déshydrateur A (sécheur- A) est dépressurisé à 1,0 MPaG. Le temporisateur pour l'étape de dépressurisation est réglé à 5 minutes. Quand le temporisateur expire, alors la séquence de commande passe au mode manuel par l'inter-verrouillage.

#### d) Chauffage

Après l'achèvement de la dépressurisation, les vannes XV-701 et XV-713 sont ouvertes pour introduire le gaz chaud de régénération dans le lit de tamis moléculaire.

Le PIC-721B monté sur la ligne d'entrée du réchauffeur de gaz de régénération est activé, et contrôle la pression à 1,0 MPaG.

Le TIC 721 est activé, et contrôle la température de gaz de régénération en injectant le gaz ambiant combustible dans le gaz chaud de régénération par le réchauffeur de gaz de régénération.

La température à l'entrée du lit de tamis moléculaire est 280°C.

Le FIC-701, monté sur la ligne de sortie du ballon séparateur de gaz de régénération, augmente graduellement le débit de régénération à 1300 kg/h.

Le refroidisseur à air de gaz de régénération 405/6229 doit être démarré lorsque la température de gaz de régénération à la sortie du lit de tamis moléculaire (TI-701) va au-dessus de 50°C.

Le gaz chaud de régénération qui traverse le lit de tamis moléculaire et qui monte vers le haut, se vaporise et enlève l'eau adsorbée dans le lit. Les indicateurs de température TI-704 à 706 dans le lit de tamis moléculaire surveillent le déroulement de l'étape de chauffage.

Le refroidisseur à air de gaz de régénération (405/6229) refroidit le gaz chaud de régénération venant du lit de tamis moléculaire, et condense l'eau enlevée. Le ballon séparateur de gaz de régénération (410/6214) sépare l'eau et le gaz. Et le gaz est alimenté au système de gaz combustible pour utiliser comme carburant pour le four d'huile chaude (401/6201C/D).

L'eau séparée est vidangée vers le pot d'étanchéité (440/6220) du ballon séparateur de gaz de régénération par les contacts de niveau LSL-708 et LSH-709, et le débit de décharge d'eau est limité par RO-704 pour empêcher le débit excessif.

Le pot d'étanchéité (440/6220) sépare la vapeur dissoute d'hydrocarbure pour la dégager à l'atmosphère au point assez élevé pour la sécurité, tandis que l'eau est évacuée à l'égout ouvert.

Le temps de chauffage est approximativement 13.5 heures. L'étape de régénération est terminée quand le TI-701 monté au sommet du lit de tamis moléculaire détecte sa température régénérée. La température régénérée du tamis moléculaire (UOP Molsiv 4A (1/16")) est comme suit :

- 218°C pour 100% achevé
- 180°C pour 90% achevé

La température régénérée est actuellement réglée à 200°C.

Le temporisateur pour l'étape de chauffage est réglé à 13.5 heures. Quand le temporisateur expire, la séquence de commande passe au mode manuel par l'inter-verrouillage.

#### e) Refroidissement

Pour démarrer l'étape de refroidissement la vanne du réchauffeur de gaz de régénération (PV-721B) est fermée, et la vanne du gaz ambiant combustible (TV-721A) est ouverte. Actuellement le



contrôleur de TV-721A est commuté de TIC-721 à PI0721A pour contrôler la pression de gaz de régénération.

Le temps de refroidissement est actuellement de 9 heures. L'étape de régénération est terminée quand le TI-701 monté au sommet du lit de tamis moléculaire détecte la température suffisamment refroidie (40°C). Puis les vannes XV-701 et XV-713 sont fermées pour isoler la section du système de gaz de régénération.

A ce moment, le refroidisseur à air de gaz de régénération est arrêté par l'opérateur.

Quand le temporisateur expire, la séquence de commande passe au mode manuel par l'inter-verrouillage.

#### **f) Pressurisation et remplissage**

Pour démarrer l'étape de pressurisation et remplissage, XV-721 est ouverte pour introduire le GPL séché au lit de tamis moléculaire. Le contrôleur de pression PIC'703 est activé pendant ce cycle et la PV-703 dégage la pression au système de torchage HP quand la pression monte approximativement à la pression d'absorption (2,4 MPaG).

Le temps de pressurisation et remplissage est approximativement 2 heures. L'étape de remplissage est terminée quand le LSH-716 détecte le haut niveau de liquide du déshydrateur A (sécheur-A) et que la vanne de remplissage XV-721 est fermée.

Le temporisateur pour l'étape de pressurisation et remplissage est réglé à 2 heures. Quand le temporisateur expire, la séquence de commande passe au mode manuel par l'inter-verrouillage.

#### **g) Etape d'attente (stand-by)**

Après l'achèvement de l'étape de remplissage, le lit de tamis moléculaire se met en attente (stand-by) pendant approximativement 18h heures avant de commencer le prochain cycle d'adsorption.

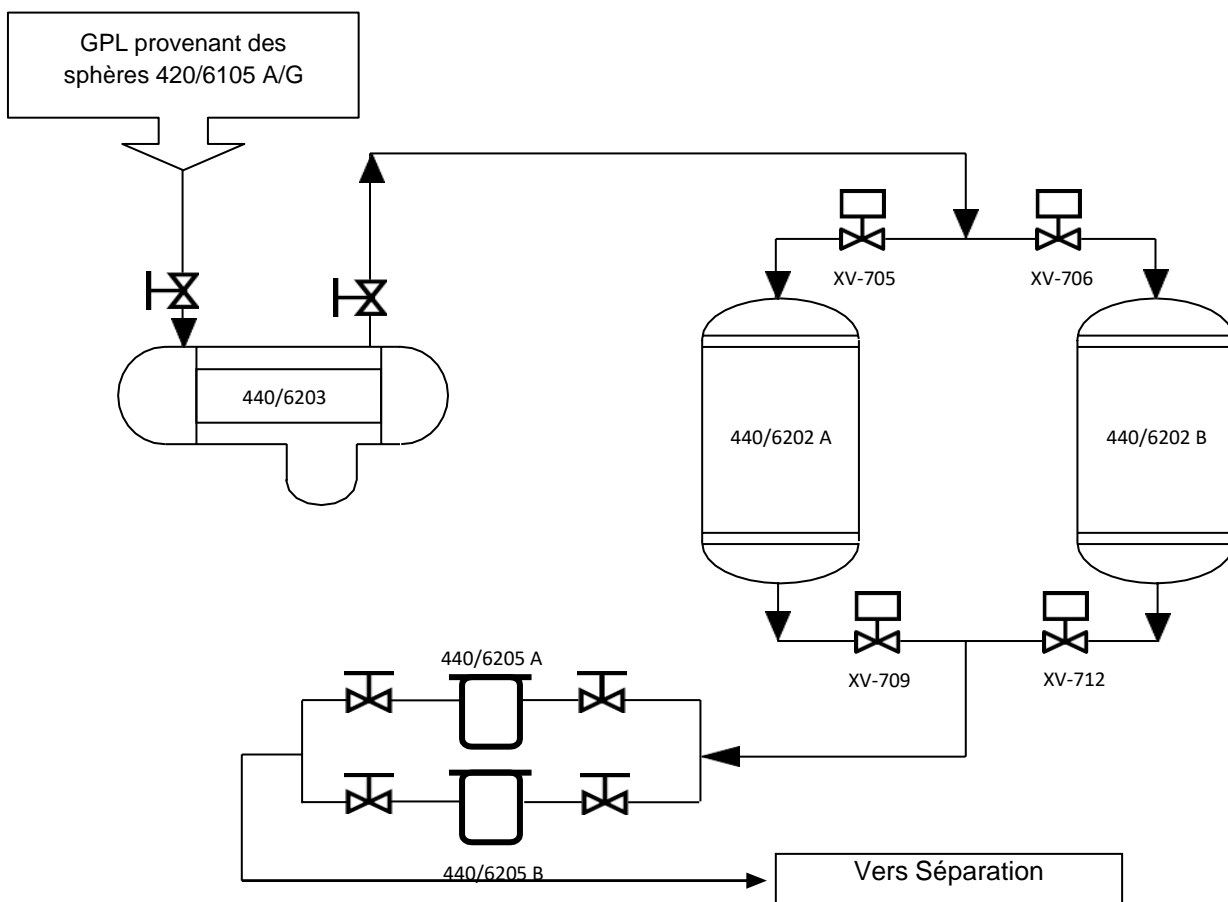


Figure 7 : Schéma synoptique de la section déshydratation

### 1-4-3. LA SECTION SEPARATION

La section séparation est composée de deux train, dont chacun d'eux est composé de :

- Colonne de séparation (407/6201)
- Préchauffeur (405/6201)
- Rebouilleur (405/6224)
- Les aérocondenseurs (405/6202)
- Ballon de reflux (410/6201)
- Les pompes de reflux (425/6202)

Cette section traite actuellement environs 18.500 kilogrammes par heure par chaque train. Dans les colonnes, la charge d'alimentation est séparée en deux produits ; butanecomme produit de fond et propane comme produit de tête. Ces colonnes disposent de 46 plateaux de fractionnement.

La qualité des produits requise est :

- Butane : teneur en propane inférieure à 5% molaire
- Propane : teneur en butane inférieure à 1% molaire

Vu que les deux trains A et B sont conçus à la même configuration nous allons décrire le fonctionnement d'un seul train.

La charge de GPL sortant de la section déshydratation est acheminée par canalisation (pipe) de 8 pouces de diamètre, jusqu'à la section séparation, pour être introduite dans le préchauffeur de GPL qui chauffe le GPL avant de passer à la colonne par un pipe de 10 pouces de diamètre. Le préchauffeur récupère la chaleur du produit de fond de la colonne. La température de la charge d'alimentation en GPL est contrôlée par le contrôleur indicateur de température TIC6213. La consigne de ce dernier est réglée à 50°C afin de maintenir la température constante de la charge de GPL.

Pour le bon fonctionnement de l'opération de séparation, deux paramètres doivent être crucialement contrôlés est bien réglés, à savoir la température et la pression. La colonne est conçue à une pression fixe de 19 bars. La pression de tête est maintenue en réglant le débit de vapeur sortante de la tête de colonne vers l'aéroréfrigérant et par son by-pass avec le PIC- 6247 (contrôleur indicateur de pression) et par l'arrêt/marche des aéroréfrigérant.

La température du plateau 32 contrôlée par le TIC-6209, est choisie pour contrôler le débit d'huile chaude du rebouilleur. L'huile chaude est fournie au rebouilleur à 190°C. La charge du rebouilleur est contrôlée par le débit d'huile chaude (l'instrument qui contrôle le débit d'huile est le FIC-6219) dont le point de consigne varie selon le contrôleur de température du plateau-32 (TIC-6209).

Le produit butanes issus du bas de colonne, entre dans le rebouilleur par le biais d'une pipe calorifugé de 14 pouces de diamètre, ou il est chauffé, puis une partie est réintroduite dans la colonne par un pipe calorifugé de 18 pouces de diamètre, tandis que l'autre partie est envoyée au préchauffeur par pipe de 8 pouces de diamètre comme une source de chaleur pour préchauffer la charge de GPL, puis il continue vers le sous-refroidisseur.

La vapeur de tête de colonne acheminée par un pipe de 12 pouces de diamètre, est condensée par l'aéroréfrigérant, et le liquide condensé s'écoule dans le ballon de reflux. Le liquide condensé est légèrement sous-refroidi pour assurer que toute la vapeur est condensée. Certain produit propane dans le ballon de reflux est envoyé au sous refroidisseur à l'air du propane par la FV-6226 contrôlée par le régulateur de niveau du ballon de reflux LIC-6226.

D'autres sont envoyés à travers une ligne de 6 pouces de diamètre jusqu'à la tête de colonne par les pompes de reflux. Vu l'écart existant entre les températures d'évaporation des deux produits (propane, butane) la quantité de propane envoyée en tête de colonne sert à condenser les fractions évaporées de butane, pour les séparer du propane, ainsi que le butane introduit dans la colonne après son passage par le rebouilleur, sert à évaporer les parties condensées du propane. Ainsi nous nous assurons d'obtenir des produits de la qualité requise.

Comme nous le savons, durant la phase d'exploitation des dérives et des problèmes peuvent survenir, de ce fait un système d'urgence est prévu, qui consiste en une ligne vide- vite avec une valve d'arrêt de commande à distance. En cas d'urgence les valves d'arrêts (XV-6211 pour la colonne et XV6212 pour le ballon de reflux) sont ouvertes par l'opérateur et le liquide est évacué vers le ballon séparateur de torche.

En fin de cette étape, les produit propane, issus des deux colonnes, se joint en amont du refroidisseur à l'air, où il sera refroidi à environs 40°C avant d'être envoyé à la section réfrigération par une ligne de 6 pouces de diamètre. De la même façon le produit butane, issus des deux colonnes, se joint en amont du refroidisseur à l'air, où il sera refroidi à environs 40°C, avant d'être acheminé à la section réfrigération par une ligne de 6 pouces de diamètre. Ainsi, une

autre partie de butane, est acheminé directement de l'aérocondenseur 405/6214 vers les deux sphères de stockage du butane ambiant (420/6105 E/F) par une ligne de 6pouces de diamètre.

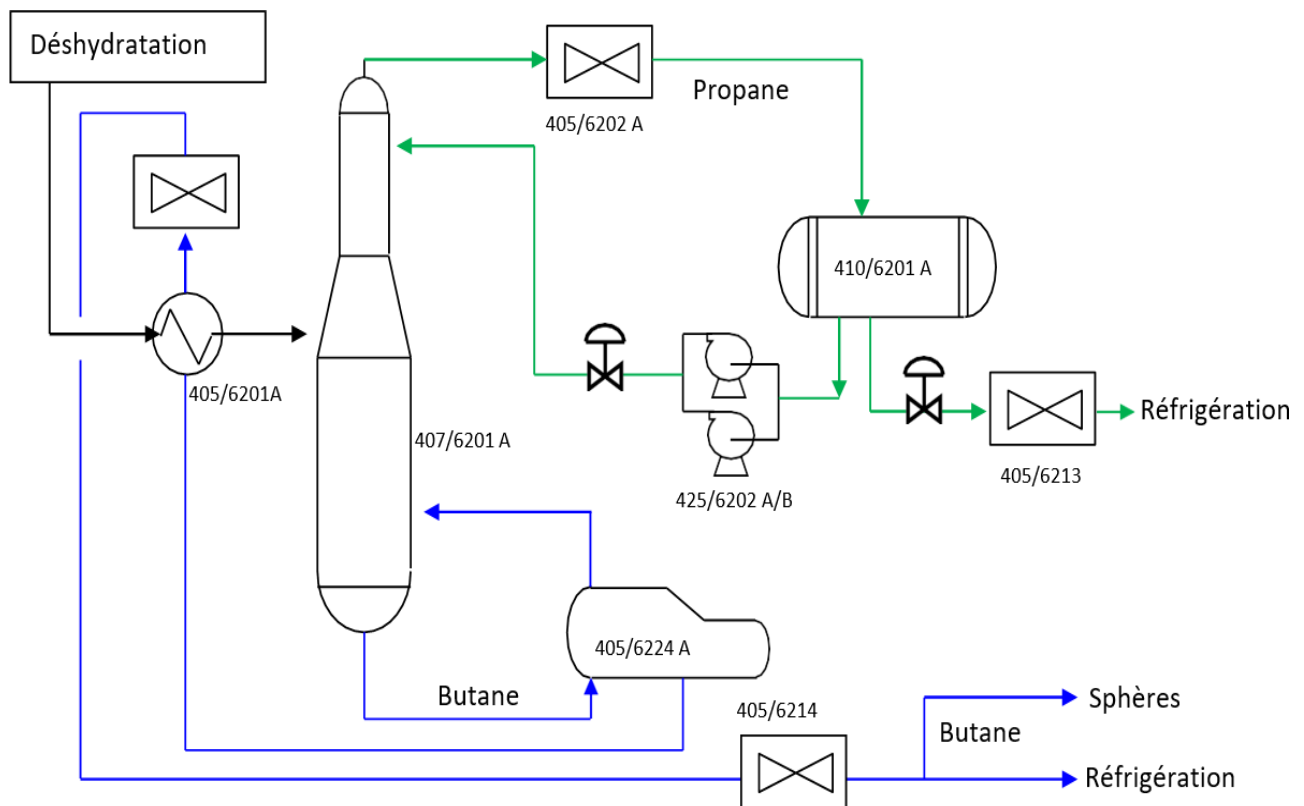


Figure 8 : Schéma synoptique de la section séparation

#### 1-4-4. LA SECTION REFRIGERATION

Les produits issus de la section séparation (Propane et butane) quittent les aérocondenseurs 405/6213 et 405/6214, pour rejoindre la section de réfrigération, où ils seront refroidis pour être stockés par la suite.

Cette section se compose de deux circuits, à savoir circuit de produits commercial et circuit de produit réfrigérant. Les installations de ces deux circuits sont :

- Schiller pour propane (405/6205, 405/6206, 405/6207)
- Schiller pour butane (405/6210, 405/6212)
- Ballon de propane pur réfrigérant (410/6217)
- Ballons d'aspirations HP (410/6230), MP (410/6205), BP (410/6219)
- Ballon Quench (410/6218 A/B/C)
- Compresseurs (430/6201 A/B/C)
- Turbine à gaz (430/6203 A/B/C)
- Aérocondenseur de propane pur réfrigérant (405/6209 A/B).
- Un réseau de canalisation.

#### **1-4-4-1. Circuit Propane commercial**

Le produit propane, est acheminé de la section séparation vers la section réfrigération par une ligne de 6 pouces de diamètre, puis sa section est augmentée à 10 pouces à l'entrée du Schiller 405/6205. Le produit est introduit dans le Schiller 405/6205 coté faisceaux, à une température d'environ 40°C, où elle va être réduite à environ 15°C. A la sortie, la section est réduite à nouveau à 6 pouces. Le produit est ensuite envoyé vers la section de déshydratation de garde.

Dans la déshydratation de garde le propane commercial est séché dans les sécheurs (460/6201A/B), et la teneur en eau doit être inférieure à 1PPM, pour éviter la formation des hydrates par la suite, vu que les températures vont être encore baissés.

Le propane commercial quitte la déshydratation de garde après le passage par les filtres (440/6203 A/B), et rejoint le Schiller 405/6206 où le produit est refroidi à environ -14°C, pour passer par la suite dans le Schiller 405/6207 où sa température est réduite jusqu'à -37°C. A la sortie le produit est dépressurisé dans le ballon 410/6106 pour atteindre sa température de saturation qui avoisine les -45°C.

#### **1-4-4-2. Circuit Butane commercial**

De la même façon que le propane, le butane commercial est acheminé des aérocondenseurs 405/6214 par une ligne de 6 pouces de diamètre vers la section réfrigération. Le produit est introduit dans le Schiller 405/6210 coté faisceaux à une température avoisinant les 40°C, sachant que cette température varie selon la température ambiante, puis il sort à une température d'environ 14°C. Le butane commercial, contrairement au propane commercial, ne passe pas par la déshydratation de garde, mais il passe directement vers le Schiller 405/6212 où il est refroidi à environ -11°C. A la sortie le produit est dépressurisé à 4 bars, et envoyé au bac de stockage 420/6105.

#### **1-4-4-3. Circuit propane pur réfrigérant**

Le refroidissement des produits commerciaux (Propane / Butane) est assuré par le propane pur. Ce dernier est stocké dans le ballon 410/6217 à une pression de 16 bar et une température avoisinant les 40°C. Le propane pur alimente le coté calandre des deux Schiller 405/6205 et 405/6210 par les vannes de niveau LV-6234 et LV6235. En aval des deux LV, le propane pur subit une détente amenant sa pression à environ 6 bars et sa température à 12°C. A la fin de cette première phase, les vapeurs produites sont acheminées vers le Ballon d'aspiration HP410/6230, et le liquide est acheminé pour alimenter les Schiller du deuxième stade, à savoir les Schiller 405/6206 et 405/6212.

Les LV-6236 et LV-6237 assurent la détente du propane avant son introduction dans les Schiller à une pression d'environ 1,8 bar et une température de -16°C. La partie liquide du propane dans le ballon d'aspiration HP410/6230 sert à alimenter les Schiller 405/6206 et 405/6212 par des lignes de 2 pouces de diamètre.

A la fin de cette phase, les vapeurs du propane réfrigérant sont envoyées vers le ballon d'aspiration MP410/6205, et le Schiller 405/6206 alimente le Schiller 405/6207.

La LV-6238 assure la détente du propane réfrigérant à une pression de 0,5 bar et une température de -40°C avant son introduction dans le Schiller 405/6207. Dans cette phase il n'y

que le propane, le butane termine son cycle au niveau de la deuxième phase. Les vapeurs du propane réfrigérant sont acheminées vers le ballon d'aspiration basse pression 405/6219.

#### **a) La Compression des vapeurs**

Les vapeurs sont recyclées par le biais des turbocompresseurs, dont chacun d'eux est composé d'une turbine à gaz et d'un compresseur multi-étage (Dresser).

Chaque compresseur possède trois étages d'admission HP, MP et BP. Les vapeurs proviennent des ballons d'aspiration. Les vapeurs de l'étage BP sont comprimées puis mélangées aux vapeurs d'admission de l'étage MP, le mélange est comprimé puis mélangé aux vapeurs de l'étage HP. A la fin les vapeurs sont refoulées à une pression d'environ 16 bars, puis condensées dans l'aérocondenseur 405/6209 A/B puis renvoyées vers le ballon 410/6217. Ces compresseurs, peuvent faire face à un problème de pompage, de ce fait chacun des compresseurs est muni d'un système d'anti-pompage.

#### **b) Système anti-pompage**

Au niveau des refoulements de chaque compresseur, il existe un piquage vers les ballons quench (410/6218A/B/C). A l'entrée de chaque ballon quench, la pression est contrôlée et maintenue respectivement par les contrôleurs indicateurs de pression PIC-6247 A/B/C entre 6 à 7 bars.

Le propane pur provenant du ballon 410/6217 est injecté dans les ballons via les vannes de contrôle de température TV-6247 A/B/C reliées aux contrôleurs indicateurs de température TIC-6247 A/B/C, permettant le contrôle du débit de propane pur injecté.

Au niveau de chaque ligne d'aspiration HP, MP et BP des trois compresseurs (430/6201A/B/C), des transmetteurs de débit sont installés (FT101/102/103), (FT201/202/203), (FT301/302/303) transmettant un signal aux Indicateurs contrôleurs de débit (FIC101/102/103), (FIC201/202/203), (FIC301/302/303) contrôlant les vannes de débit (FV101/102/103), (FV201/202/203) et (FV301/302/303) reliées au ballon quench 410/6218A/B/C pour compenser le manque de débit des vapeurs de propane réfrigérant provenant des ballons d'aspiration 410/6230, 410/6205, 410/6219.

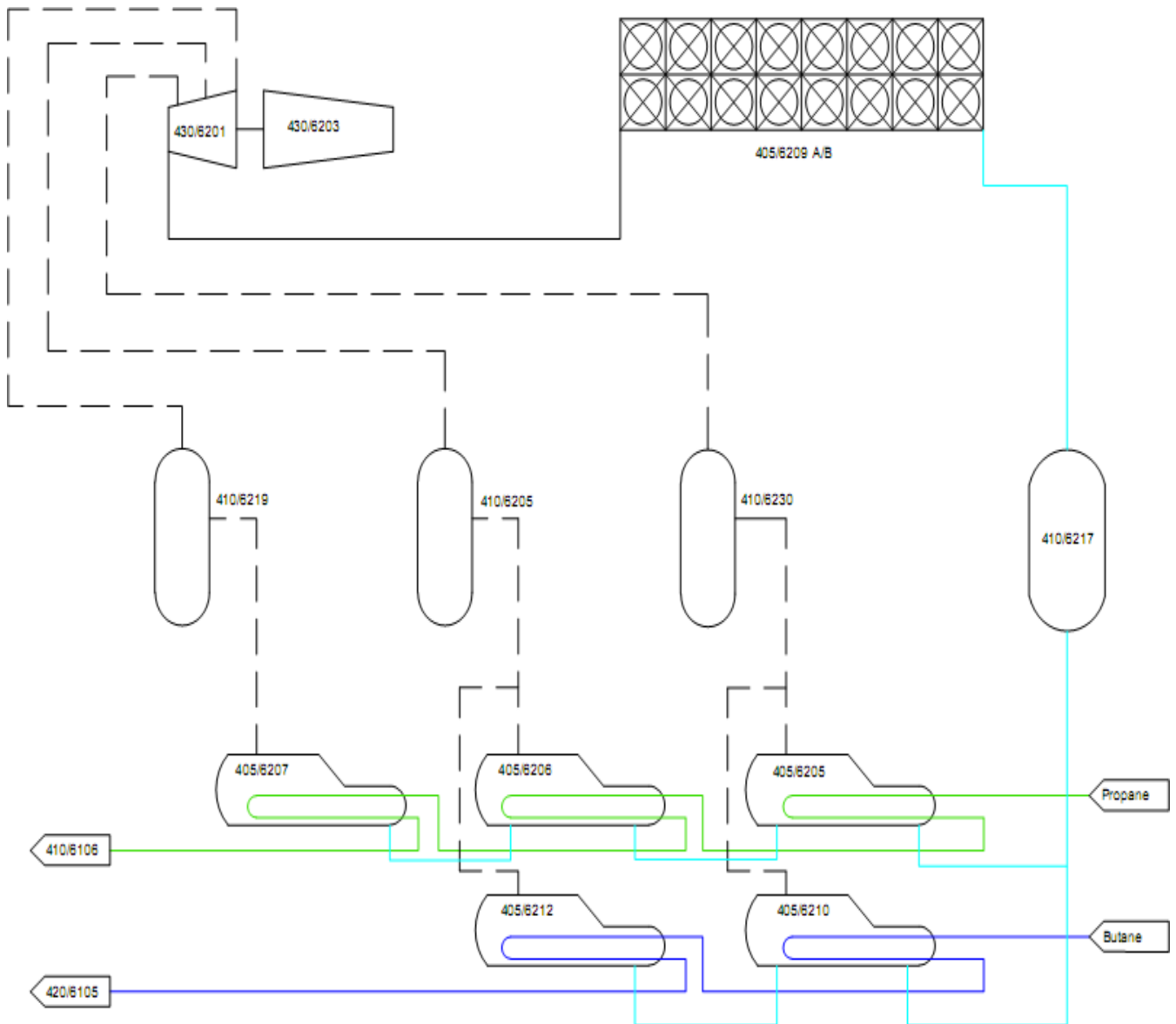


Figure 9 : Schéma synoptique de la section réfrigération

#### 1-4-5. LE STOCKAGE

Les produits Butane et Propane seront stockés dans des bacs de stockage réfrigéré d'une capacité de 70.000 m<sup>3</sup> chacun, pour être commercialisés par la suite.

Une partie du Butane est stocké directement après la phase de séparation dans deux sphères de stockage (420/6105 E/F) sous pression pour être livré par la suite à NAFTAL.

Lors du stockage les gaz émettent des vapeurs, surtout le propane vu qu'il est stocké à - 45°C, de ce fait une section BOG (Boil Of Gas) assure la récupération et la liquéfaction de ces vapeurs (voir chapitre 3).

### 1-5. LES CARACTERISTIQUES DU GPL [3]

Le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) est un mélange de gaz constitué essentiellement de propane et de butane en des proportions différentes selon la nature des gisements. La composition moyenne en général des GPL algériens se situe autour de 60% de propane et 40% de butane, bien sûr en incluant les traces de méthane, d'éthane et d'autre gaz, ainsi que de l'eau. Les GPL sont gazeux aux conditions normales de température et de pression. La liquéfaction des GPL permet de réduire l'espace qu'ils occupent (1m<sup>3</sup> de GPL liquide occupe un volume de 225m<sup>3</sup> à l'état gazeux dans les conditions normales).

Le GPL est un gaz plus lourd que l'air. Le butane est deux fois plus lourd que l'air en phase vapeur, soit 2,4 g/l comme masse volumique, et le propane est une fois et demie plus lourde que l'air en phase vapeur, soit 1,8 g/l comme masse volumique, c'est pour cette raison que les GPL ont tendance à s'accumuler dans les points bas. A l'état liquide les GPL sont à peu près deux fois plus légers que l'eau, soit 0,51 kg/l pour le propane et 0,58 kg/l pour le butane.

Que ce soit à l'état liquide ou gazeux, les GPL sont incolores et inodores, toutefois on leur ajoute des mercaptans à base de soufre pour leur donner une odeur caractéristique.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques du GPL

| Paramètre                              | Butane commercial              | Propane commercial            |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>Formule chimique</b>                | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> |
| <b>Masse volumique</b>                 |                                |                               |
| - A l'état liquide                     | 0,585 kg/l                     | 0,515 kg/l                    |
| - A l'état gazeux                      | 2,44 kg/m <sup>3</sup>         | 1,87 kg/m <sup>3</sup>        |
| <b>Température d'ébullition</b>        | 0 °C                           | - 44°C                        |
| <b>Points critiques</b>                |                                |                               |
| - Température                          | 152°C                          | 97°C                          |
| - Pression                             | 37 bar                         | 41,5 bar                      |
| <b>Pression de vapeur</b>              |                                |                               |
| - A 15°C                               | 1,5 bar                        | 7 bar                         |
| - A 50 °C                              | 4,7 bar                        | 17 bar                        |
| <b>Limite d'inflammabilité</b>         | 1,8 à 9 %                      | 2,2 à 10%                     |
| <b>Température d'auto inflammation</b> | 525 °C                         | 535 °C                        |
| <b>Température de flamme</b>           | 1960 °C                        | 1970 °C                       |



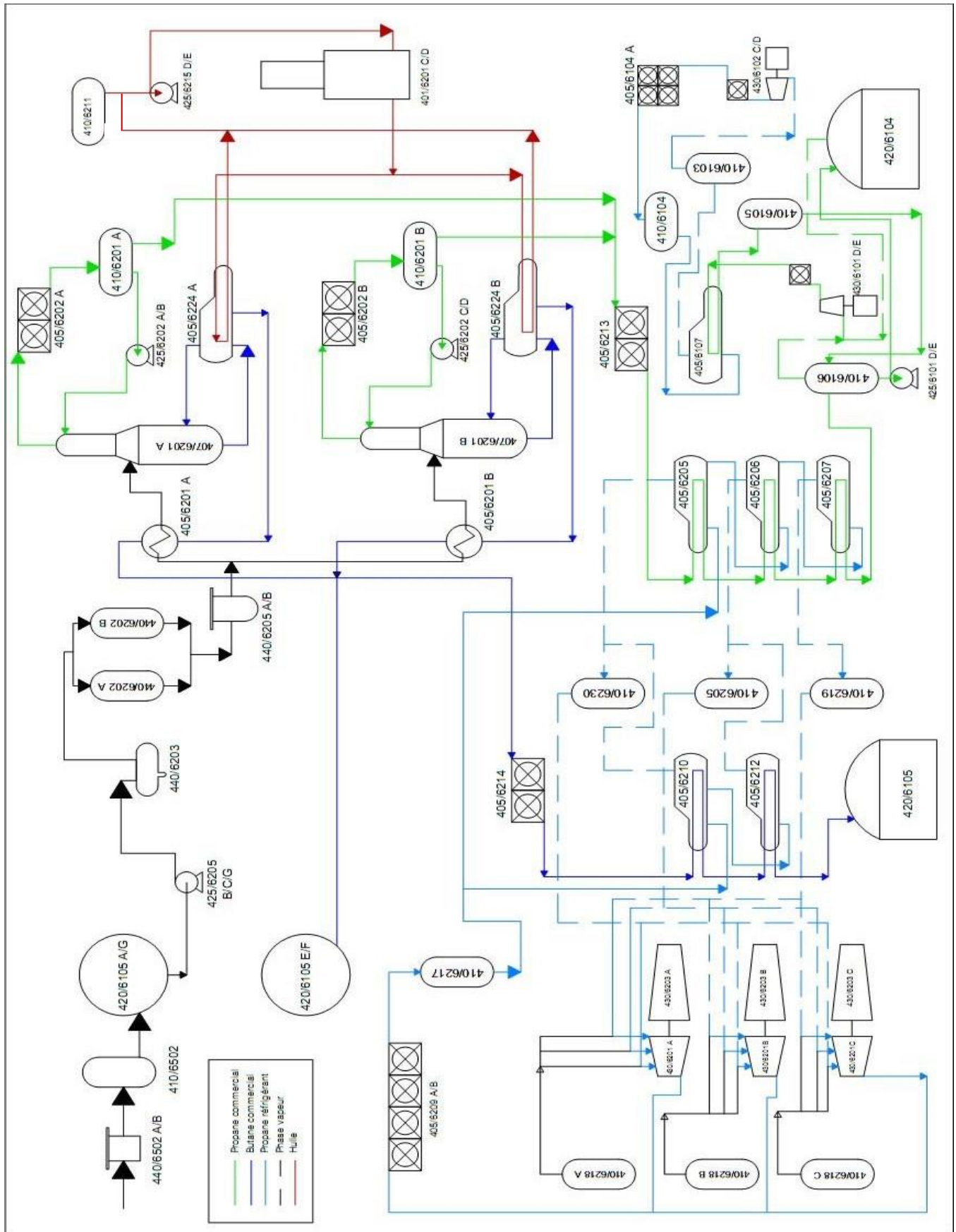


Figure 10. Schéma synoptique du procédé de production du complexe GP2Z

**I-6. DESCRIPTION DU DEPARTEMENT DE SECURITE [1, 5, 6]**

La sécurité joue un rôle primordial dans toute industrie et en particulier dans l'industrie des hydrocarbures. En effet c'est un intérêt vital pour toute société d'assurer la sécurité dans le fonctionnement de ses diverses installations, afin de protéger le personnel, les biens et l'environnement de tout éventuel accident. Ce département est attaché directement à la direction générale (Fig. 11), il est subdivisé en trois services spécialisés placés chacun sous l'autorité d'un chef de service.

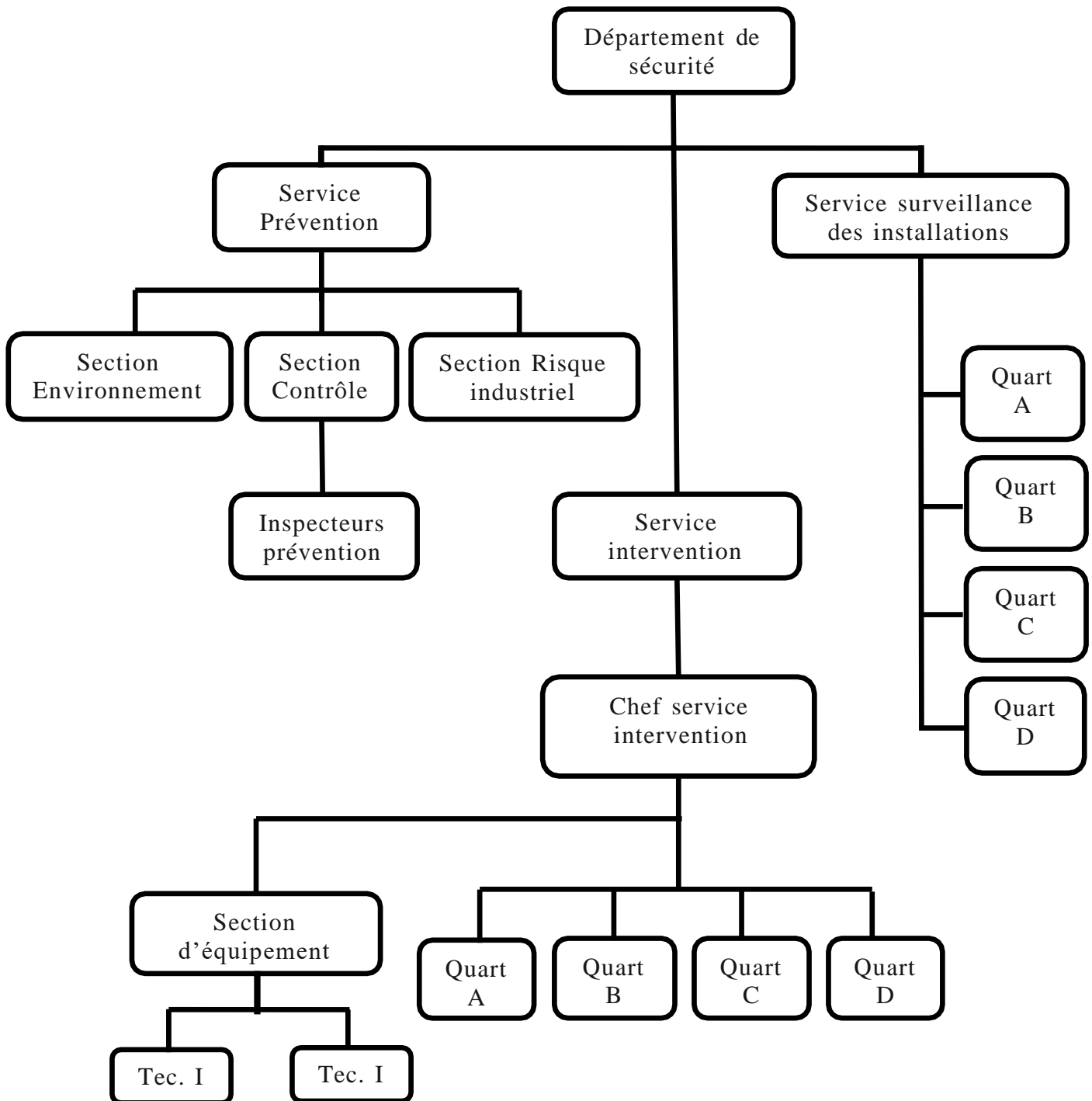


Figure 11 : Organigramme du département de sécurité

**I-6-1. SERVICE SURVEILLANCE DES INSTALLATIONS (IS)**

Ce service est récent au niveau du département de sécurité il est chargé de :

- ✓ Veiller à l'exécution des rondes systématiques de surveillance et de contrôle sur les installations.
- ✓ Assurer une assistance aux autres services de la sécurité, notamment dans le suivi lors de l'exécution des travaux d'exploitation et de maintenance.
- ✓ Contribuer à l'élaboration des consignes de sécurité et à l'enrichissement des systèmes de sécurité.
- ✓ Veiller à la bonne exploitation des systèmes de télésurveillance conformément au manuel opératoire.
- ✓ Assister le service prévention pendant les travaux à risques potentiels.

**I-6-2. SERVICE INTERVENTION (II)**

C'est un service qui doit être prêt à intervenir en cas de sinistre à n'importe quel moment ; il a différentes tâches :

- ✓ Organiser les équipes d'intervention
- ✓ Elaborer les plans d'intervention
- ✓ Organiser les équipes d'intervention de réserve
- ✓ Diriger les manœuvres d'intervention
- ✓ Veiller au maintien de bon état du matériel
- ✓ Elaborer et diriger les exercices périodiques de lutte contre l'incendie.
- ✓ Assurer la surveillance de tous les travaux.
- ✓ Assurer les liaisons de toutes les équipes d'intervention.

**I-6-3. SERVICE DE PREVENTION (IP)**

Ce service autorise et assure le suivi des travaux de maintenance, d'inspection et de construction dans des conditions optimales de sécurité. La prévention a pour rôle de :

- ✓ Assurer l'hygiène et sécurité de l'ensemble du personnel et les installations sur le plan de prévention.
- ✓ Déterminer les étapes d'une politique globale de la sécurité.
- ✓ Prévenir des risques potentiels des incidents et des accidents.
- ✓ Garantir le respect de normes hygiène et sécurité.
- ✓ Assurer l'aide et l'assistance a tous les organes et structures d'exploitation.
- ✓ Assurer les formations et la sensibilisation de l'ensemble du personnel en matière d'hygiène et sécurité.
- ✓ Participer et de d'examiner les exercices de l'entreprise.
- ✓ Etudier et d'examiner les innovations technologiques en matière de sécurité préventive.
- ✓ Etudier et analyser la situation en matière de pollution.

## CHAPITRE II : L'ÉVALUATION DES RISQUES PROFESSIONNELS

### II-1. INTRODUCTION

L'évaluation des risques concerne le choix des procédés de fabrication, les équipements de travail, les substances ou préparations chimiques. L'évaluation doit se faire pour l'aménagement ou le réaménagement des lieux de travail ou des installations et dans la définition des postes de travail.

Organiser la prévention et à intégrer la protection de la santé et la sécurité au travail, dans la gestion quotidienne. Évaluer les risques potentiels au poste de travail, avant la survenance de dysfonctionnements, d'accidents ou de maladies professionnelles, est un préalable indispensable pour construire un plan d'actions de prévention pertinent.

Il sera donc nécessaire, pour l'établissement du document unique, de bien identifier les dangers et les expositions pour chacun des points énoncés [11, 8].

➤ **L'évaluation n'est pas une fin en soi**

- L'évaluation des risques professionnels sert à planifier des actions de prévention dans l'entreprise, en tenant compte des priorités.
- L'évaluation des risques professionnels ne sert à rien si elle n'est pas suivie d'actions.
- Il ne s'agit que d'une étape dans un processus global.

➤ **La maîtrise de l'évaluation appartient à l'entreprise**

- Même si vous avez recours à des conseils extérieurs, les décisions finales et les mesures à prendre pour maîtriser vos risques vous appartiennent.

➤ **L'évaluation des risques est une démarche collective**

- Les salariés eux-mêmes sont souvent les mieux placés pour connaître les situations dangereuses.
- Il est donc nécessaire de les associer à la démarche pour mieux prendre en compte la réalité du travail.

➤ **L'évaluation n'est pas une démarche éphémère**

- L'évaluation doit être continue dans l'entreprise et faire l'objet de mises à jour annuelles ou à l'occasion de modification de la production, d'agrandissement des locaux, ...

### II-2. CADRE REGLEMENTAIRE

- ✚ Loi n°88-07 du 26 janvier 1988, relative à l'hygiène, la sécurité et la médecine du travail [18].
- ✚ Décret n°74-255 du 28 Décembre 1974, fixant les modalités de constitution, les attributions et le fonctionnement de la commission d'hygiène et sécurité dans les entreprises socialistes [15].
- ✚ Décret exécutif n°91-05 du 19 Janvier 1991, relatives aux prescriptions générales de protection applicables en matière d'hygiène et de sécurité en milieu de travail [16].
- ✚ Arrêté interministériel du 5 Mai 1996, fixant la liste des accidents présumés d'origine professionnelle, ainsi que les annexes 1 et 2 [17].
- ✚ Décret exécutif n° 96-209 du 5 Juin 1996, fixant la composition, l'organisation et le fonctionnement du conseil national d'hygiène de sécurité et de médecine du travail [18].

- ✚ Arrête interministériel du 9 Juin 1997, fixant la liste des travailleurs où les travailleurs sont fortement exposés aux risques professionnels [19].
- ✚ Décret n°02-427 du 7 Décembre 2002, relatif aux conditions d'organisation de l'instruction de l'information et de la formation des travailleurs dans le domaine de la prévention des risques professionnels [20].
- ✚ Décret n° 2001-1016 du 5 Novembre 2001 portant la création d'un document relatif à l'évaluation des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs, prévue par l'article L. 230-2 du code du travail [11].

## II-3. NOTIONS DE BASE

### II-3-1. GENERALITE

- **Domage** : Lésion ou atteinte à la santé [11].
- **Danger** : Cause capable de provoquer un dommage [11].
- **Risque** : Combinaison de la gravité des dommages potentiels et de la fréquence d'exposition des salariés à un danger [10, 11].
- **Postes de travail** : La notion de poste de travail doit être appréhendée dans son contexte, en tenant compte, par exemple, des contraintes éventuellement posées par le travail effectué en amont, simultanément aux contraintes que le soutien de cadence pourra éventuellement poser sur les postes situés en aval. La notion de poste est alors proche de celle de situation. De même, le choix des outils au poste de travail devra prendre en compte l'analyse de l'activité et l'individu occupant le poste [14].
- **Unité de travail** : la notion d'« unité de travail » doit être comprise au sens large, afin de recouvrir les situations très diverses d'organisation du travail. Son champ peut s'étendre d'un poste de travail, à plusieurs types de postes occupés par les travailleurs ou à des situations de travail, présentant les mêmes caractéristiques. De même, d'un point de vue géographique, l'unité de travail ne se limite pas forcément à une activité fixe, mais peut aussi bien couvrir des lieux différents (manutention, chantiers, transports, etc. définitions extraites de la norme européenne 1050) [10, 14].
- **Situation de travail** : C'est une situation qui réunit, dans un environnement donné, des moyens techniques et humains en vue d'assurer une production [10 14].
  - **Ex** : La maintenance des installations électriques.
- **Situation dangereuse** : C'est une situation dans laquelle un accident est possible du fait de la présence d'une personne en relation avec un ou plusieurs phénomènes dangereux [10, 14].
  - **Ex** : Un fil dénudé sous tension accessible à l'opérateur.
- **Travail prescrit (ou activité)** : C'est la description détaillée de la tâche globale, la liste des opérations élémentaires à réaliser par l'individu. Le travail prescrit est rarement "dit, écrit ou montré", car on considère que la personne "sait faire son travail". Il faut observer et faire décrire le travail prescrit par l'intéressé. Le travail prescrit ne tient pas compte des tâches annexes [10].
- **Travail réel (ou activité)** : Le travail réel est souvent assez différent du travail prescrit. L'individu se débrouille, s'adapte, invente des gestes ou des opérations pour atteindre son objectif. C'est souvent pendant ces opérations dites de "récupération ou de remplacement" que l'individu va se trouver dans une situation dangereuse. Il faut observer aussi avant et après pour voir les tâches annexes [10].

- **Danger ou phénomène dangereux** : C'est la cause capable de provoquer une lésion ou une atteinte à la santé.
  - **Ex** : Un fil dénudé sous tension.
- **Événement dangereux** : C'est un événement susceptible de provoquer un dommage.
  - **Ex** : L'opérateur touche le fil dénudé sous tension (contact direct) [10].
- **Risque** : C'est la combinaison de la probabilité d'occurrence et de la gravité d'une lésion ou d'une atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse.
  - **Ex** : Risque d'électrisation.
- **Conséquence de l'événement accidentel ou dommage** : C'est une lésion physique et/ou une atteinte à la santé des personnes et/ou des biens [10].
  - **Ex** : L'électrisation d'un opérateur (une brûlure électrique, un arrêt cardiaque...).
- **Défaillance** : C'est la « cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ». On dira qu'une entité connaît une défaillance lorsqu'elle n'est plus en mesure 'de remplir sa (ou ses) fonction(s). Par extension, on considère parfois qu'il y a une défaillance lorsqu'il y a altération de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise : les tolérances associées doivent alors être définies [23].

### II-3-2. NOTION DE SYSTEME

#### DEFINITIONS

**Définition de Système** : Un système est défini comme un ensemble d'éléments qui interagissent entre eux. Tout système se caractérise par une ou plusieurs fonctions qu'il doit accomplir [24].

Les éléments définissant un système sont [24] :

- Les fonctions assurées par le système.
- L'architecture du système, qui comprend les divers composants mis en jeu et leurs connections.
- Le système d'exploitation, qui représente les comportements du système durant son fonctionnement

**Définition de Composant** : La définition des composants d'un système peut se faire de multiples façons. En effet, un composant peut-être lui-même décomposé en sous composants. Il est ainsi nécessaire de fixer la finesse de l'étude afin de déterminer le choix des composants.[4]

#### • FIABILITE DES COMPOSANTS

La fiabilité des composants élémentaires peut être estimée à partir d'essais en considérant les dates d'apparition des défaillances.

On teste alors l'adéquation des défaillances constatées avec les lois de statistique connues et on identifie, quand c'est possible, la fiabilité du composant élémentaire (représentée par la fonction de densité de probabilité de défaillance au cours du temps) à une loi connue caractérisée par ses paramètres propres. Cette démarche n'est possible que si tous les essais ont été menés exactement dans les mêmes conditions.

On peut alors, en utilisant la fonction cumulée de défaillance, prévoir à un instant  $t$  la probabilité de défaillance d'un composant élémentaire. Cette estimation nécessite cependant des précautions : il convient de vérifier que les conditions de fonctionnement concernées par l'estimation sont les mêmes que celles ayant été utilisées pour déterminer la "loi de fiabilité" du composant.

On peut appréhender dès cette étape les problèmes liés à l'environnement dans lequel fonctionne le composant et donc la nécessité de caractériser l'influence de cet environnement sur le comportement du composant élémentaire. [25]

- **Fiabilité Des Systèmes**

Généralement, les industriels s'intéressent à la fiabilité de systèmes complexes, formés de plusieurs composants élémentaires comme les joints, arbres, carters, pistons... L'étude d'un tel système passe par sa décomposition en composants élémentaires.

On étudie ensuite la fiabilité de chaque composant élémentaire et on en déduit la fiabilité du système. [24]

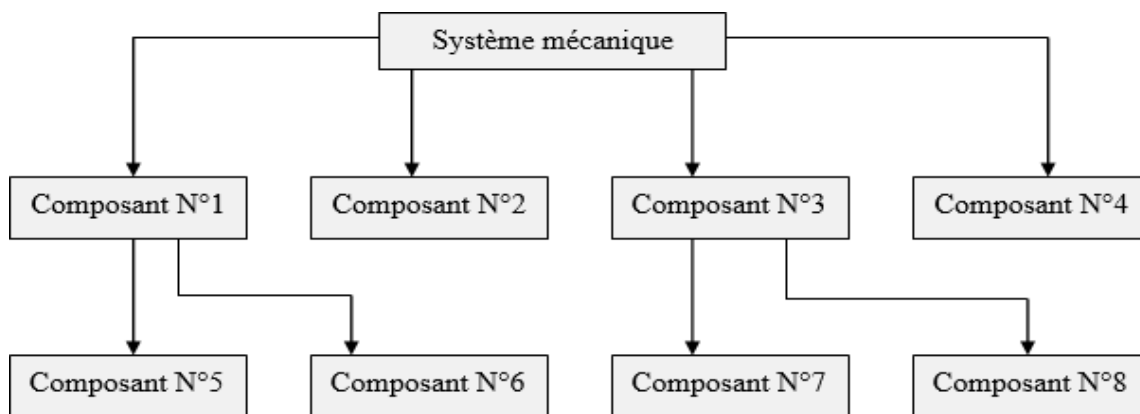


Figure 12 : Décomposition d'un système mécanique en composants élémentaires

## II-4. PRINCIPAUX RISQUES PROFESSIONNELS

La connaissance en amont des risques auxquels sont exposés les travailleurs définira des actions de prévention mise en œuvre [21].

- **Manutention circulation**

- Risque de chute.
- Risque lié à la manutention manuelle.
- Risque lié à la manutention mécanisée.
- Risque lié aux circulations et aux déplacements.
- Risque lié aux effondrements et aux chutes d'objets.

- **Chimie-biologie**

- Risque toxique.
- Risque d'incendie, d'explosion.
- Risque biologique.
- Risque lié au manque d'hygiène.

- **Equipements**

- Risque lié à l'électricité.

- Risque lié aux machines et aux outils.
- **Ambiance**
- Risque lié au bruit.
- Risque lié aux vibrations.
- Risque lié aux ambiances thermiques.
- Risque lié aux rayonnements.
- Risque lié aux ambiances lumineuses.
- **Organisationnelles**
- Risque lié à l'intervention d'une entreprise extérieure.
- Risque lié à l'organisation du travail.

## II-5. PRINCIPAUX ETAPES D'ÉVALUATION DU RISQUE

L'évaluation est une estimation de la gravité et de la fréquence d'apparition du risque [12].

**Gravité** : Elle est d'autant plus importante que les conséquences de l'accident sont handicapantes pour la victime

**Fréquence** : C'est le nombre de fois où apparaît le risque par unité de temps. La manière de procéder proposée a fait ses preuves lors de nombreuses démarches d'évaluation ; elle pourra être adaptée au contexte propre de chaque entreprise.

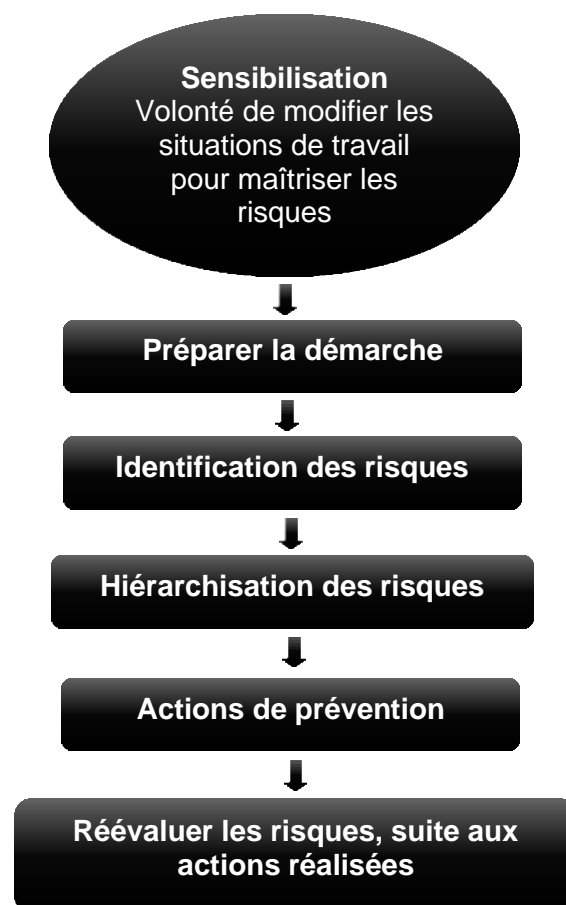


Figure 13 : Schéma des principales étapes d'évaluation du risque



### II-5-1. LA PHASE PREPARATOIRE

Cette évaluation nécessite sous l'impulsion du chef d'établissement, de mettre en place un groupe de travail, de planifier les différentes étapes et de prévoir les moyens matériels et humains afin que la démarche soit effective [10, 7] :

- Désigner le pilote de l'évaluation.
- Découper en unités de travail (notion d'équipes).
- Rassembler les principaux éléments concernant la sécurité, tels que :
  - ✓ Dossier des accidents du travail (AT) ;
  - ✓ Rapports de vérifications ;
  - ✓ Dossier sécurité, registre d'observation... ;
  - ✓ Fiche d'entreprise de la médecine du travail
  - ✓ Constituer des groupes de travail ayant une bonne connaissance du métier (conducteur de travaux, chef de chantier, chef d'entreprise, médecin du travail...) et expliquer les objectifs de l'action et le rôle de chacun. Chaque groupe traitera de l'ensemble des fiches.

#### a) Constitution du groupe de travail

Sous la responsabilité du chef de service ou du chef d'établissement ou de son adjoint il mettra en place un groupe de travail qui peut être constitué de :

- Gestionnaire de l'établissement ;
- Personnels de santé de l'établissement ;
- Personnes ressources (l'opérateur, agents de labo, ...) ;
- Chef de travaux ;
- Membres de la Commission Hygiène et Sécurité.

Le groupe de travail définira le cadre de l'évaluation et les moyens mis à disposition. Il définira les indicateurs à disposition dans l'établissement :

- Lister les accidents corporels et matériels, presque accidents (registre infirmerie, arrêt de travail...) ;
- Dysfonctionnements techniques ;
- Etat des bâtiments, des installations, des équipements, des matériels... ;
- Rapports de visite de l'Inspecteur Hygiène et Sécurité ;
- Rapports de l'inspecteur du travail ;
- Fiches individuelles ou collectives de risques professionnels ;
- Rapports des organismes de contrôle ;
- Réglementation, consignes, notices, documents, fiches de données sécurité.

Ces indicateurs permettront dans la suite de la démarche de définir plus précisément les unités de travail, les sources de danger, les zones à risque, la hiérarchisation des risques....

#### b) Inventaire des unités de travail dans l'établissement

Il peut s'agir soit :

- **D'un poste de travail** (travail sur machine-outil, préparation en labo de chimie...).

- **De plusieurs postes de travail** (atelier de productique, travail de secrétariat, activités physiques et sportive...).
- **De situation de travail présentant les mêmes caractéristiques** (travail informatique, utilisation de produits dangereux...).

Dès cette phase préparatoire, il est important de réfléchir aux modalités de communication des résultats dans l'entreprise et à la mise à jour annuelle de l'évaluation.

## II-5-2. IDENTIFICATION DES DANGERS OU PHENOMENES DANGEREUX

A cette étape de la démarche il faudra identifier les situations dangereuses liées à chaque unité de travail, c'est repérer tous les dangers auxquels peuvent être exposés les salariés. Ce travail consiste à s'interroger sur [10, 7, 9] :

- La nature des dangers ;
- Le nombre de salariés potentiellement exposés ;
- Le lieu, la durée d'exposition ;
- Les circonstances d'exposition... Comment procéder ?
- S'appuyer sur l'observation des situations de travail ;
- Demander aux compagnons de décrire les situations dangereuses telles qu'ils les perçoivent.

### a) Description des risques - exposition aux dangers

Pour chaque situation de travail à partir d'une situation dangereuse on doit décrire le travail prescrit, la situation observée, le travail réel, le phénomène dangereux, le risque encouru, la localisation de la matérialisation du risque et la ou les catégories de personnes concernées. Des photos peuvent être prises afin d'alimenter l'analyse des risques auprès du groupe de travail. Il s'agit de situations concrètes de travail.

### b) Estimation des risques

Pour estimer un risque il faut prendre en compte les deux critères suivants :

- La gravité des dommages potentiels.
- La probabilité d'apparition d'évènements accidentels.
- ✓ **La gravité (G)** des dommages potentiels.
- ✓ **La probabilité (Pr)** d'apparition d'un événement accidentel. Ce critère est fonction de la durée et/ou de la fréquence d'exposition des personnes, du nombre de personnes concernées...

D'où l'estimation possible du risque (R) :

$$R = G \times Pr$$

Plus le chiffre (R) est élevé plus la priorité d'action en prévention devra être importante. Cette estimation permettra pour toutes les unités de travail évalué de hiérarchiser les risques et de déterminer ainsi les priorités du plan d'action.

### II-5-3 HIERARCHISATION DES RISQUES

Hiérarchiser ou classer les risques, cette réflexion doit se faire par un groupe de travail, ce groupe peut être complété par d'autres compétences. C'est faire une notation des risques identifiés en fonction de critères propres à l'entreprise (probabilité d'occurrence, gravité, fréquence...). Ce classement sert à débattre des priorités en vue de planifier les actions de prévention. Elle se base sur une approche quantitative (indice de criticité...) [10, 7]. Les critères à prendre en compte, sont :

- Gravité des conséquences possibles ;
- Facteurs aggravants ;
- Nombre de salariés exposés ;
- Fréquence et durée d'exposition ;
- Probabilité d'événement ;
- Nombre d'accidents, de maladies ou d'incidents liés à ce risque.

Ce travail de classement comporte forcément une part de subjectivité liée au vécu des participants et à leur perception du risque.

### II-5-4 ACTIONS DE PREVENTION

A cette étape de la démarche, l'établissement établira par activité, unité ou poste de travail les mesures de prévention retenues pour chaque risque évalué, les délais d'exécution, l'estimation du coût et la ou les personnes chargées de la réalisation.

Le niveau de priorité défini lors de la phase d'évaluation, permettra à l'établissement de planifier ces actions en privilégiant celles correspondant aux risques les plus importants.

Les mesures de prévention doivent respecter ces principes [10, 7] :

- **Supprimer le danger ou diminuer le niveau de danger** : En remplaçant un produit, un outil. En supprimant un obstacle, une ouverture...
- **Réduire l'exposition au danger** : En diminuant ou modifiant l'exposition au danger (sur les matériels, les procédés, l'organisation, la formation...).
- **Réduire les conséquences du contact entre l'individu et le danger** : En utilisant des équipements de protection, des équipements d'arrêt d'urgence, une bonne organisation des secours...

Après avoir réalisé l'évaluation des risques dans les différentes unités de travail, l'établissement devra rédiger son programme d'actions de prévention. On devra agir dans les trois directions suivantes :

#### ✓ **Organisationnel**

- Commission Hygiène Sécurité (ou Comité).
- Organisation du travail.
- Organisation des secours (évacuation incendie...).
- Secouristes, chargés d'évacuation, responsables de zones.
- Présence de personnel de santé dans l'établissement.
- Consignes.

#### ✓ **Technique**

- Utilisation des Equipements de Protection Individuel (EPI).

- Gestion des produits dangereux, des déchets, des matériels...
  - Utilisation et maintenance des locaux, des installations, des équipements de travail.
  - Maîtrise de l'environnement (bruit, température, aération...).
  - Vérifications et contrôles périodiques.
- ✓ **Humain**
- Qualification et statut des personnels (agents, administratifs...).
  - Formation des personnels.
  - Information des personnels.
  - Compétences des personnels.
  - Suivi médical.

Pour chaque risque évalué on précisera les mesures de prévention existantes, l'appréciation des moyens existants (corrects, à améliorer, à redéfinir ou à mettre en place).

## II-6. CONCEPT DE BASE SUR L'ANALYSE PAR SURETE DE FONCTIONNEMENT

La complexité croissante des systèmes industriels, la réduction de leurs coûts de conception et d'exploitation ainsi que leurs importantes utilisations dans la vie font, de la sûreté de fonctionnement, un domaine incontournable dans le développement de tout système industriel [22].

### II-6-1. DEFINITION DE LA SDF [22, 23]

La sûreté de fonctionnement (SdF) est une notion générale qui se caractérise comme la science des défaillances, l'analyse de risque, ou bien fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité. Elle englobe la connaissance des défaillances, leurs évaluations, leur prévision et leur maîtrise. Elle se caractérise à la fois par les études structurelles statiques et dynamiques des systèmes, du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects probabilistes et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines. Cette discipline intervient non seulement au niveau des systèmes déjà réalisés mais aussi au niveau conceptuel.

- ❖ Au sens large, la Sûreté de Fonctionnement sera définie comme la Science des défaillances ; elle inclut ainsi leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise.
- ❖ Au sens strict, la sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

La Sûreté de Fonctionnement est basée sur :

- Des méthodes et des outils servant à caractériser et à maîtriser les effets des aléas, des pannes et des erreurs,
- La quantification des caractéristiques de composants et de systèmes pour exprimer la conformité dans le temps de leurs comportements et de leurs actions.

La Sûreté de Fonctionnement ne se réduit pas uniquement à une de ces performances de fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité, mais elle se construit à travers toutes ces caractéristiques.

## II-6-2. COMPOSANTS DE LA SDF

Prévoir qu'un système tombe en panne fait appel à des critères probabilistes, obtenus à partir des paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité) afin de définir les objectifs attendus par un système et d'évaluer sa qualité de service attendu en vue de cibler les points critiques à améliorer [22, 23].

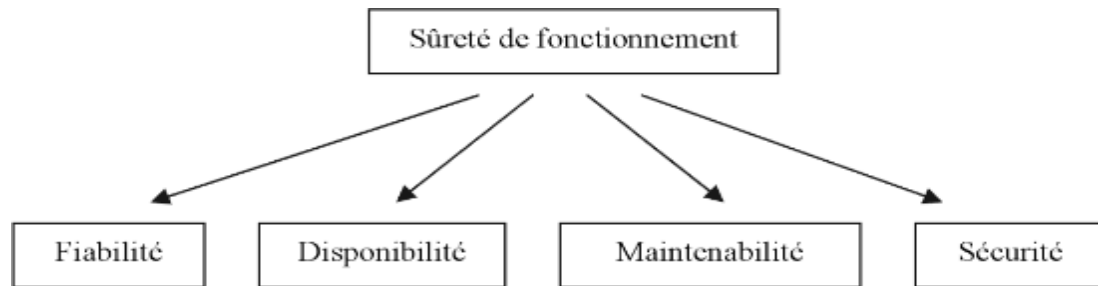


Figure 14 : Les composantes de la sûreté de fonctionnement [23]

### II-6-2-1. La fiabilité :

C'est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée.

La fiabilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E accomplisse une fonction requise, dans les conditions données, pendant l'intervalle de temps [0, t] :

$$R(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]]$$

L'aptitude contraire sera dénommée « défiabilité » : sa mesure est notée F(t)

$$F(t) = 1 - R(t)$$

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (Figure 2.1), de telle manière que :  $R(t_1) > R(t_2)$  si  $t_1 < t_2$ .

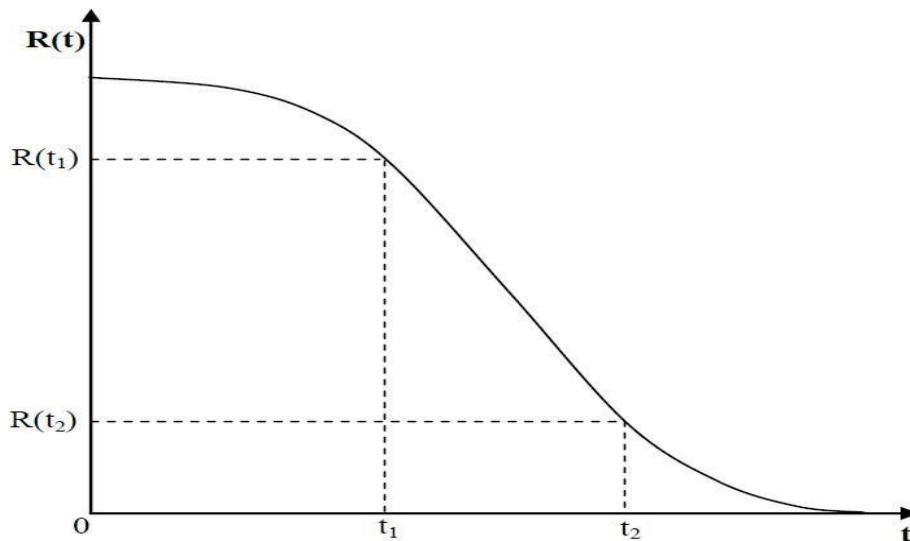


Figure 15 : La fiabilité décroissante avec le temps [22]

### II-6-2-2. La disponibilité

C'est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant donné.

La disponibilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données et à un instant t donné :

$$A(t) = P [E \text{ non défaillante sur } [0, t]]$$

L'aptitude contraire sera dénommée « indisponibilité » ; sa mesure est notée  $U(t)$  :

$$U(t) = 1 - A(t)$$

De nombreux concepts liés à celui de disponibilité ont été définis ; exemples : durée de disponibilité, durée d'indisponibilité, état de disponibilité, MDT.

### II-6-2-3. La maintenabilité

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits.

La maintenabilité est généralement mesurée par la probabilité que la maintenance d'une entité (E) accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t, sachant que l'entité est défaillante au temps  $t = 0$  :

$$M(t) = P [\text{la maintenance de E est achevée au temps t}]$$

Dans un souci de simplification, on peut écrire :

$$M(t) = P [E \text{ est réparée sur } [0, t]]$$

#### II-6-2-4. La sécurité

C'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

La sécurité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité E évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

L'aptitude contraire sera dénommée « insécurité ».

#### II-6-3. METRIQUES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT [24]

Le fonctionnement d'un système peut également se caractériser par l'espérance mathématique des différentes durées représentées sur le schéma de la figure

- ❖ MTTF (Mean Time To Failure) : Durée moyenne de bon fonctionnement avant la première défaillance.
- ❖ MUT (Mean Up Time) : Durée moyenne de bon fonctionnement.
- ❖ MDT (Mean Down Time) : Durée moyenne d'indisponibilité (détection, réparation plus remise en service).
- ❖ MTTR (Mean Time To Repair) : Durée moyenne de réparation (MTTR 5MOT)
- ❖ MTBF (Mean Time Between Failure) : Durée moyenne entre deux défaillances consécutives.

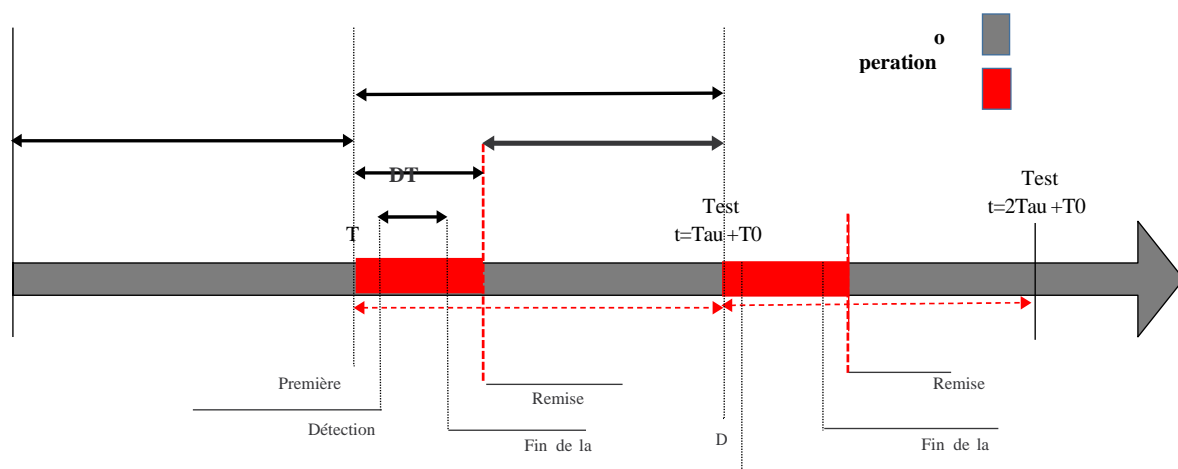


Figure 16 : Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

#### II-7. SUIVI ET MISE A JOUR DU DOCUMENT

Le document unique doit être dynamique afin d'observer les modifications, le texte prévoit la mise à jour du document unique en cas d'information supplémentaire, information qui sera transcrite dans le document, ce sont les résultats de l'évaluation qui seront modifiés pour tenir compte notamment de [14] :

- Modifications que cette information nouvelle peut apporter sur l'existence des dangers
- Modifications que l'information nouvelle apporte sur les conditions d'exposition aux dangers, soit l'information supplémentaire permet de déduire quelque chose par rapport au

risque identifié précédemment, et dans ce cas la mise à jour du document sera nécessaire, soit l'information supplémentaire n'apporte rien et aucune mise à jour ne sera utile.

## II-8. DOCUMENTS COMPORTANT DES INFORMATIONS UTILES A L'EVALUATION DES RISQUES [14]

- ✓ **Les notices de postes** permettant d'informer les travailleurs des conditions d'utilisation ou de maintenance des équipements de travail, des instructions ou consignes les concernant, de la conduite à tenir face à certaines situations anormales prévisibles.
- ✓ **Les fiches de données de sécurité** établies, lors de la mise sur le marché de produits chimiques comportant les renseignements nécessaires à la prévention et la sécurité lors de leur utilisation.
- ✓ **La fiche d'entreprise** établie par le médecin du travail et transmise à l'employeur, consignait notamment les risques professionnels et les salariés exposés à ces risques.
- ✓ **La liste des postes présentant des risques particuliers** pour la santé et la sécurité des salariés temporaires (CDD, intérim) qui doit être établie par l'employeur, après avis du médecin du travail.
- ✓ **La surveillance médicale particulière** assurée par le médecin du travail auprès de salariés affectés à certains travaux ou à des risques spéciaux.
- ✓ **Le registre des accidents du travail** consignait les accidents intervenus dans l'établissement.
- ✓ **La déclaration** à la caisse d'assurance maladie en cas d'utilisation de certains procédés de travail susceptibles de provoquer des maladies professionnelles.



**CHAPITRE III : GENERALITES SUR LA SURETE DE FONCTIONNEMENT****III-1. INTRODUCTION :**

Les préoccupations dites de sécurité sont très présentes dans le monde des machines-outils ou dans les procédés continus comme la pétrochimie. Dans les applications de type manufacturier, les préoccupations sont plutôt liées à la disponibilité. Dès lors que la sécurité ou la disponibilité d'un système est mise en défaut, on incrimine sa fiabilité. Enfin, en cas de dysfonctionnement, il convient de remettre le système en conditions de fonctionnement initial ; c'est là qu'intervient la maintenabilité. Ces quatre caractéristiques constituent la sûreté de fonctionnement (Sdf) d'un dispositif, ce à quoi s'attache l'essentiel de ce chapitre, en passant en revue les composantes fondamentales. Par ailleurs quelques événements ou dates clefs permettent de fixer l'évolution chronologique de la sûreté de fonctionnement [26].

**III-2. HISTORIQUE :**

1940 -1950 : une discipline se développe sous le nom de « théorie de la fiabilité », suite à la comparaison des fréquences des pannes des avions utilisés pendant la deuxième guerre mondiale. Elle est appliquée à l'électronique dans l'aéronautique, la défense et le nucléaire.

1960 - 1970 : généralisation de cette approche probabiliste à d'autres composants : mécaniques, hydrauliques, électriques, puis aux hommes, aux logiciels... et développement de nouvelles méthodes (APR, Arbres de défaillances (AdD), AMDE...) permettant de maîtriser les risques.

1980 : Formalisation de l'approche globale de la sûreté de fonctionnement dans le cadre de la conception des systèmes complexes et l'apparition de plusieurs approfondissements qui se manifestent dans le développement : des bases de données de fiabilité, des méthodes d'analyse et de modélisation, des logiciels de calculs, des logiciels de modélisation, ...etc [27].

**III-3. DEFINITION :**

La sûreté de fonctionnement (dependability en anglais) d'un système (SdF) est définie comme la qualité du service délivré par un système, qualité telle que les utilisateurs de ce service puissent placer une confiance justifiée dans le système qui le délivre.

Son objectif est de connaître et de maîtriser les risques de dysfonctionnement des produits et des systèmes complexes, et en particulier leur fiabilité en mettant en œuvre des méthodes prévisionnelles, expérimentales et opérationnelles appropriées. Elle est caractérisée par quatre principales composantes : Fiabilité (Reliability), Maintenabilité (Maintainability), Disponibilité (Availability) et la Sécurité (Safety) et se nomme alors FMDS (RAMS).

En plus, l'évolution technologique a contribué à l'apparition d'autres attributs à savoir : la qualité, le facteur humain et l'ergonomie.

Cette discipline intervient non seulement au niveau de systèmes déjà construits mais aussi au niveau conceptuel pour la réalisation des systèmes [28].

**III-4. LE BUT DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT :**

L'objectif de la sûreté de fonctionnement : mesurer la qualité de service délivré par un système, de manière à ce que l'utilisateur ait en lui une confiance justifiée.

Cette confiance justifiée s'obtient à travers une analyse qualitative et quantitative des différentes propriétés du service délivré par le système, mesurée par les paramètres probabilistes associées : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité [29].

**III-5. MESURES DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT :**

Généralement, la sûreté de fonctionnement est considérée comme la science des défaillances est définie par les paramètres suivants :

**III-5-1. FIABILITE :**

La fiabilité  $R(t)$  est l'aptitude d'un système S à accomplir une fonction requise [32], dans des conditions données sur l'intervalle  $[0, t[$

$$R(t) = P\{S \text{ non défaillant sur } [0, t[ \}$$

La fiabilité est l'appui à favoriser pour augmenter la disponibilité tout en tenant compte de l'objectif d'optimisation du coût. Cette grandeur peut être quantifiée par ces deux indicateurs :

La durée moyenne sans panne (MTTF), et la moyenne des temps de bon fonctionnement entre défaillances consécutives (MTBF).

Elle représente la probabilité  $R(t)$  que l'entité E accomplissant ses fonctions dans l'intervalle  $[0, t]$ . Elle est caractérisée par sa courbe  $R(t)$  appelée « loi de survie » et son taux de défaillance  $\lambda(t)$ .

$$R(t) = P[E \text{ non défaillante sur } [0, t]]$$

Dans ce contexte, on introduit également le terme de la dé-fiabilité ou la fonction de défaillance, noté  $F(t)$ , qui est, à l'inverse de la fiabilité, représente la probabilité que l'entité E ait connu une défaillance avant l'instant  $t$ .

$$F(t) = P[E \text{ défaillante sur } [0, t]]$$

Il va de soi que la fonction de défaillance ne peut être que le complément de la fonction de fiabilité [27].

$$F(t) = 1 - R(t)$$

**Calcul de la MTBF :**

La fiabilité peut se caractériser par la Moyenne des temps de bon fonctionnement ou MTBF (Mean Time Between Failure).

Il se calcule ainsi :

- Si le MTBF est calculé suite à un TBF

$$MTBF = \text{Temps total d'opération} / \text{Nombre d'arrêts} + 1$$

- Si le MTBF est calculé suite à un TA

$$MTBF = \text{Temps total d'opération} / \text{Nombre d'arrêts}$$

### Exemple :

Fonctionnement d'un équipement sur 24 heures

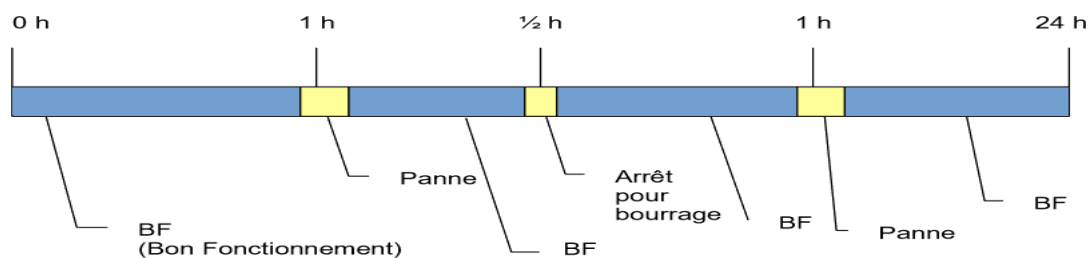


Figure 17 : Fonctionnement d'un équipement

$$MTBF = 21,50 / 4 = 5,375 \text{ heures}$$

### Taux de défaillance $\lambda$ :

Le taux de défaillance instantané est le taux de défaillance d'un système ayant fonctionné pendant une durée  $t$  [31].

Appelé également taux de panne, il est égal à l'unité de temps sur la MTBF.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Généralement, pour mesurer la fiabilité, on fait appel à la fonction du taux de défaillance.

Elle représente le taux de défaillance exprimé comme le pourcentage de défauts ou de pannes [27]. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\lambda(t) = \frac{P[E \text{ d'èfaillante sur } [t, t + dt] | \lambda(t) \text{ sans d'ètre d'èfaillante sur } [0, t]]}{P[E \text{ non d'èfaillante sur } 0, t]}$$

Pour un équipement (système réparable) le taux de défaillance se traduit souvent par une courbe dite « courbe en baignoire » [31], mettant en évidence 3 époques :

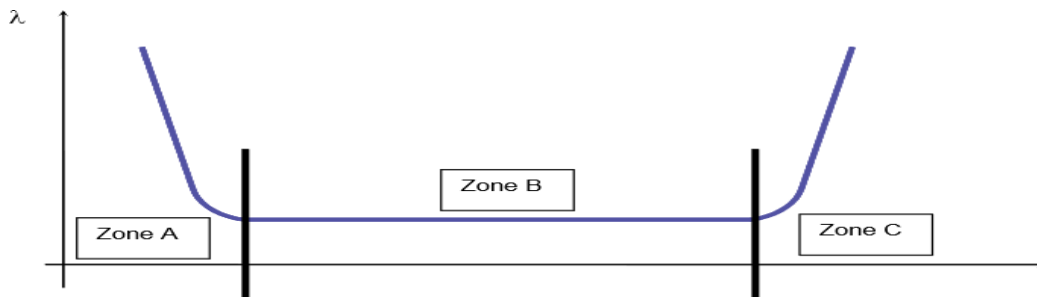


Figure 18 : Courbe en baignoire

- Zone A => époque de maturité, fonctionnement normal, défaillance aléatoire indépendante du temps
- Zone B => époque de jeunesse
- Zone C => époque d'obsolescence, défaillances d'usure ou pannes de vieillissement.

**Fiabilité des systèmes :**

Systeme en série :

Un système série se caractérise par l'enchaînement linéaire de n éléments (Figure 19).

D'après sa structure, la défaillance de l'un de ses n composants entraîne la défaillance du système complet car chaque élément dépend de l'élément qui le précède [30].

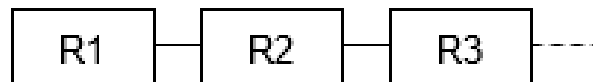


Figure 19 : Système série

La fiabilité du système en série se calcul :

$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t) \times \dots \times R_n(t)$$

Systeme en parallèle :

Un système est dit en parallèle s'il suffit qu'un seul des éléments fonctionne pour que le système fonctionne.

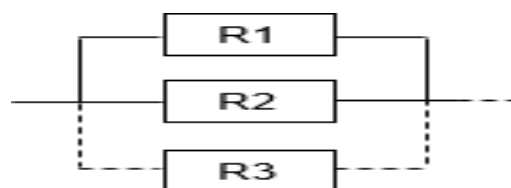


Figure 20 : Système parallèle

La fiabilité résultante est donnée par

$$R(t) = 1 - \sum_{i=1}^n [1 - R_i(t)]$$

La fiabilité du système en parallèle se calcule ainsi :

$$R(t) = 1 - ((1 - R_1(t)) \times (1 - R_2(t)) \times \dots \times (1 - R_n(t)))$$

**Remarque :**

Plus il y a des composantes en parallèle, la fiabilité est meilleure.

Habituellement, on utilise cette propriété pour accroître la sécurité de fonctionnement d'un système [30].

**Exemple :**

- Système de freins d'urgence sur une automobile
- Deux pompes en parallèle.

**III-5-2. MAINTENABILITE :**

La maintenabilité s'entend, pour une entité utilisée dans des conditions données, comme la probabilité pour qu'une opération donnée de maintenance puisse être effectuée sur un intervalle de temps donné, lorsque la maintenance est assurée dans des conditions données et avec l'utilisation de procédures et moyens prescrits.

L'indicateur MTTR : temps moyen pour réparer, exprime la moyenne des temps de tâches de réparation. Il est calculé en additionnant les temps actifs de maintenance ainsi que les temps annexes de maintenance, le tout divisé par le nombre d'interventions [33].

Les principaux indicateurs de la maintenabilité sont :

MTTR : moyenne des temps de réparation (Moyenne des Temps de Taches de Réparation).

$\mu$ : taux de réparation.

$$MMTR = \frac{\text{Somme des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparations}}$$

En considérant que  $\mu$  est constant dans le temps [34].

$$\mu = \frac{1}{MMTR}$$

**III-5-3. DISPONIBILITE :**

La disponibilité est la probabilité pour qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à instant t, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée [35]. On la note D(t) ou A(t).

$$D(t) = A(t) = P \text{ (système non défaillant à l'instant } t \text{)}$$

Le fonctionnement à l'instant  $t$  ne nécessite pas forcément le fonctionnement sur  $[0, t]$ , pour un système réparable ; c'est là que se situe la différence fondamentale avec la fiabilité.

Les grandeurs moyennes associées à la disponibilité les plus courantes sont :

- Le temps moyen de disponibilité (TMD) ou durée de bon fonctionnement après réparation, ou Mean Up Time (MUT) : durée moyenne de fonctionnement après la réparation et la défaillance suivante ;
- Le temps moyen d'indisponibilité (TMI) ou durée moyenne d'indisponibilité,
- Ou Mean Down Time (MDT) : durée moyenne entre une défaillance et la remise en état suivante ;
- La durée moyenne entre défaillance notée MTBF (Mean Time Between Failure) : durée moyenne entre deux défaillances consécutives de l'entité. En général, on a la relation :

$$MTBF = MUT + MDT$$

$$MMTR = \frac{\text{Temps de bon fonctionnement}}{\text{nombre de périodes de bon fonctionnement}}$$

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Pour les industries disposant d'équipes performantes de maintenance [36], la valeur de (A) est supérieure à 80 %.

#### III-5-4. SECURITE :

La sécurité (Safety en anglais) est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Elle est caractérisée par la probabilité  $S(t)$  que l'entité  $E$  ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = P [E \text{ évité des événements critiques ou catastrophiques sur } [0, t]]$$

Il est à noter que dans le domaine de l'informatique la sécurité a souvent deux facettes :

La sécurité-innocuité (Safety en anglais) qui vise à se protéger des défaillances catastrophiques et la sécurité-confidentialité (Security en anglais) qui correspond à la prévention d'accès ou de manipulations non autorisées de l'information et concerne la lutte contre les fautes intentionnelles [37].

#### III-6. QUELQUES LOIS USUELLES :

##### III-6-1. LOI EXPONENTIELLE :

Cette loi peut modéliser de différents phénomènes dans plusieurs domaines. Enradioactivité, chaque atome radioactif possède une durée de vie qui suit une loi exponentielle.

En fiabilité électronique, elle est la loi la plus couramment utilisée lorsque le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant [38]. Notamment, la loi exponentielle modélise les systèmes qui ont une durée de vie qui ne se dégrade pas et qui ne s'améliore pas.

Cela s'interprète par une absence de vieillissement et une absence de rajeunissement pendant la durée de vie utile d'un composant. Elle décrit la zone B de la courbe en baignoire.

Elle se caractérise par un seul paramètre, le taux de défaillance  $\lambda$ . Sa fonction de répartition prend la forme :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Sa fonction de densité est exprimée :

$$f(t) = F'(t) = e^{-\lambda t}$$

Or la fiabilité est définie comme le complément de la fonction de répartition, alors :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$$

La durée de vie moyenne ou MTTF.

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

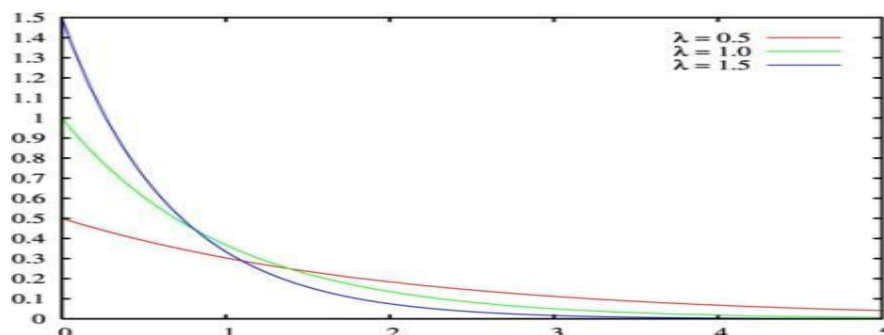


Figure 21 : Densité de probabilité.

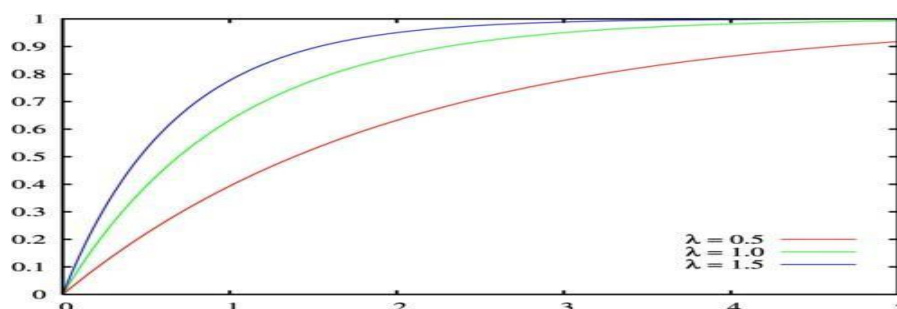


Figure 22 : Fonction de répartition.

**III-6-2. LA LOI DE WEIBULL :**

Le modèle Weibull standard est très souple et peut s'adapter avec d'autres lois de fiabilité car étant doté de trois paramètres [39].

C'est pour cette raison qu'il est universellement utilisé dans les études de fiabilité des équipements ou des composants.

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\delta)^\beta}{\eta}}$$

- Si  $t > \delta \gg F(t) = 0$
- Si  $t \leq \delta \gg$  Elle comporte 3 paramètres :
  - $\beta$  : paramètre de forme  $\in ]0, +\infty[$ .
  - $\eta$  : Paramètre d'échelle  $\in ]0, +\infty[$ .
  - $\gamma$  : paramètre de localisation par rapport à l'origine  $\in ]-\infty, +\infty[$ .

La fonction de la fiabilité, le taux de défaillance et de probabilité de la loi de Weibull est la suivante [40] :

$$R(t) = e^{-\frac{(t-\delta)^\beta}{\eta}}$$

$$\lambda(t) = \frac{d}{dt} \left( \frac{(t-\delta)^\beta}{\eta} \right) = \frac{\beta}{\eta} (t-\delta)^{\beta-1}$$

**Papier de Weibull :**

Le papier de Weibull sert à lire graphiquement les paramètres d'une cette loi dans le cas  $\gamma$  est nul. En effet, la fonction de répartition associée à une loi de Weibull de paramètres  $\beta, \gamma = 0, F$  est définie par :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}$$

$$\ln(1 - F(t)) = -\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$-\ln(1 - F(t)) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln \frac{t}{\theta}$$

$$\ln(-\ln(1 - F(t))) = \beta \ln t - \beta \ln \theta$$

$$y = \beta x - \beta \ln \theta$$

La dernière équation obtenue est l'équation d'une droite dans le repère rouge (O ; X ; Y), où O est le point correspondant à  $X = 0$  et  $Y = 0$  soit à  $t = 1$  et  $F(t) = 1 - 1/e$ . Le paramètre se lit directement à l'intersection de la droite précédente avec l'axe des abscisses puisque celui-ci est gradué en échelle logarithmique [41].

Le paramètre est le coefficient directeur de la droite précédente, il suffit de tracer une droite parallèle à la précédente et de lire directement le coefficient directeur de cette droite sur l'axe d'équation  $X = -1$ .



**Echelles utilisées sur le papier de Weibull :**

- Abscisse haute : échelle naturelle en X
- Abscisse intermédiaire : échelle logarithmique (lecture du paramètre t)
- Abscisse basse : échelle logarithmique (on fait correspondre à chaque valeur de t son logarithme népérien ln t).
- Ordonnée gauche : on place les valeurs de F (t) en pourcentage en échelle

$$\text{Ln} (- \ln (1 - F (t)))$$

- Ordonnée sur l'axe X = -1 (lecture du paramètre) : ce sont les valeurs.

$$\text{Ln} (- \ln (1 - F (t)))$$

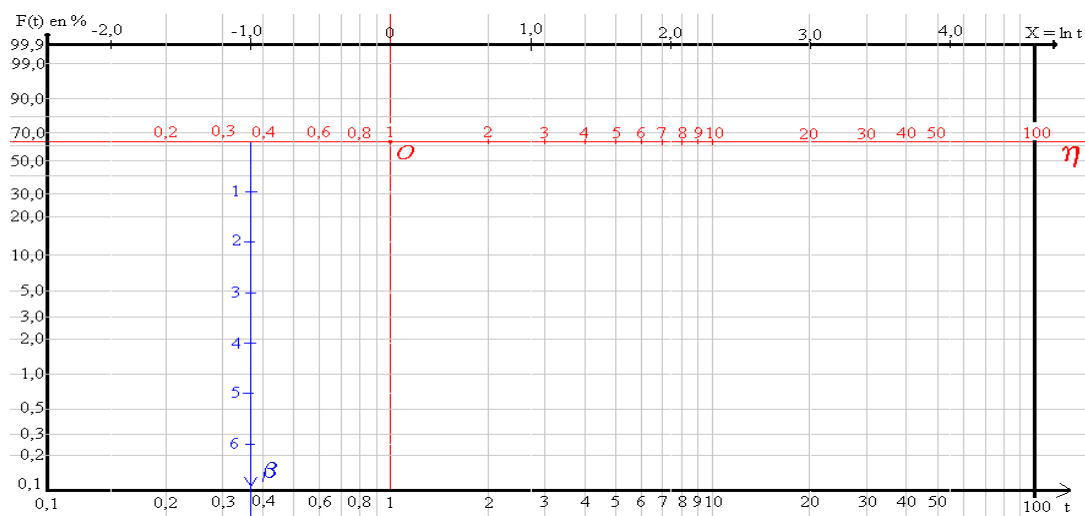


Figure 23 : Papier de Weibull.

**III-6-3. LOI GAMMA :**

La loi Gamma est une loi de probabilité de densité de paramètre  $\lambda > 0, s > 0$ , Elle est notée  $\Gamma(s, \lambda)$ .

$$\Gamma(s, \lambda).$$

$$f(t) = \frac{\lambda}{\lambda \Gamma(s)} (\lambda t)^{s-1} e^{-\lambda t}$$

- $\lambda$  : est le taux ou débit de réponse
- $s$  : est le nombre de réponses qu'on attend

Le temps d'attente moyen sera donc de :

$$\mu = s \times \frac{1}{\lambda} \text{ (Unités de temps)}$$

Comme nous l'avons fait pour les modèles poissonniens, nous pouvons construire un modèle du débit de réponse à partir d'une ou de plusieurs variables indépendantes.

La moyenne d'un Gamma s'écrit

$$\mu = \frac{s}{\lambda}$$

on peut définir un modèle de régression inverse :

$$\mu = \frac{s}{\lambda} = \frac{s}{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}$$

peut aussi s'écrire :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\beta_0}{\lambda} = \frac{\beta_1}{\lambda} \times 1 + \dots + \frac{\beta_p}{\lambda} \times p = \beta_0 * + \beta_1 * X_1 + \beta_p *$$

Régression Gamma (lien log), Nous pouvons aussi observer que si  $\mu = \frac{s}{\lambda}$  alors :

$$\ln \mu = \ln s - \ln \lambda$$

Si nous pensons que l'effet des variables sur le temps d'attente est non plus additif mais multiplicatif (effet d'apprentissage ou d'accumulation) :

$$\lambda = e^{\beta_0} e^{\beta_1 X_1} e^{\beta_2 X_2} \dots e^{\beta_p X_p} = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p}$$

Alors on a un modèle log linéaire [42].

$$\ln \mu = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p$$

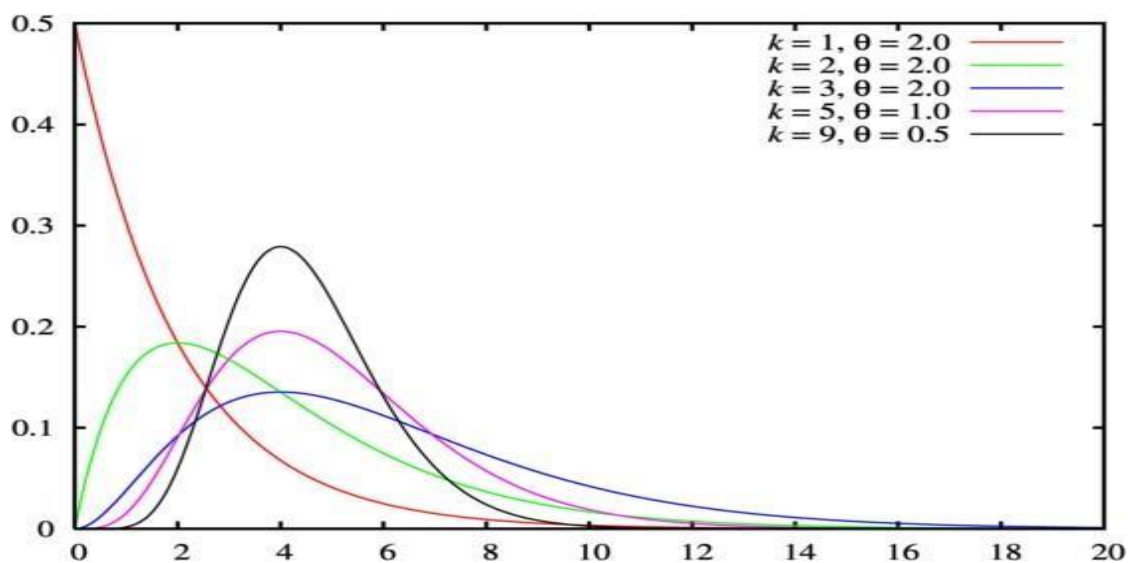


Figure 24 : Densité de probabilité.

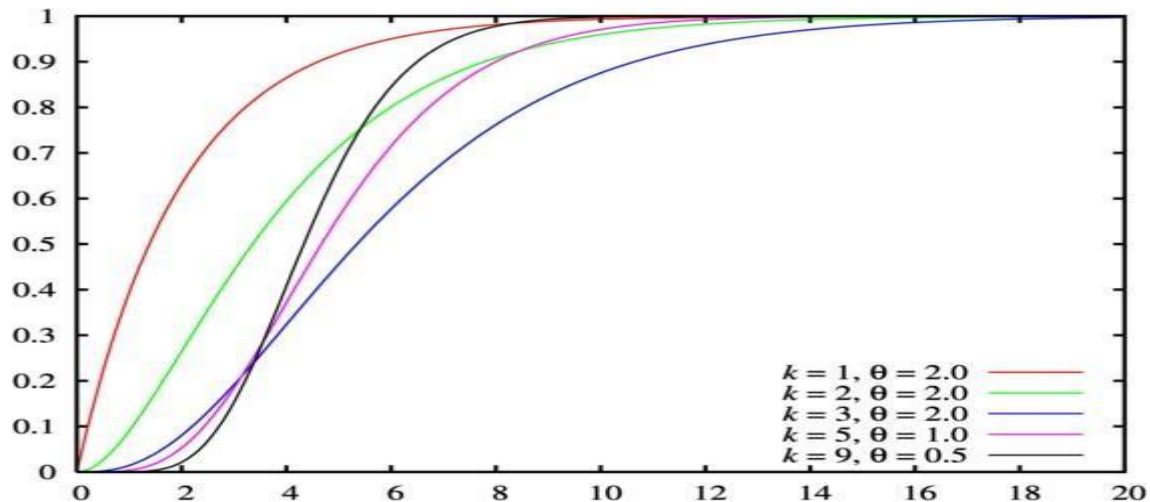


Figure 25 : Fonction de répartition.

### III-6-4. LA LOI NORMALE :

Une variable aléatoire réelle  $X$  suit une loi normale (ou loi gaussienne, loi de Laplace- Gauss) d'espérance  $\mu$  et d'écart type  $\delta$  (nombre strictement positif, car il s'agit de la racine carrée de la variance  $\delta^2$ ) si cette variable aléatoire réelle  $X$  admet pour densité de probabilité la fonction  $p(x)$  définie, pour tout nombre réel  $x$  [43], par :

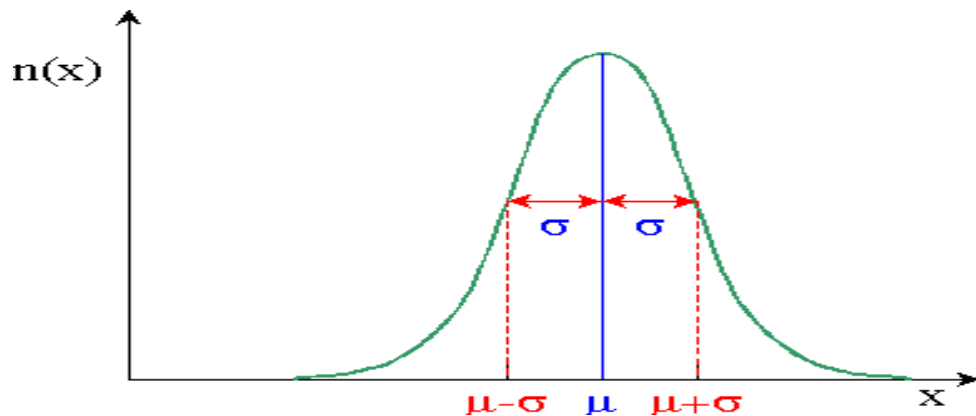
$$p(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2}$$

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus utile. Elle représente beaucoup de phénomènes aléatoires. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale [44].

Tout spécialement dans le cas des grands échantillons. Son expression mathématique est la suivante :

$$n(x) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- $\mu$ : est la moyenne
- $\sigma$ : l'écart type
- $n$ : le nombre total d'individus dans l'échantillon
- $n(x)$ : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur  $x$

Figure 26 : Densité normale avec  $\sigma$ .

### Calcul de la Moyenne et de la Variance

Nous allons montrer que la moyenne d'une variable qui suit une loi normale est égale à  $\mu$ , et que sa variance est égale à  $\sigma^2$ . La démonstration est uniquement calculatoire et pourra être omise [45].

La moyenne est, par définition, égale à :

$$E(X) = \frac{1}{(\sigma \times \sqrt{2\pi})} \int X e^{\frac{1}{2} \frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} dx$$

Pour calculer cette intégrale, faisons le changement de variable, classique pour les calculs sur la loi normale :

$$u = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

$$E(X) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int (\mu - \sigma u) e^{\frac{-u^2}{2}} du$$

La seconde intégrale est nulle. Quant à la première, elle est égale à  $\sqrt{(2\pi)}$ , ce qui se montre en posant :

$$I = \int e^{\frac{-2u^2}{2}} du$$

$$I^2 = \int \int e^{\frac{1}{2}(x^2+y^2)} du$$

Que l'on intègre facilement en passant en coordonnées polaires. D'où finalement :

$$E(X) = \mu$$

### La loi normale centrée réduite

On appelle densité de probabilité de Laplace-Gauss [46], la fonction  $F$  définie sur  $\mathbf{R}$  par :

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

On dit que la variable aléatoire  $X$  suit une loi normale centrée réduite, notée  $N(0, 1)$  si sa densité de probabilité est égale à la fonction  $f$ . Sa fonction de répartition  $F$  est donc définie par :

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt$$

- Le nombre  $F(a)$  représente l'aire du domaine délimité par cette courbe en cloche l'axe des abscisses et la droite  $x = a$ .
- La fonction  $F$  peut être considérée comme la primitive de la fonction  $f$  qui vérifie  $F(0) = 0,5$ .
- Avant l'arrivée des calculatrices, on avait des tables donnant les valeurs de  $F(a)$  pour les valeurs de  $a$  positives.

Si une variable aléatoire  $X$  suit une loi normale centrée réduite alors pour tous réels  $a$  et  $b$  tels que  $a \leq b$ . On a :

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a)$$

$$P(X \geq a) = 1 - F(a)$$

$$P(X \leq -|a|) = 1 - F(|a|)$$

### **Théorème Central Limite :**

Soit  $X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$ , une suite de  $n$  variables aléatoires indépendantes suivant la même loi d'espérance  $m$  et de variance  $\delta^2$ . Notons :

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}$$

Alors la suite de variables aléatoires  $\frac{\bar{X} - m}{\delta/\sqrt{n}}$  en loi converge vers la loi normale centrée réduite  $N(0,1)$ , ce qui signifie que [47].

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\bar{X} - m}{\delta/\sqrt{n}} < x\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

### **III-6-5. LOI LOG-NORMALE :**

La loi de Galton s'appelle également loi log-normale ou loi gaussienne-logarithmique car son expression est proche de celle de la loi normale à une anamorphose près de type logarithmique [48], sur la variable. On peut, en effet lui donner la représentation suivante :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- $x$  : est la variable qui est dans notre cas la pluie maximale journalière
- $\mu$  : est la variable centrée réduite

$$u = \frac{\ln(x_i) - M}{\sigma y}$$

- M : est la moyenne des logarithmes de la variable Pi :

$$M = \frac{\sum^N \ln(p_i)}{N}$$

- $\sigma y$  : est l'écart type :

$$\sigma y = \frac{\sum^N \ln(x_i - M)^2}{N + 1}$$

- Cv(y): Le coefficient de variation :

$$Cv = \frac{\sigma y}{M}$$

La droite de Galton ou loi log normale :

$$\ln x = \bar{\ln x} + u \sigma \ln x$$

$$P_{max, j(10\%)} = e^{\bar{\ln x} + u \sigma \ln x}$$

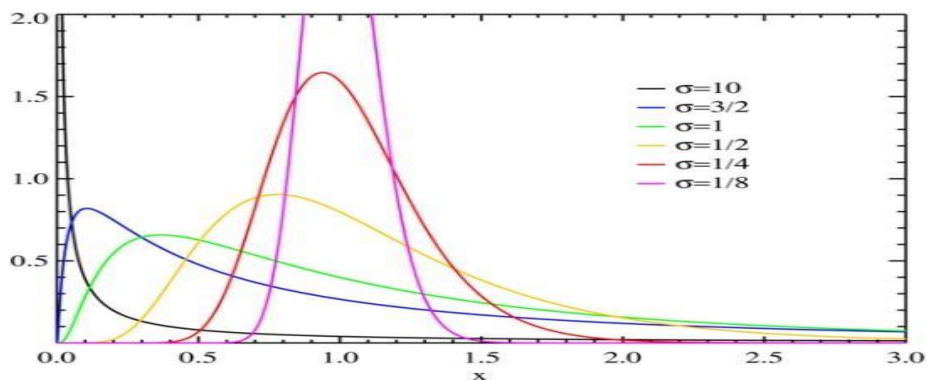


Figure 27 : Densité de probabilité  $\mu=0$ .

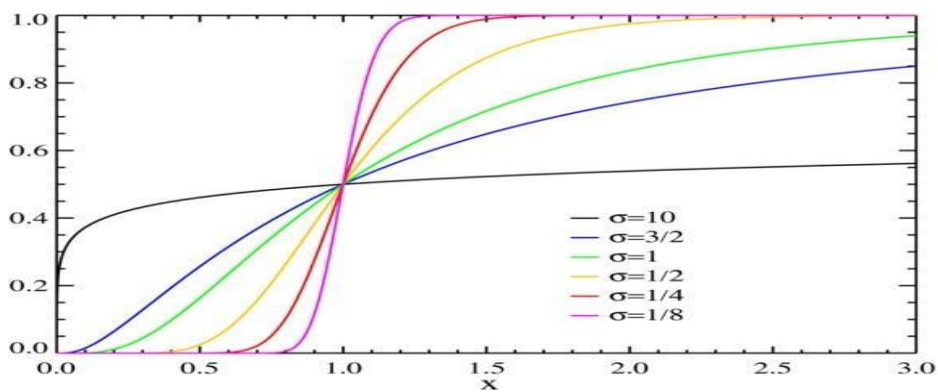


Figure 28 : Fonction de répartition  $\mu=0$ .

### **III-7. CONCLUSION :**

La sûreté de fonctionnement, est un terme générique rassemblant la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité, Elle est utilisable pour tous les systèmes et moyens de production.

L'étude de la fiabilité passe par plusieurs lois, parmi lesquelles, loi exponentielle, loi de weibull, loi gamma, loi normale et la loi log normale, Ces études facilitent le dialogue entre la conception, l'exploitation et le soutien.

## CHAPITRE IV : TERMINOLOGIE RELATIVE A LA SECURITE FONCTIONNELLE

### IV-1. INTRODUCTION

Les installations industrielles peuvent présenter des risques pour les personnes, les biens et l'environnement. Donc, de divers dispositifs de sécurités doivent être mises en œuvre. Ces types de sécurité utilisent des moyens contribuant soit à la prévention soit à la protection afin de minimiser les conséquences d'un dysfonctionnement. Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) sont utilisés en général comme moyens de prévention pour réaliser des Fonctions Instrumentées de Sécurité (SIF) afin de mettre le procédé surveillé dans une position de repli de sécurité.

Dans ce chapitre, nous procédons à clarifier certains termes et concepts de base tels que danger, risque, sécurité, sécurité fonctionnelle... Par la suite, nous citons les principales normes de sécurité utilisées pour concevoir les systèmes de protection. La définition des SIS et les paramètres caractéristiques (taux de défaillance, défaillance de cause commune...) qui interviennent dans l'évaluation de ses performances en fonction des événements rencontrés (défaillance, test) sont détaillés.

### IV-2. TERMES ET DEFINITIONS

#### IV-2-1. NOTION DE DANGER

La norme IEC 61508 [30] définit le danger comme : « une nuisance potentielle pouvant porter atteinte aux biens (détérioration ou destruction), à l'environnement, ou aux personnes ».

Selon le référentiel OHSAS 18001 [34] : « un danger est une source ou une situation pouvant nuire par blessure ou atteinte à la santé, dommage à la propriété et à l'environnement du lieu de travail ou une combinaison de ces éléments ». Les dangers liés à un système sont inhérents au fonctionnement ou au dysfonctionnement du système, soit extérieur au système.

Selon Mazouni [49] : « le danger se définit comme une propriété intrinsèque inhérente à un type d'entité ou un type d'événement qui a la potentialité de provoquer un dommage ».

La définition du mot danger que proposait par la 3SF [50] pour un système donné : « Le danger inhérent à un système est défini par le répertoire (la liste) des événements redoutés qu'il est susceptible d'engendrer ». La nature qualitative et descriptive du danger apparaît clairement dans cette définition.

#### IV-2-2. NOTION DE RISQUE

Selon Villemeur [51] : « le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences. »

Le risque peut être considéré comme une certaine quantification du danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement redouté à une estimation de la gravité de ses conséquences [52]. Le risque donne une mesure de la combinaison de deux facteurs qui sont la gravité d'un danger (ou sa conséquence) et la fréquence d'occurrence. Sa réduction peut être obtenue par la prévention (réduction de la fréquence d'occurrence) ou la protection (réduction de la gravité).



Le risque est caractérisé d'une part par l'ampleur des dommages, suite à l'occurrence d'un événement redouté, selon un critère de gravité, et d'autre part par son caractère incertain lié à l'apparition de l'événement redouté provoquant le dommage à partir d'une situation critique ou dangereuse [53].

Cependant, il existe de nombreuses définitions pour caractériser le sens du mot risque, la définition suivante est celle que l'on rencontre souvent : « la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un dommage et la gravité de ce dernier » [54].

Le terme combinaison est généralement matérialisé par une opération de multiplication, ce qui nous permet la formulation suivante :  $Risque (R) = Probabilité (P) \times Gravité (G)$ . La représentation graphique de cette relation est une droite ou une courbe décroissante. Elle dérive de la courbe dite de *Farmer* [55] et permet d'illustrer la partition de l'espace du risque en deux sous-ensembles disjoints, correspondant respectivement au domaine du risque acceptable et à celui du risque inacceptable (figure 29).

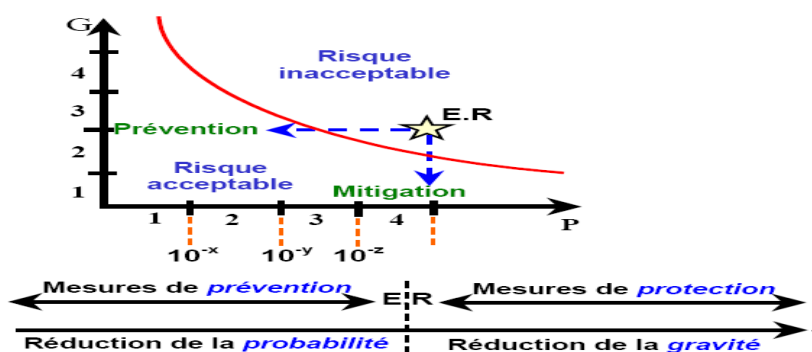


Figure 29 : L'espace du risque.

La figure suivante permet de bien apprécier l'interaction entre les notions de danger et de risque (émergence de la notion de situation dangereuse).

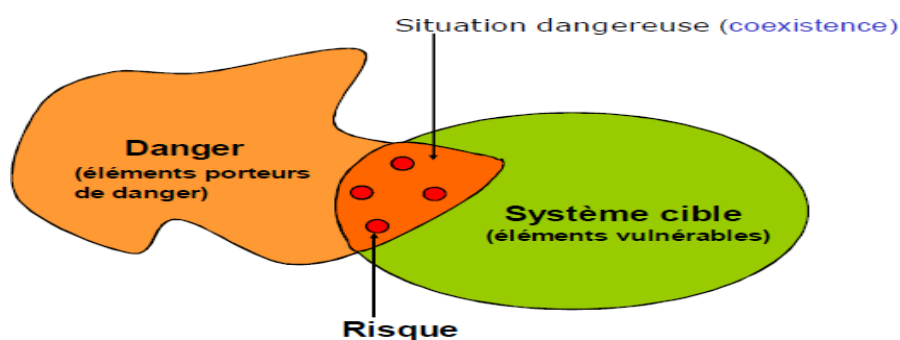


Figure 30 : Relation entre les notions de danger et de risque

En outre, la notion de risque industriel majeur est tout événement accidentel mettant en jeu des produits ou des procédés dangereux employés au sein d'un site industriel. Il est généralement caractérisé par [56] :

- Une gravité potentielle importante,
- Une probabilité d'occurrence faible ;
- Une cinétique rapide ;
- Des dommages potentiels humains et/ou matériels importants.

### IV-2-3. SECURITE FONCTIONNELLE

La sécurité fonctionnelle a pour objet de contrôler les risques inacceptables qui pourraient provoquer des accidents dangereux. Elle couvre les systèmes mettant en œuvre des solutions de protection appliquées dans plusieurs domaines : mécanique, électrique, électronique, hydraulique, optique, . . .

La sécurité fonctionnelle, selon la norme IEC 61508 [30], « est un sous ensemble de la sécurité globale qui se rapporte au système commandé et qui dépend du bon fonctionnement des systèmes relatifs à la sécurité basée sur une autre technologie et des dispositifs externes de réduction de risque.

Selon la norme IEC 61511 [57], la sécurité fonctionnelle est un sous- ensemble de la sécurité globale qui se rapporte à un système de commande de processus de base (BPCS, Base Process Control System) et qui dépend du fonctionnement correct du système instrumenté de sécurité et d'autres couches de protection.

### IV-2-4. SYSTEMES E/E/EP RELATIFS AUX APPLICATIONS DE SECURITE

Les systèmes de sécurité sont définis en termes d'absence de risque inacceptable de blessure ou de préjudice à la santé des personnes et à la dégradation de l'environnement.

Les dommages aux personnes peuvent être directs ou indirects, comme des dommages aux biens ou à l'environnement par exemple [58]. Certains systèmes peuvent être principalement conçus pour se prémunir contre des pannes ayant des implications économiques majeures. Ceci signifie que dans l'esprit, à objectifs techniques comparables ou identiques, il n'y a pas une grande différence entre un système de sécurité et un système de contrôle.

Un système E/E/EP (électrique/électronique/électronique programmable) relatif aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité, c'est-à-dire, depuis le capteur, en passant par l'unité logique de traitement, jusqu'à l'élément final (la partie actionneur), tout en tenant compte des actions de l'opérateur du système.

La norme IEC 61508 [30] peut être utilisée pour développer n'importe quel système E/E/EP comportant des fonctions critiques, telles que la protection des équipements, des biens ou de l'environnement.

## IV-3. NORMES RELATIVES A LA SECURITE FONCTIONNELLE

La norme internationale de sécurité IEC 61508 est une des dernières normes dédiées à la sécurité fonctionnelle. Elle est devenue avec ses normes filles les plus récentes et les plus connues des acteurs de la sécurité dans les secteurs industriels.

### IV-3-1. NORME CEI 61508 ET SES NORMES FILLES

La norme IEC 61508 [30] est un ensemble de règles et de recommandations permettant l'amélioration de la sécurité par l'utilisation des systèmes électriques, électroniques programmables E/E/EP. Cette norme propose une démarche opérationnelle permettant de mettre en place un système E/E/EP à partir de l'étude des exigences de sécurité issues notamment d'une analyse des risques.

L'avantage de cette norme est qu'elle propose des moyens de justification sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit en fonction du niveau de sécurité que l'on souhaite atteindre.

La norme IEC 61508 [30] se compose de sept volets comme suit :

- ✓ 61508-1 présente les définitions des prescriptions générales.
- ✓ 61508-2 traite les prescriptions spécifiques aspect matériel des systèmes E/E/EP.
- ✓ 61508-3 dédiée à la présentation des prescriptions spécifiques, aspect logiciel, des Systèmes E/E/EP. Elle est développée dans la troisième partie de la norme.
- ✓ 61508-4 présente les définitions et les abréviations utilisées.
- ✓ 61508-5 donne des exemples de méthode pour la détermination des niveaux d'intégrité desécurité.
- ✓ 61508-6 fournit les guides d'application des parties 2 et 3 de la norme.
- ✓ 61508-7 présente les techniques et les mesures recommandées lors de la validation des systèmes E/E/EP.

La complexité de la norme IEC 61508 [30] a conduit ses concepteurs à développer des normes relatives à des secteurs bien précis (ex : machines, processus industriels, ferroviaire, centrales nucléaires . . .). La figure 31 montre la norme IEC 61508 générique ainsi que ses normes filles selon le secteur d'activité concerné. Elle influence le développement des systèmes E/E/EP et les produits concernés par la sécurité dans tous les secteurs [59].

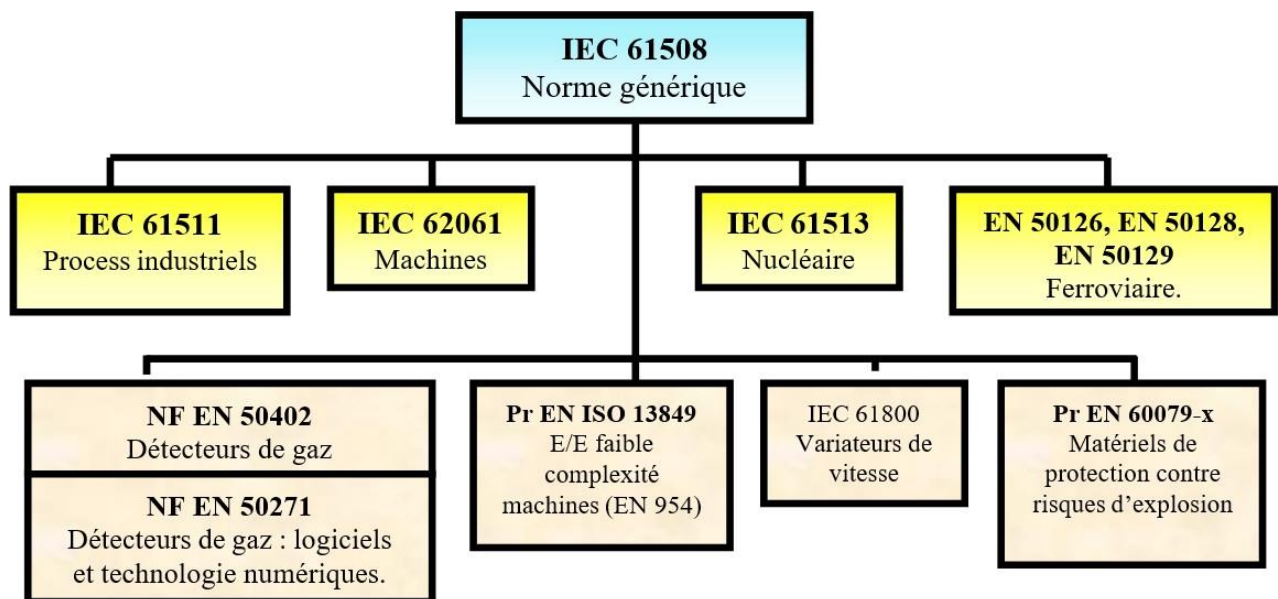


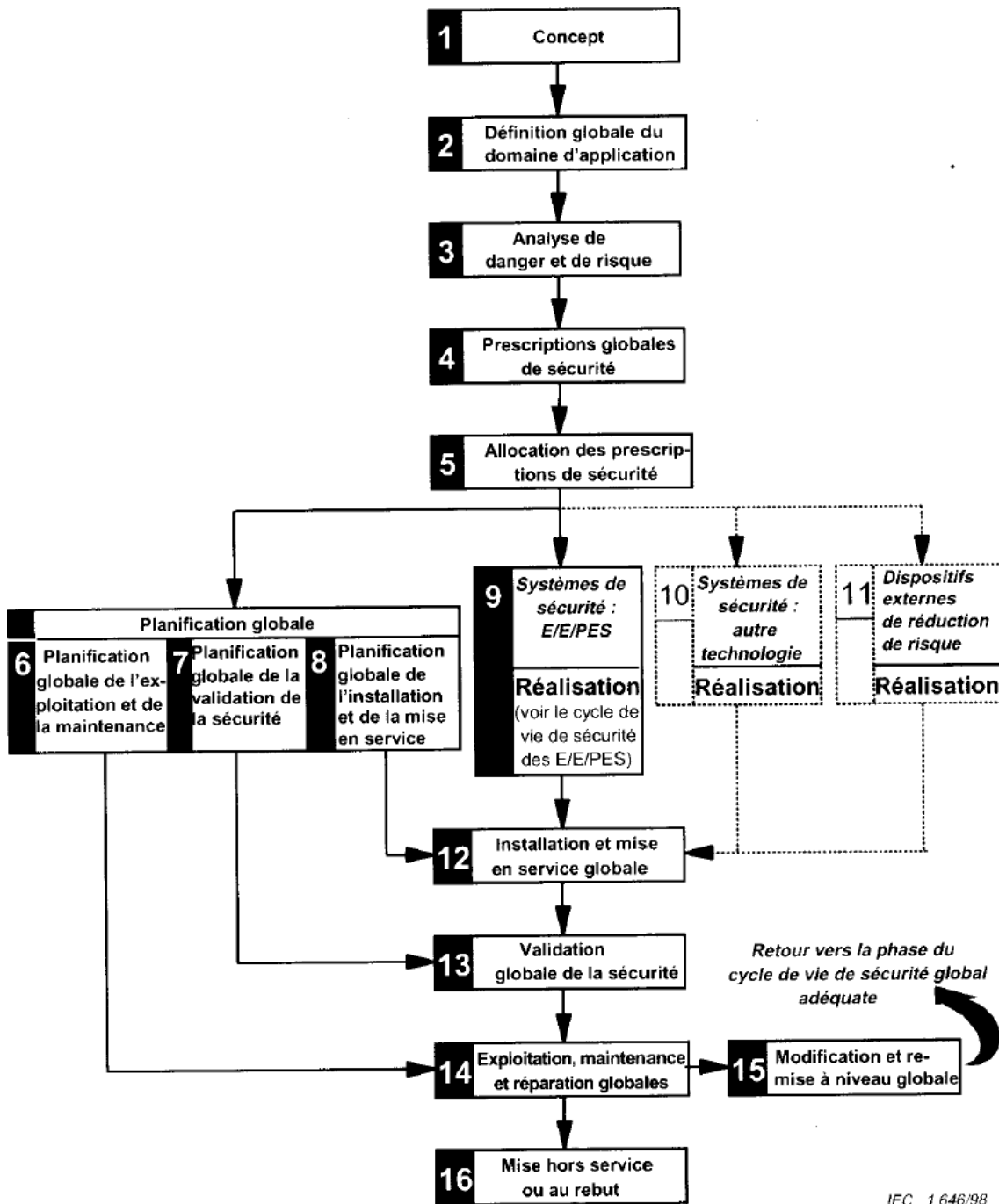
Figure 31 : CEI 61508 et ses déclinaisons par secteur d'application

Le principe fédérateur de cette norme est fondé sur le modèle de *cycle de vie globale de sécurité*, depuis la spécification, en passant par la conception, l'installation, l'exploitation et la maintenance, jusqu'à la mise hors service des SIS, comme montré à la figure 31. Le cycle de vie fournit un guide complet pour l'établissement des caractéristiques et spécifications relatives aux fonctions de sécurité allouées aux SIS.

Globalement, trois grandes parties dans le cycle de vie global de sécurité peuvent être distinguées :

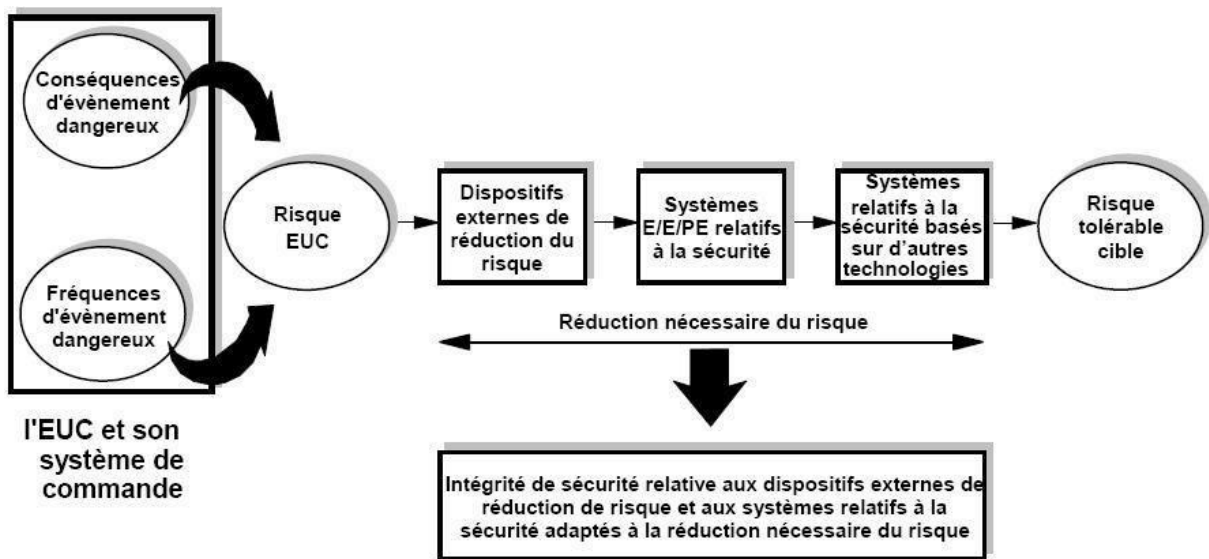
- Les premières étapes se basent sur une *analyse de risques* pendant laquelle l'ensemble des situations dangereuses (scénarios d'accident) est établi, en termes de gravité et de probabilité (fréquence) d'occurrence, afin d'en comparer la criticité à une valeur limite constituant l'objectif de sécurité à atteindre. Si cette criticité excède la valeur-seuil précitée, il sera alors nécessaire de la réduire. L'ampleur de cette réduction donne lieu à la définition de prescriptions globales de sécurité (phase 4) en termes de fonctions de sécurité et de prescriptions d'intégrité de sécurité qui sont ensuite déclinées en prescriptions particulières de sécurité (phase 5) allouées aux différents moyens de réduction de risques. Pour les *SIS*, ces prescriptions sont établies en termes de niveaux d'intégrité de sécurité (*SIL requis*) (voir figure 31). Plus la réduction de risque à réaliser est importante, plus le *SIL* est élevé. Ce constat souligne l'importance et le rôle capital que joue l'analyse de risques dans l'ensemble du cycle de vie. Nous allons plus loin donner quelques méthodes de détermination du *SIL requis*, telles décrites dans les références [30] et [60].
- Puis vient le cycle de vie inhérent au développement des moyens de réduction de risques (*SIS*, systèmes relatifs à la sécurité basés sur d'autres technologies, moyens externes de réduction de risques) : phases 9, 10 et 11. La CEI 61508 ne considère que les spécifications relatives au développement des systèmes instrumentés de sécurité (phase 9).
- Ces deux premières parties sont complétées par les phases d'installation et de validation globale de la sécurité, de fonctionnement et de modifications éventuelles, avec, le cas échéant, un retour à la phase adéquate du cycle de vie.

Il convient de noter que CEI 61508 recommande l'adoption et la mise en application du cycle de vie de sécurité dans le système de management de la sécurité (*SMS*) de l'établissement concerné.



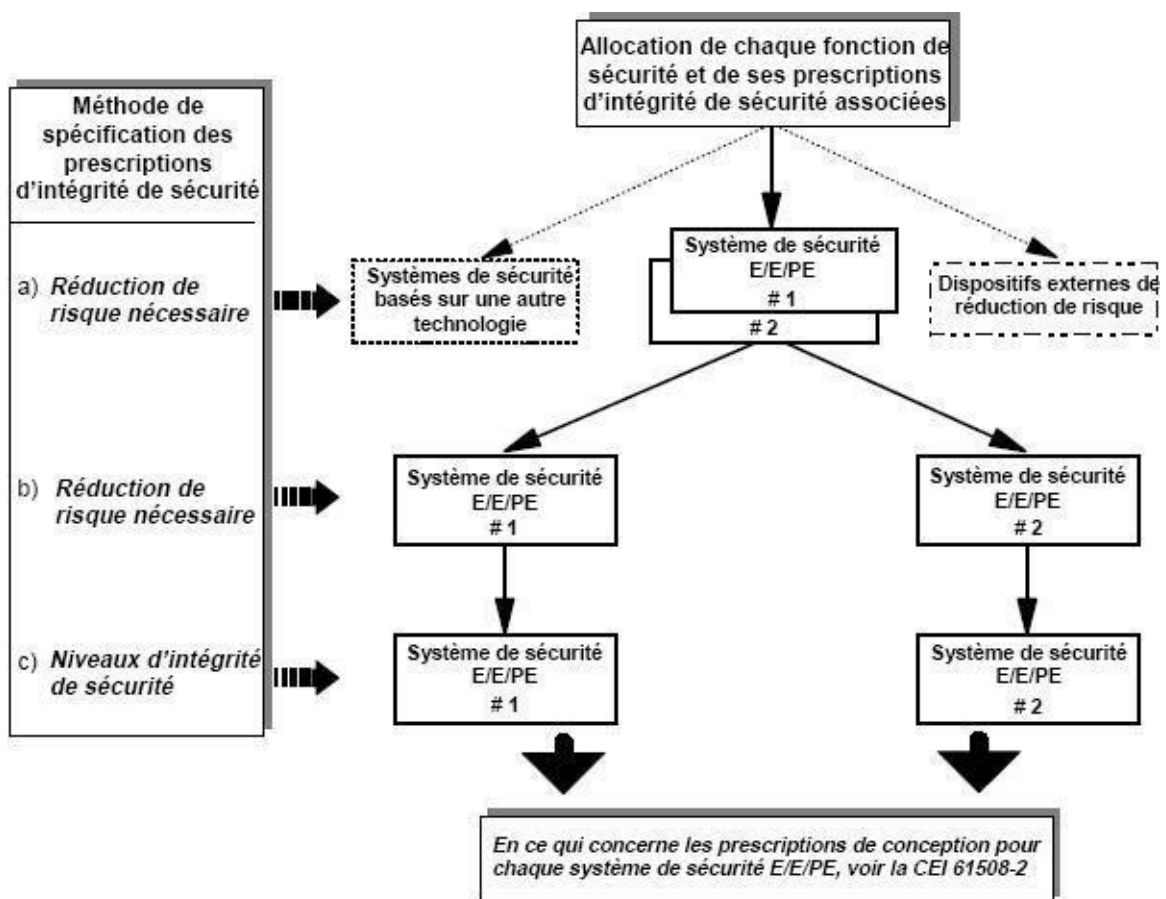
IEC 1646/98

Figure 32 : Cycle de vie de sécurité globale [60]



IEC 1 662/98

Figure 33 : Concept de risque et d'intégrité de sécurité



IEC 1 650/98

Figure 34 : Allocation des prescriptions de sécurité aux systèmes de sécurité E/E/PE (SIS), systèmes de sécurité basés sur une autre technologie et dispositifs externes de réduction de risque.

### IV-3-2. LIMITES DE LA NORME IEC 61508

Les limites de la norme IEC 61508 sont liées à la complexité et à la difficulté de son utilisation [61]. Plusieurs utilisateurs de l'IEC 61508 ont mentionné la nécessité d'être guidés, tant que ses notions paraient complexes, et difficiles à mettre en œuvre.

Beaucoup de prescriptions ne sont pas assignées à une certaine gamme des niveaux d'intégrité de sécurité ou à la complexité de la conception. Ceci rend la norme difficile à utiliser pour de petits projets et rend la gestion de la sécurité fonctionnelle trop chère pour des petites et moyennes entreprises.

La norme IEC 61508 [30] définit l'intégrité de sécurité comme propriété de l'installation complète de sécurité, du capteur à l'actionneur. En outre, les parties 2 et 3 de cette norme entrent dans le détail dans ; la conception et validation des systèmes E/E/EP de sécurité.

Pour réaliser la fonction de sécurité, l'utilisateur met en œuvre plusieurs sous-systèmes : capteur, unité de traitement, actionneur. Dans chacun des sous-systèmes, des composants peuvent être mis en redondance. La  $PF_{D_{avg}}$  de l'ensemble doit être calculée à partir des caractéristiques des composants et des architectures du système de sécurité [59].

Rappelons également que les données des entrées spécifiées dans la norme sont bien souvent difficiles à obtenir et sont souvent des approximations (taux de couverture de diagnostic, modes communs de défaillances...). La  $PF_{D_{avg}}$  devrait être aussi renommée, car sa dénomination prête à confusion. Il ne s'agit nullement d'une défaillance à la sollicitation classique, mais d'une indisponibilité moyenne sur un intervalle de temps spécifié [62,63].

### IV-3-3. SYSTEMES INSTRUMENTES DE SECURITE (SIS)

Les systèmes instrumentés de sécurité contribuent, avec les autres niveaux de protection, à la réduction du risque afin d'atteindre le niveau de risque tolérable. Ils constituent, probablement, l'une des mesures de réduction de risque les plus importantes. Sont exposés ci- après la définition et les modes de fonctionnement de ces systèmes.

#### IV-3-3-1. Définition d'un SIS

Un *SIS*, aussi appelé boucle de sécurité, est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) assurant la mise en état de sécurité des procédés lorsque des conditions prédéterminées sont atteintes.

Pour la norme CEI 61508 [64] définit les SIS comme suit : « un système E/E/PE (électrique/électronique/électronique programmable) relatifs aux applications de sécurité comprend tous les éléments du système nécessaires pour remplir la fonction de sécurité

».

La norme CEI 61511 [60] définit, quant à elle, les systèmes instrumentés de sécurité comme « système instrumenté utilisé pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité. Un SIS se compose de n'importe quelle combinaison de capteur(s), d'unité loriquet(s) et d'élément(s) terminal (aux) ».

L'architecture type d'un SIS est donnée à la figure 35. Voici un descriptif succinct de chacune de ses parties :

- Sous-système « *Eléments d'entrée (S : Sensors)* » : constitué d'un ensemble d'éléments d'entrée (capteurs, détecteurs) qui surveillent l'évolution des paramètres représentatifs du comportement de l'EUC (température, pression, débit, niveau...).
- Sous-système « *Unité logique (LS : Logic Solver)* » : comprend un ensemble d'éléments logiques (PLC, API) qui récoltent l'information en provenance du sous-système S et réalisent le processus de prise de décision qui s'achève éventuellement, si l'un des paramètres dévie au-delà d'une valeur-seuil, par l'activation du sous-système FE.
- Sous-système « *Eléments Finaux (FE)* » : agit directement (vanne d'arrêt d'urgence) ou indirectement (vanne solénoïdes, alarme) sur le procédé pour neutraliser sa dérive en le mettant, en général, dans un état sûr.

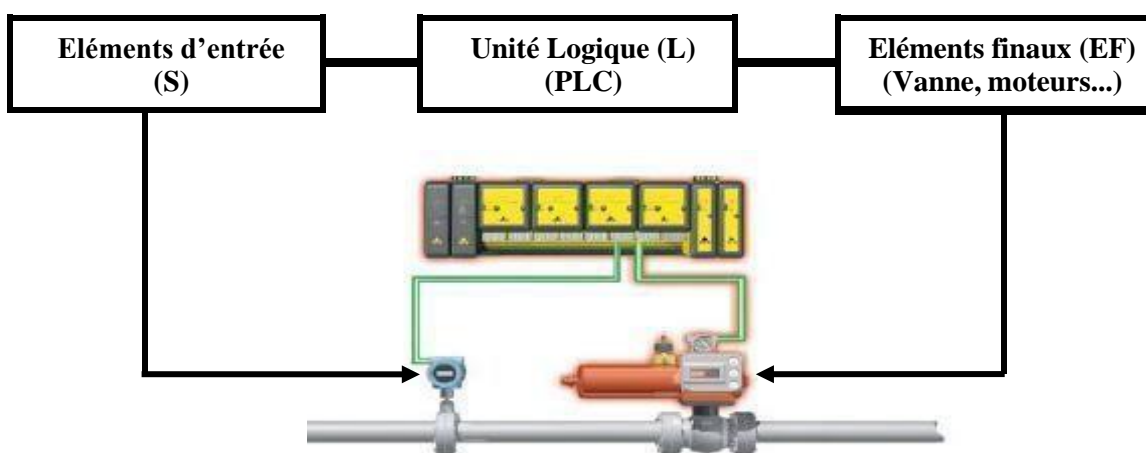


Figure 35 : Système instrumenté de sécurité (SIS ou SRS E/E/PE)

Les systèmes suivants en sont des exemples :

- ❖ Système d'arrêt d'urgence (*ESD : Emergency Shutdown Systems*), utilisé, par exemple, dans les industries chimique et pétrochimique.
- ❖ Système d'arrêt automatique de train (*ATS : Automatic Train Stop*), utilisé dans le domaine ferroviaire.
- ❖ Système de freinage de l'automobile.
- ❖ Air-bag.
- ❖ Système de détection de surface d'un avion.
- ❖ Equipements médicaux critiques de traitement et de surveillance.

#### IV-3-3-2. Intégrité de sécurité

La référence [64] la définit comme suit : « probabilité pour qu'un système relatif à la sécurité (SRS) exécute de manière satisfaisante les fonctions de sécurité requises dans toutes les conditions spécifiées et pour une période de temps spécifiée ». Elle indique également que cette définition est centrée sur la fiabilité des SRS dans l'exécution de leurs fonctions de sécurité.



Cette même référence, précise que l'intégrité de sécurité comprend l'intégrité de sécurité du matériel ainsi que l'intégrité de sécurité systématique. Elles sont définies ci-après.

- *Intégrité de sécurité du matériel* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité liée aux défaillances aléatoires du matériel en mode de défaillance dangereux.
- *Intégrité de sécurité systématique* : partie de l'intégrité de sécurité des systèmes relatifs à la sécurité qui se rapporte aux défaillances systématiques dans un mode de défaillance dangereux, en précisant que l'intégrité systématique ne peut normalement, ou précisément, être quantifiée, mais simplement considérée d'un point de vue qualitatif.

Les prescriptions concernant l'intégrité de sécurité des fonctions de sécurité à allouer aux *SIS* sont spécifiées en termes de niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) : niveau discret parmi quatre possibles, le *SIL* 4 possède le plus haut degré d'intégrité de sécurité. Sa détermination dépend du mode de fonctionnement du *SIS*.

#### IV-3-3-3. Modes de fonctionnement d'un SIS et mesures cibles de défaillances

Une fois le risque tolérable défini et la réduction nécessaire du risque estimée, les exigences d'intégrité de sécurité affectées au *SIS*, pour chaque fonction de sécurité, doivent être spécifiées (en termes de *SIL*) en fonction des mesures cibles de défaillances (voir tableau 2). L'notation de mesure cible de défaillances est désignée en matière de probabilité de défaillance dangereuse. Sa vocation diffère selon le mode de fonctionnement du système instrumenté de sécurité [55] :

- *Probabilité moyenne de défaillance* lors de l'exécution sur demande de la fonction spécifiée ( $PF_{D_{moy}}$ ), en mode demande faible. Ce mode de fonctionnement correspond à une fréquence de sollicitation de la *SIS* inférieure ou égale à  $1 \text{ an}^{-1}$  et également inférieure ou égale au double de la fréquence des tests périodiques auxquels il est soumis [64].
- *Probabilité d'une défaillance dangereuse par heure* ( $PFH$ ), en mode demande élevée ou en mode continu. Ce second mode correspond à une fréquence de sollicitation du *SIS* supérieure à  $1 \text{ an}^{-1}$  ou supérieure au double de la fréquence des tests périodiques mentionnés précédemment [64].

Les valeurs numériques des mesures cibles de défaillances, en fonction du mode d'opération du *SIS*, correspondantes aux niveaux d'intégrité de sécurité sont présentées au tableau 2.

Tableau 2 : Niveaux d'intégrité de sécurité (*SIL*) en fonction des mesures cibles de défaillances.

| Niveau d'intégrité de sécurité <i>SIL</i> | Mode de fonctionnement à faible sollicitation ( $PF_{D_{moy}}$ ) | Mode de fonction normale à forte sollicitation ( $PFH$ ) |
|---|--|--|
| 4   | $\geq 10^{-5}$ à $< 10^{-4}$                                     | $\geq 10^{-9}$ à $< 10^{-8}$                             |
| 3   | $\geq 10^{-4}$ à $< 10^{-3}$                                     | $\geq 10^{-8}$ à $< 10^{-7}$                             |
| 2   | $\geq 10^{-3}$ à $< 10^{-2}$                                     | $\geq 10^{-7}$ à $< 10^{-6}$                             |
| 1   | $\geq 10^{-2}$ à $< 10^{-1}$                                     | $\geq 10^{-6}$ à $< 10^{-5}$                             |

#### IV-4. ALLOCATION DU NIVEAU D'INTEGRITE DE SECURITE (*SIL* REQUIS)

Cette allocation est conduite selon certaines méthodes permettant de définir le niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) requis pour une fonction de sécurité. C'est le *SIL* qui doit être atteint par un *SIS* afin de réaliser la réduction nécessaire du niveau de risque [58]. La section suivante donne un

aperçu des méthodes, telles que présentées dans les normes CEI 61508 et CEI 61511, de détermination du niveau d'intégrité de sécurité (*SIL*) correspondant à un phénomène dangereux spécifié (scénario d'accident) lors de la phase d'analyse des risques. Elles sont plus ou moins adaptées en fonction du niveau de détail des analyses de risques réalisées (type et détail des informations disponibles). La CEI 61508, dans sa partie 5, et la CEI 61511 décrivent deux types de méthodes : qualitatives et quantitatives.

#### IV-4-1. RISQUE TOLERABLE ET PRINCIPE ALARP

Selon OHSAS 18001 [34], le risque acceptable est un risque qui a été réduit à un niveau tolérable pour un organisme en regard de ses obligations légales et de sa propre politique de santé et de sécurité au travail.

Un risque est ALARP « *As Low As Reasonably Achievable* » si le coût de sa réduction est manifestement disproportionné par rapport à l'amélioration qui en résulte.

Pour être plus précis, et comme indiqué sur la figure 36, le risque n'y est tolérable que :

- si toute réduction supplémentaire du risque est incompatible ou si son coût est manifestement disproportionné vis-à-vis de l'amélioration qu'il permet d'obtenir ;
- si la société tire un avantage de l'activité, compte tenu du risque associé.

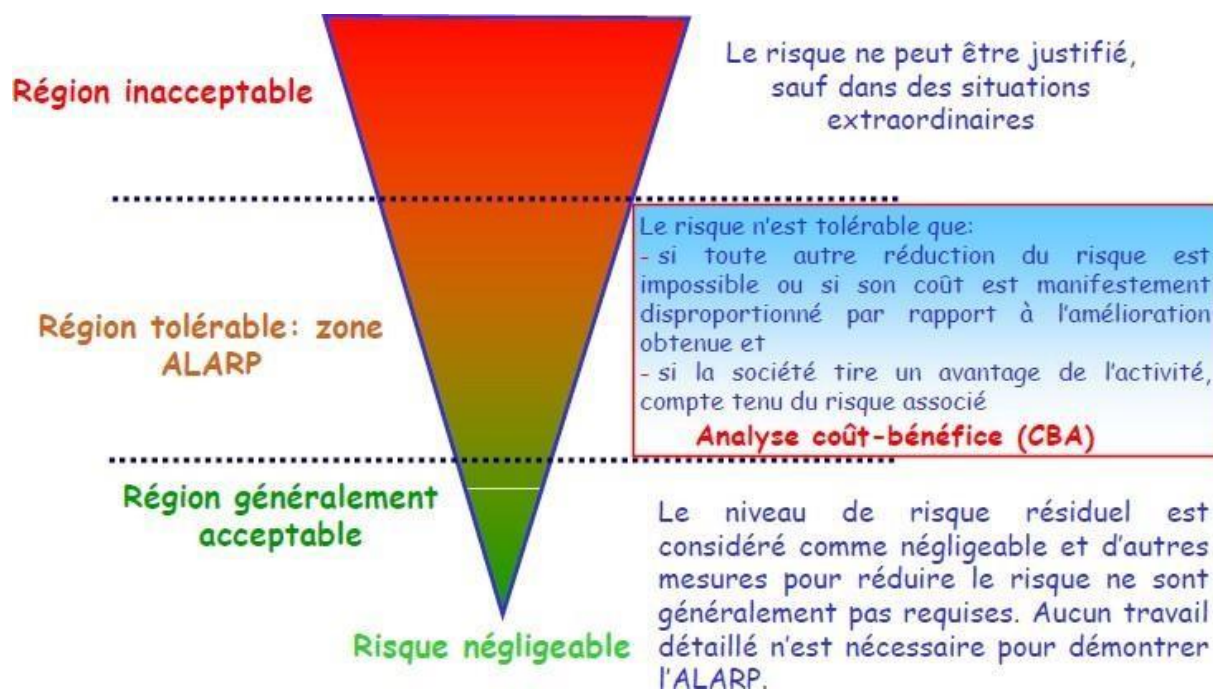


Figure 36 : Principe ALARP

Pour pouvoir appliquer la démarche ALARP qui, rappelons-le, concerne le risque et non l'une ou l'autre de ses deux composantes, il est nécessaire d'établir plusieurs (en général 3 ou 4) classes de risque et de faire correspondre à chacune d'elles une des trois zones du modèle ALARP. Ces classes rendent compte en fait de la criticité des événements redoutés propres au type de procédé étudié. L'accord précité ne survient en général qu'après que le qualificatif ordinal attribué à chaque classe de conséquences (ex : négligeable à catastrophique) et à chaque classe de fréquences (exp : événement redouté invraisemblable à fortement probable) ait été illustré par un exemple concret ou

un jeu de valeurs numériques adaptés au secteur industriel concerné. On pourrait, par exemple, concevoir que « conséquences catastrophiques » corresponde à la mort d'une ou plusieurs personnes ou à la perte totale de l'outil de production, et que l'événement redouté « peu probable » corresponde à une fréquence annuelle d'occurrence comprise entre  $1.10^{-4}$  et  $1.10^{-3}$  [62].

Conformément au principe ALARP, le niveau « peu probable » est retenu, ce qui conduit à une fréquence annuelle d'occurrence comprise entre  $1.10^{-4}$  et  $1.10^{-3}$ , selon nos conventions. La valeur finalement choisie au sein de cet intervalle détermine alors la fréquence annuelle d'occurrence de l'événement correspondant au risque tolérable.

#### IV-4-2. METHODES QUALITATIVES

La norme CEI 61508 reconnaît qu'une approche quantitative pour déterminer le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) d'une fonction instrumentée de sécurité (SIF) n'est pas toujours possible et qu'une approche alternative pourrait parfois être appropriée. Cette alternative consiste en un jugement *qualitatif*. Quand une méthode qualitative est adoptée, un certain nombre de paramètres de simplification doivent être introduits. Ils permettent de qualifier le phénomène dangereux (accident) en fonction des connaissances disponibles. Les normes CEI 61508 et 61511 présentent deux méthodes qualitatives.

##### IV-4-2-1. Le graphe de risque conventionnel

Cette méthode a été introduite par la norme allemande DIN V 19250 [66], afin de pouvoir exprimer le risque sous forme de classes. La démarche est fondée sur l'équation caractérisant le risque ( $R$ ) sans considérer les moyens instrumentés de sécurité :  $R = f. C$ , où  $f$  et  $C$  sont respectivement la fréquence et la conséquence de l'événement dangereux en l'absence de SIS [61].

La méthode du graphe de risque conventionnel analyse quatre facteurs de risque relatifs aux dangers et partagés en catégories selon leur importance [67] :

- La conséquence d'un événement dangereux ( $C$ ) ;
- La fréquence et le temps d'exposition au danger ( $F$ ) ;
- La possibilité d'évitement du danger ( $P$ ),
- La probabilité d'apparition d'un accident ( $W$ ).

La structure du graphe de risque dépend du domaine d'activité, d'où l'emploi de différents graphes dans les normes. La prise en compte de dégâts matériels et de dommages causés à l'environnement nécessite l'utilisation de graphes additionnels.

La combinaison des quatre paramètres précédents ( $C$ ,  $F$ ,  $P$ ,  $W$ ) peut ramener à une configuration comparable à celle présentée à la figure 37 [30].

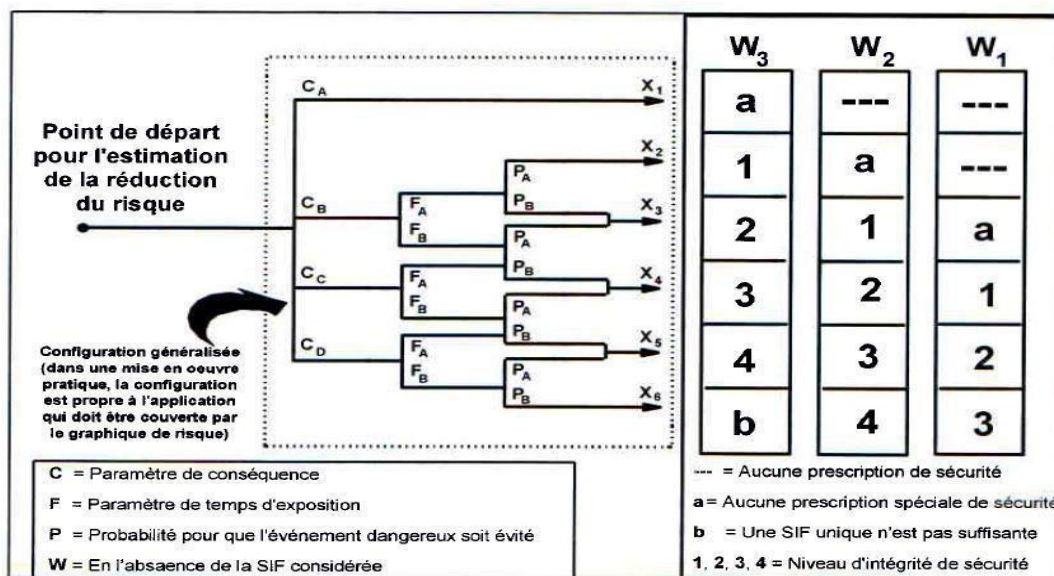


Figure 37 : Schéma général du graphe de risque conventionnel

**IV-4-2-2. Matrice de gravite (matrice de risque, matrice des couches de protection)**

Cette méthode est similaire à la précédente. Elle est utilisée lorsque la fréquence du risque ne peut être quantifiée d'une manière précise. L'analyse débute toujours par l'identification des dangers et leur estimation (fréquence et gravité). Après avoir identifié les différentes couches de protection (chaque couche de protection doit réaliser une réduction d'un ordre de grandeur de SIL (un facteur de 10), la nécessité d'une couche de protection SIS supplémentaire peut être établie en comparant le risque résiduel au niveau de sécurité cible. Ainsi le niveau d'intégrité de sécurité du SIS peut être déterminé. Cette méthode suppose l'indépendance des couches de protection. Ces considérations conduisent à la matrice de gravité tridimensionnelle illustrée à la figure 38 [30].

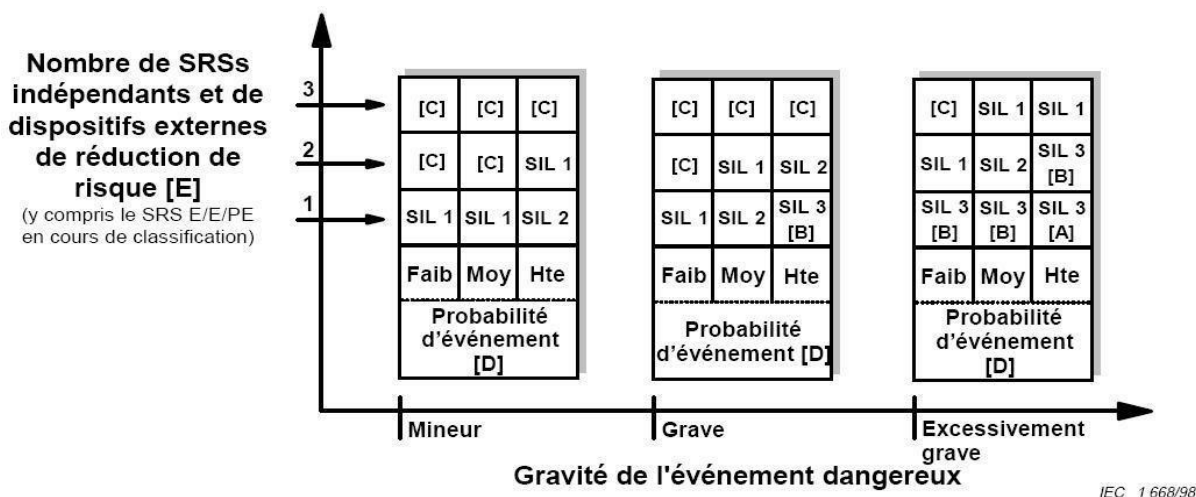


Figure 38 : Exemple de matrice de gravité (principes généraux)

Avec :

- ✓ [A] Un SRS E/E/PE SIL3 n'apporte pas une réduction suffisante de risque à ce niveau de risque. Des mesures supplémentaires de réduction de risque sont nécessaires.

- ✓ [B] Un *SRS E/E/PE SIL3* peut ne pas apporter une réduction suffisante de risque à ce niveau de risque. L'analyse des risques et des dangers est requise pour déterminer si des mesures supplémentaires de réduction de risque sont Nécessaires.
- ✓ [C] Un *SRS E/E/PE* n'est probablement pas nécessaire.
- ✓ [D] La probabilité d'événement est la probabilité que l'événement dangereux survienne sans système relatif à la sécurité ou sans dispositif externe de réduction de risque.
- ✓ [E] La probabilité d'événement et le nombre total de couches de protection indépendantes sont définis en relation avec l'application spécifique.

#### IV-4-3. METHODES QUANTITATIVES

Ces méthodes sont les plus rigoureuses et les plus précises. L'estimation quantitative de la fréquence de l'événement dangereux (redouté) en constitue la base. La mise en œuvre d'une méthode quantitative nécessite les éléments suivants :

- La mesure cible de sécurité (fréquence tolérable d'accident :  $F_t$ ) doit être spécifiée de façon numérique (par exemple, une conséquence donnée ne devrait pas se produire avec une fréquence supérieure à 1/10000 ans).
- La réduction du risque peut être définie numériquement. Ceci suppose la disponibilité des données numériques suivantes :
  - La fréquence de l'événement initiateur :  $F_{ei}$ . Elle peut être obtenue en utilisant le retour d'expérience, le jugement d'expert ou encore en utilisant des méthodes de prédiction appropriées (Arbre de défaillances –AdD-, Chaînes de Markov... etc).
  - Les probabilités de défaillances des couches de protection.

La méthode quantitative la plus utilisée pour l'allocation des niveaux d'intégrité de sécurité est celle fondée sur principe d'analyse par couches de protection (*LOPA : Layers Of Protection Analysis*), voir figure 39 [60, 68]. Elle a été développée à la fin des années 1990 par le CCPS (*Centre for Chemical Process Safety*) [68]. Cette méthode intègre toutes les couches de protection de l'installation, tant organisationnelles que techniques. Elle évalue la réduction du risque en analysant la contribution des différentes couches [69]. Son principe, rappelons-le, est d'estimer le risque résiduel, exprimé en fréquence d'accident, en quantifiant la fréquence de l'événement initiateur et les probabilités (moyennes) de défaillance sur demande de chaque couche.

Ces couches peuvent être de prévention (diminution de la fréquence de l'occurrence de l'évènement dangereux) ou de protection (réduire les impacts de l'évènement dangereux). Une condition majeure qui doit être satisfaite est l'indépendance des différentes couches de protection (*IPL : Independant Protection Layers*). Le tableau 3 illustre un exemple de format de la feuille de calcul que l'on peut utiliser lors d'une étude *LOPA*.



Figure 39 : Concept d'analyse par couches de protection (LOPA)

Tableau 3 : Exemple de tableau LOPA

| N° | 1   | 2                           | 3   | 4   | COUCHES DE PROTECTION                 |             |                      |  | 7   | 8  | 9   | 10   | 11  |
|----|---|-----------------------------|---|---|---------------------------------------|-------------|----------------------|--|---|--|---|--|---|
|    |   |                             |   |   | 5                                     | 6           | 6                    | 7  |   |  |   |  |   |
|    | Description de l'événement à impact F.14.1              | Degré de gravité F.4 F.14.1 | Cause initiatrice F.5 F.14.2                        | Probabilité d'occurrence d'une cause initiatrice F.6 F.14.3 | Conception générale du procédé F.14.4 | BPCS F.14.5 | Alarmes, etc. F.14.6 | Atténuation supplémentaire, accès limité, F.8 F.14.7 | IPL Dignes d'atténuation supplémentaire, détente F.9 F.14.8 | Probabilité intermédiaire d'occurrence d'événement F.10 F.14.9 | Niveau d'intégrité d'une SIF F.11 F.14.10 | Probabilité d'événement atténué F.12 F.14.10 | Notes   |
| 1  | Incendie dû à une rupture de la colonne de distillation | S                           | Perte d'eau de refroidissement                      | 0,1   | 0,1                                   | 0,1         | 0,1                  | 0,1  | PRV 01  | 10 <sup>-7</sup>   | 10 <sup>-2</sup>                          | 10 <sup>-9</sup>                             | Une pression élevée a provoqué une rupture de colonne |
| 2  | Incendie dû à une rupture de la colonne de distillation | S                           | Défaillance de la boucle de régulation de la vapeur | 0,1   | 0,1                                   |             | 0,1                  | 01   | PRV 01  | 10 <sup>-8</sup>   | 10 <sup>-2</sup>                          | 10 <sup>-9</sup>                             | Idem ci-dessus  |
| N  |   |                             |   |   |                                       |             |                      |  |   |  |   |  |   |

NOTE Degré de gravité E = Très grave; S = Grave; M = Mineur.  
 Les valeurs des probabilités d'occurrence sont des événements par année, d'autres valeurs numériques sont des probabilités de défaillance sur sollicitation moyenne.

La fréquence de l'événement redouté (scénario d'accident : colonne n°10 du tableau 3) s'obtient en multipliant la fréquence de l'événement initiateur et les probabilités moyennes de défaillance à la demande ( $PF_{D moy}$ ) de chaque IPL s'opposant à ce même événement.

$$f^C = f^{IE} \times \prod PFD_{moy}^i$$

Avec :

- $f^C$  : fréquence de réalisation de la conséquence  $C$
- $f^{IE}$  : fréquence de l'événement initiateur,
- $PFD_{moy}$  : Probabilité moyenne de défaillance sur demande de la barrière  $i$ . L'équipe LOPA doit déterminer cette quantité pour chaque barrière considérée.

La réduction du risque assignée à la fonction de sécurité du SIS s'obtient en comparant la fréquence de l'événement redouté à l'objectif de sécurité (fréquence tolérable :  $f$ ).

$$PFD_{moy}^{SIS} \leq \frac{f_t}{f^{IE} \times \prod_{i \neq SIS} PFD_{moy}^i}$$

La quantité correspondante au membre droit de l'inégalité dessus représente la probabilité moyenne de défaillance maximale que le SIS pourrait avoir, tel que la réduction de risque nécessaire soit réalisée. La lecture de cette quantité dans le tableau 2 permet de définir le SIL correspondant.

L'inégalité dessus telle qu'écrite n'est valable que pour le mode de fonctionnement faible demande. Pour le mode de fonctionnement demande élevée ou continu, il serait nécessaire de dimensionner la fréquence de l'événement initiateur qui représente, dans ce cas de figure, la PFH du SIS :

$$PFH_{SIS} \leq \frac{f_t}{\prod_{i \neq SIS} PFD_{moy}^i}$$

Il est important de noter que dans le cas où des relations de dépendance existent entre les différentes barrières, il serait plus convenable d'utiliser des approches de modélisation plus appropriées (arbre des défaillances, chaînes de Markov, Réseaux de Petri, ...).

## IV-5. CONCLUSION

La norme IEC 61508 est la norme de référence pour la spécification et la conception des SIS. Sa déclinaison sectorielle dans le domaine du process industriel est destinée aux concepteurs et utilisateurs de ce domaine [70]. Ces normes de sécurité fonctionnelle introduisent une approche probabiliste pour l'évaluation quantitative de la performance du SIS et la qualification de cette performance par des niveaux de sécurité référencés [61].

L'introduction de probabilité dans la mesure de niveau d'intégrité a entraîné la mise en place de nouveaux concepts tels que les notions de calculs de probabilité moyenne de défaillance à la sollicitation  $PFD_{avg}$  ou de défaillance par unité de temps.

La performance ainsi calculée permet alors de qualifier le niveau SIL du SIS selon les niveaux définis par la norme qui en sont l'un des points clés. Cette évaluation s'apparente à un calcul d'indisponibilité de la fonction de sécurité.

## CHAPITRE V : TRAITEMENT DES INCERTITUDES DANS L'EVALUATION DES RISQUES

### V-1. INTRODUCTION

Pour une bonne maîtrise des risques générés par les installations industrielles moderne, l'analyse des risques peut devenir rigoureuse en termes de qualité d'informations et de données.

Cependant, les études d'indisponibilité des systèmes, les connaissances manipulées concernant les paramètres de défaillances des composants sont généralement imparfaites [59, 61, 71].

L'incertitude sur des paramètres peut avoir deux origines [72], la première source d'incertitude provient du caractère aléatoire de l'information qui est dû à une variabilité naturelle résultant de phénomènes stochastiques. On parle alors d'incertitudes de variabilité ou d'incertitudes stochastiques [73]. La seconde source d'incertitude est liée au caractère imprécis et incomplet de l'information en raison d'un manque de connaissance. On parle alors d'incertitudes épistémiques. [73].

La complexité de système augmente l'incertitude, puisque les modèles théoriques et empiriques ne prennent pas en considération certains phénomènes pertinents, y compris leurs régimes, les mécanismes et les valeurs des paramètres, et peuvent être basés sur un large éventail d'hypothèses sujettes à l'incertitude. En outre, les conditions de fonctionnement et l'exploitation des systèmes changent constamment [67]. Dans ce cadre, l'incertitude a surtout été appréhendée dans un cadre purement probabiliste [75]. Cela revient à supposer que la connaissance sur les paramètres des modèles est toujours de nature aléatoire (variabilité). Cette approche consiste à représenter les paramètres incertains par des distributions de probabilité uniques et à transmettre l'incertitude relative à ces paramètres sur celle du risque encouru par la cible, en appliquant en général la technique de Monte Carlo. [73] Si cette approche est bien connue, toute la difficulté tient à une définition cohérente des distributions de probabilité affectées aux paramètres par rapport à la connaissance disponible.

L'information dont on dispose réellement est souvent plus riche qu'un intervalle mais moins riche qu'une distribution de probabilité. En pratique, l'information de nature aléatoire est traitée de manière rigoureuse par les distributions de probabilité classiques. Celle de nature imprécise est traitée de manière rigoureuse par des familles de distributions de probabilité définies au moyen de paires de probabilités cumulées hautes et basses ou, à l'aide de théories plus récentes, au moyen de distributions de possibilité (aussi appelées intervalles fous) ou encore au moyen d'intervalles aléatoires utilisant les fonctions de croyance de Dempster-Shafer.

### V-2. TERMINOLOGIE DES INFORMATIONS IMPARFAITES

#### V-2-1. INTRODUCTION

Les natures de l'imperfection de l'information sont divisées en trois types :

- I. *L'incertitude* concerne un doute sur la validité d'une connaissance ou le résultat d'un manque de connaissances. Celle-ci peut provenir d'une fiabilité relative de l'intermédiaire d'observation, peu sûr de lui ou susceptible de commettre des erreurs ou de donner intentionnellement des informations erronées, ou encore d'une difficulté dans l'obtention ou la vérification de la connaissance [76].
- II. *L'imprécision* correspond à une difficulté dans l'énoncé de la connaissance, soit parce que les valeurs numériques des connaissances sont mal connues, soit parce que les



termes du langage naturel sont utilisés pour qualifier une caractéristique du système de façon vague [77].

- III. *L'incomplétude* présente une absence de connaissances sur les paramètres caractéristiques du système. Elle peut être due à l'impossibilité d'obtenir certains renseignements ou à un problème au moment de la mesure de la connaissance [78, 79].

## V-2-2. NOTIONS D'INCERTITUDE

Différentes méthodes de classification des incertitudes et de leurs sources sont proposées. La distinction la plus courante étant de diviser les incertitudes en deux types : incertitude aléatoire et incertitude épistémique. Le premier étant irréductible et dû à la variabilité naturelle des phénomènes aléatoires. Le deuxième est dû à un manque de connaissances qui peut être réduit en faisant davantage d'efforts (recueil de données, consultation d'experts, essais accélérés, etc.).

L'objectif principal des études de fiabilité est de prédire, avec un certain degré de confiance, le comportement des défaillances d'une entité (composant/système) en fonction du temps [80]. Pour ce faire, les fiabilistes considèrent qu'il y a une variabilité naturelle dans le comportement des défaillances, c'est-à-dire, que la défaillance d'une entité est un phénomène purement aléatoire. Par conséquent, même si l'instant de défaillance d'une entité quelconque sera toujours inconnu, nous sommes capables d'attribuer une distribution de probabilité à la durée de vie de l'entité si nous maîtrisons la variabilité naturelle du phénomène de défaillance de l'entité. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible car souvent nous ne maîtrisons pas le caractère aléatoire des défaillances des entités.

Dans les analyses de risque, nous retrouvons une situation similaire. La différence réside dans le fait que dans l'analyse de risque nous nous intéressons à plusieurs facteurs alors que dans les analyses de fiabilité on s'intéresse uniquement aux phénomènes de défaillance et de réparation [81]. Or souvent ces facteurs qui peuvent représenter par exemple des paramètres influençant les systèmes étudiés (température, pression, etc.) sont plus difficiles à identifier et on peut même se demander, parfois, s'ils ont vraiment un caractère aléatoire.

Ceci a amené la plupart des chercheurs [82, 83] à faire une distinction entre les deux types d'incertitudes : aléatoires et épistémiques [84], comme nous l'avons déjà signalé. Néanmoins, il existe d'autres classifications des incertitudes et de leurs sources. En effet, Blockley [85] définit l'incertitude dans un espace orthogonal à trois dimensions : niveau flou, niveau d'incomplétude et niveau aléatoire.

Partant du constat que la théorie des probabilités classique confond les incertitudes aléatoires et épistémiques et modélise ces deux types par une seule distribution de probabilités [80], plusieurs travaux introduisant des méthodes autres que les méthodes probabilistes classiques ont été proposés pour traiter les différents types d'incertitudes. Ces théories présentent des cadres plus généraux pour traiter séparément les incertitudes aléatoires et épistémiques [86]. Parmi ces alternatives, les plus utilisées dans l'analyse de fiabilité sont : les probabilités imprécises [87], la théorie des fonctions de croyances [88, 90, 91], et la théorie des possibilités [89].

Néanmoins, certains auteurs considèrent encore que ces théories ne sont pas nécessaires et que la théorie des probabilités est le seul cadre théorique valable pour manipuler les incertitudes [92, 93]. Ils estiment que le fait de considérer que les probabilités ne soient pas adaptées à tous les types d'incertitudes provient de la façon avec laquelle on interprète la probabilité. A partir d'un point de vue subjectif, la probabilité est une "description" de l'incertitude de l'analyste par rapport à un

phénomène mal connu et non pas une description objective de la vraie variabilité du phénomène [83]. En outre, ils considèrent que les axiomes des probabilités, notamment l'additivité, sont une conséquence naturelle de l'intuition et un pré-requis pour raisonner sous l'incertitude dans un cadre décisionnel alors que ces nouvelles théories relaxent l'axiome d'additivité. Or la validité de la non-additivité a été discuté à plusieurs reprises [94].

- a. **Les incertitudes aléatoires** concernent les événements ou les phénomènes dont l'occurrence est considérée comme aléatoire ou stochastique. Les modèles probabilistes sont généralement utilisés pour décrire ces occurrences. D'après [95, 96], les incertitudes aléatoires sont souvent liées aux quantités observables. Une autre terminologie « variabilité » est également utilisée pour désigner ce type d'incertitude [97].
- b. **Les incertitudes épistémiques**, quant à elles, sont liées à un manque de connaissances sur un phénomène, au niveau de confiance que des analystes ont dans le modèle lui-même, aux prédictions du modèle, etc. En théorie, elles peuvent être réduites voire éliminées par l'acquisition de connaissances supplémentaires. D'après [95, 96], les incertitudes épistémiques sont associées à des quantités non observables.

Selon la définition de Hofer [98], l'incertitude aléatoire apparaît du fait que nous ne pouvons pas donner une valeur unique à un événement aléatoire, mais plutôt une distribution de valeurs associées à des probabilités. L'incertitude épistémique quant à elle, est caractérisée comme une incertitude due au manque de connaissance sur des valeurs constantes mais mal connues. Du point de vue de l'analyse, le traitement de l'incertitude aléatoire répond à la question « Que peut-il vraiment arriver et avec quelle probabilité ? » tandis que l'analyse de l'incertitude épistémique répond à la question « Quelle valeur est exacte ? » ou « Que savons-nous d'un problème donné et quelles connaissances supplémentaires pourraient réduire les doutes ? ». Compte tenu de ces définitions, on peut résumer les caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques dans le tableau 4. Ainsi, les incertitudes aléatoires et épistémiques ont des caractéristiques très différentes. La distinction de ces deux types d'incertitudes joue un rôle important dans le choix de la modélisation et des moyens de les maîtriser. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons aux approches généralement utilisées pour modéliser ces deux types d'incertitude.

Tableau 4 : Caractéristiques principales des incertitudes aléatoires et épistémiques.

|                                  | <b>Incertaince aléatoire</b>  | <b>Incertaince épistémique</b>  |
|----------------------------------|---|---|
| <b>Critère de classification</b> | Connaissances sur les lois gouvernant l'occurrence d'un événement, Degré de sensibilité aux conditions initiales ou aux environnements. |   |
| <b>Terminologie</b>              | Incertaince irréductible, Observables, inhérente, stochastique et variabilité.  | Incertaince réductible, non observable, cognitive, associé à l'état de connaissance.  |
| <b>Source d'incertaince</b>      | Caractères aléatoires<br>Variation d'un événement   | Connaissance imprécise d'une quantité considérée comme fixe, représentations alternatives, de cette valeur mais mal connue. |
| <b>Management d'incertaince</b>  | Irréductible  | Réductible  |

|                         |  |   |
|-------------------------|--|---|
| <b>But de l'analyse</b> | Réponse à la question « Que peut –il vraiment arriver et avec quelle probabilité ? » | Réponse à la question « Quelle valeur est la plus représentative ? » Ou « Que savons-nous d'un problème donné et quelles connaissances supplémentaires pourraient réduire les dotes? ». |
|-------------------------|--|---|

### V-2-3. REPRESENTATIONS NUMERIQUES DE CONNAISSANCES IMPARFAITES

Les principales théories numériques permettant de représenter les connaissances imparfaites et de raisonner à partir de celles-ci sont :

- Les probabilités ;
- Les ensembles flous ;
- Les fonctions de croyance ;

Dans les représentations probabilistes, le langage est constitué de distributions de probabilités sur un référentiel. Elles permettent de prendre en compte de manière rigoureuse des incertitudes aléatoires ou stochastiques ; c'est un outil efficace pour le traitement des incertitudes aléatoires et les cas où nous disposons d'une bonne connaissance des événements et de leurs événements contraires [99]. Il est plus difficile de rendre compte des autres formes d'imperfections, à la fois formellement et sémantiquement. L'inférence bayésienne, souvent utilisée en fusion dans les domaines qui nous intéressent, permet un raisonnement abductif [100, 101].

La théorie des fonctions de croyances repose sur un langage défini par des fonctions sur l'ensemble des parties du référentiel. Les représentations permettent de tenir compte à la fois de l'imprécision et de l'incertitude (y compris sous sa forme subjective), de l'ignorance, de l'incomplétude, et donnent accès au conflit. L'inférence par la règle de Dempster réalise une agrégation de type conjonctif des informations combinées.

Dans la théorie des ensembles flous, le langage est formé de sous-ensembles flous du référentiel ou de distributions de possibilité sur celui-ci. Il permet de représenter des informations qualitatives, imprécises, vagues. L'inférence se fait par des règles logiques (ou leur équivalent sous forme numérique), réalisant essentiellement un raisonnement de type déductif, pouvant être qualitatif.

### V-2-4. NIVEAUX DE TRAITEMENT D'INCERTITUDE DANS L'ANALYSE DES RISQUES [84]

Les décisions de gestion des risques industriels sont souvent faites et ont été prises pour une longue période sans une spécifique analyse. L'analyse est extrêmement utile parce que le problème est complexe et l'information doit être structurée. Différents degrés de sophistication dans l'évaluation des risques peuvent être envisagés en fonction des possibilités de la décision, sur la règle de gestion que l'on entend appliquer, sur l'ampleur des résultats, et sur les probabilités de ces résultats. Les niveaux de traitements de l'incertitude sont présentés ci-dessous :

- Niveau 0 : identification des dangers et non détection des modes de défaillances

Il implique la détection d'un danger potentiel ou les différentes façons dont un système peut échouer, sans chercher à évaluer le risque en aucune façon quantitative. Cette approche est suffisante

de soutenir la politique de risque zéro, et ou de prendre des décisions de gestion des risques lorsque les coûts sont bas et la décision est claire.

➤ Niveau 1 : Approche « Worst- Case »

Le niveau 1 est l'approche « pire cas ». Elle n'implique aucune notion de probabilité. Il est basé sur l'accumulation des hypothèses les plus pessimistes et leurs rendements, en théorie, le niveau de perte maximale est raisonnable si la pire perte est suffisante pour soutenir la décision.

➤ Niveau 2 : Limites supérieur de plausibilité (Quasi – worst case)

Le niveau 2 implique « limites supérieures plausibles ». Cette analyse constitue une tentative d'obtenir une évaluation des pires conditions possibles qui peuvent être « raisonnablement » attendu :

- Quand il y a une certaine incertitude quant à la possibilité des pires de cas ;
- Lorsque le pire des cas est donc peu probable (ou peu fréquent) qu'il est dénué de sens. L'exemple typique de ces approches est le tremblement de terre maximum crédible « grand » magnitude.

➤ Niveau 3 : Meilleures estimations / valeurs centrales

Le niveau 3 s'appuie sur la notion de la meilleure estimation et / ou sur la valeur centrale des résultats d'une distribution. Il est actuellement l'une des directions dans lesquelles les législateurs et les organismes gouvernementaux semblent se diriger (types d'informations, y compris les effets des incertitudes) pour une évaluation plus réaliste des risques pour la santé que par les limites supérieures plausibles seuls.

➤ Niveau 4 : Evaluation probabilistes des risques

Le niveau 4 est basé sur le processus probabiliste d'analyse des risques (QRA évaluation quantitative des risques). Dans sa forme la plus simple, la QRA peut être effectuée pour obtenir une distribution des probabilités des différents états du système fondés sur les meilleures estimations des modèles et des valeurs de paramètres. Sous cette forme, le modèle n'implique que les incertitudes aléatoires. La QRA permet également la représentation d'un risque, non pas par une seule estimation ponctuelle des résultats ou même une distribution des états de système, mais par une distribution complète des pertes potentielles, y compris les incertitudes épistémiques et aléatoires.

➤ Niveau 5 : Evaluation probabilistes des risques, multiples courbes de risques

Le Niveau 5 permet de visualiser les incertitudes sur des hypothèses fondamentales d'une famille de courbes. Cela peut se faire de plusieurs façons, y compris le traitement statistique des données existantes (inférence bayésienne). Une autre approche consiste à demander à un groupe d'experts de fournir une évaluation du risque en fonction de leur modèle préféré, et sur leur évaluation de la distribution des valeurs de paramètres ont donné ce modèle. Cet ensemble des courbes de risque (un pour chaque expert) peut alors être affiché sans essayer d'agrégier les résultats à travers des experts ou d'évaluer les probabilités des hypothèses fondamentales sur lesquelles ils reposent.

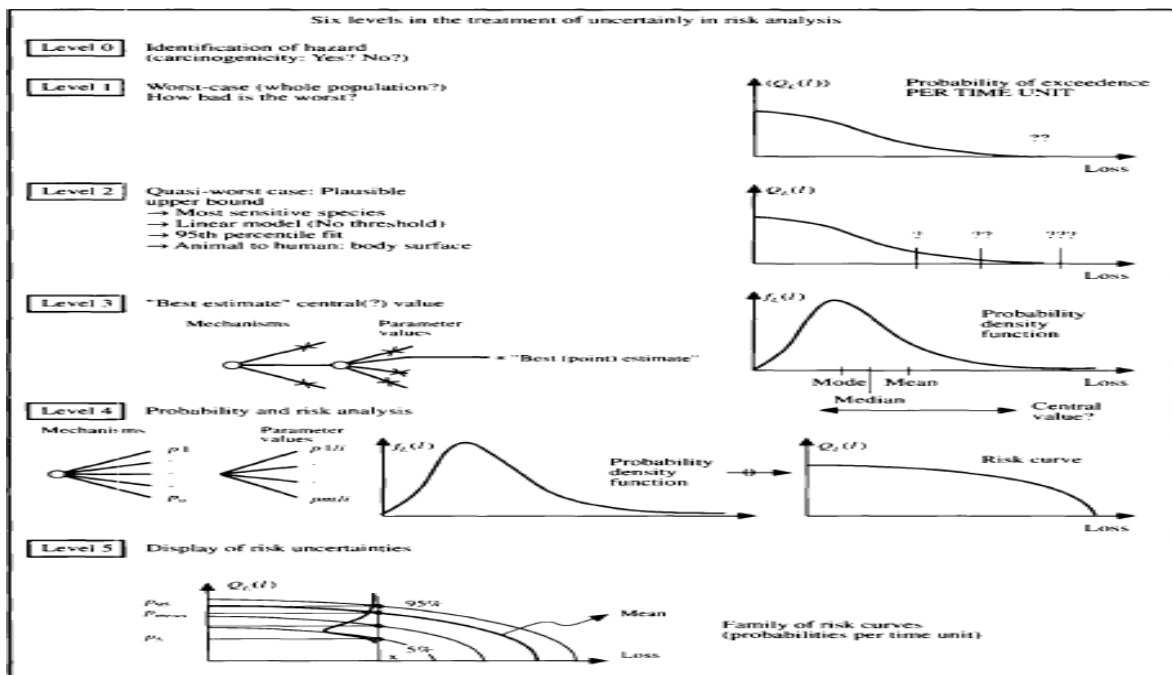


Figure 40 : Niveau de traitements des incertitudes [84].

### V-3. METHODES ET TECHNIQUES DE L'EVALUATION DES SYSTEMES A PARAMETRES IMPRECIS

#### V-3-1. METHODE DE MONTE CARLO

La méthode de Monte Carlo est une méthode d'approximation, au sens statistique du terme consiste à effectuer un nombre croissant d'essais (tirage) jusqu'à ce que les différents résultats d'intérêt soient stabilisés au sens statistique. Il n'y a pas de définition précise de ce qu'est une technique de type Monte-Carlo, mais la description la plus habituelle consiste à dire que les méthodes de ce type se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes centrés sur le calcul d'une valeur numérique. La réponse fournie sera une réponse statistique, de type « la valeur cherchée  $I$  se trouve très probablement (par exemple avec une probabilité au moins égale à 0, 95) dans l'intervalle de confiance  $I_1, I_2$  » [102]. La précision est mesurée par la taille  $I_2 - I_1$  de l'intervalle de confiance. Si on utilise  $n$  points échantillonnés de manière indépendante, la méthode converge en 0. La méthode de Monte-Carlo est le seul outil capable de donner une réponse en un temps raisonnable).

##### V-3-1-1. Définition :

Le terme **méthode Monte-Carlo**, désigne toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes [103].

Selon [104] et [105] : « il s'agit de toute méthode qui met en œuvre l'utilisation de nombre aléatoire dans un calcul qui a la structure d'un processus stochastique. Par processus stochastique, nous entendons une séquence d'états dont l'évolution est déterminée par des événements aléatoires ».

### V-3-1-2. Nombre d'essai de la méthode de Monte Carlo

C'est le nombre d'évaluations de modèle à faire, a besoin d'être sélectionné. Il peut être choisie a priori, auquel cas il n'y aura pas de contrôle direct sur la qualité des résultats numériques fournis par Monte Carlo.

On note qu'une valeur de tirage  $N=10^6$  est souvent prévue pour fournir un intervalle de couverture de 95% [106].

### V-3-1-3. Description de la méthode

Pour utiliser la méthode de Monte-Carlo, on doit tout d'abord mettre sous la forme d'une espérance la quantité que l'on cherche à calculer. C'est souvent simple (calcul d'intégrale par exemple) mais peut-être plus compliqué (équations aux dérivées partielles par exemple). Les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo sont illustrées à la figure 41.

A l'issue de cette étape, il reste à calculer une quantité de la forme  $E(X)$ , c'est-à-dire l'espérance de la variable aléatoire  $X$ . Pour calculer  $E(X)$ , il convient de savoir simuler une variable aléatoire selon la loi de  $X$ . On dispose alors d'une suite  $(X_i)_{1 \leq i \leq N}$  de  $N$  réalisations de la variable aléatoire  $X$ . On approxime alors  $E(X)$  par :

$$E(X) = \frac{1}{N} (X_1 + \dots + X_n)$$

Application au cas du calcul d'une intégrale : on cherche à calculer :

$$I = \int_{[0,1]^d} f(U_1 \dots U_d) dU_1 \dots dU_d$$

1. Mise sous forme d'espérance : on pose  $X = f(U_1, \dots, U_d)$  où  $U_1, \dots, U_d$  sont des réalisations de la loi uniforme sur l'intervalle  $[0, 1]$ , alors

$$E(X) = E(f(U_1), \dots, U_d) = I.$$

2. Simulation de la variable aléatoire : on suppose que l'on dispose d'une suite  $(U_i)_{i \geq 1}$  de réalisations de la loi uniforme sur  $[0, 1]$ . On pose alors  $X_1 = f(U_1, \dots, U_d)$ ,  $X_2 = f(U_{d+1}, \dots, U_{2d})$ , etc. Alors les  $(X_i)$  sont des réalisations de la variable aléatoire  $X$  et :

$$I \approx \frac{1}{N} (X_1 + \dots + X_n)$$

*Remarque* : cette méthode est facilement programmable, et ne dépend pas de la régularité de  $f$  (on lui demande juste d'être mesurable).

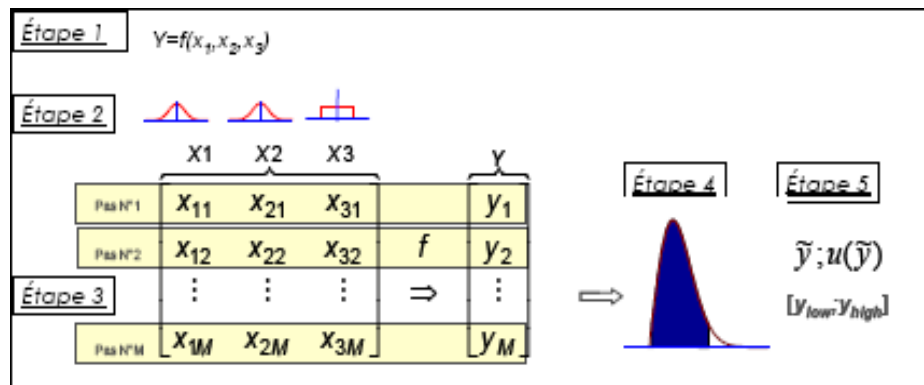


Figure 41 : Les différentes étapes de la méthode de Monte Carlo [107]

### V-3-2. L'INCERTITUDE STATISTIQUE DANS LA METHODE DE MONTE CARLO

La méthode de Monte Carlo est largement utilisée pour effectuer l'étude de l'incertitude. Cette technique est devenue le standard pour les industriels dans l'étude de propagation des incertitudes [62, 108].

L'ensemble du processus d'évaluation de l'incertitude pourrait être divisé en deux parties : analyse et propagation de l'incertitude (UA) et l'analyse de sensibilité (SA).

L'évaluation des incertitudes permet à un modèle utilisateur d'être mieux informés sur la confiance qui peut être placée dans les résultats du modèle [109].

Le résultat de Monte Carlo peut être vu comme un ensemble (ou un échantillon) de valeurs numériques aléatoires [104, 110].

Considérons un échantillon de taille  $N$  constitué d'observations indépendantes aléatoires  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N$ . D'une variable aléatoire  $\mu$ . Nous supposons que cette variable aléatoire est fonction de  $t$ , avec distribution de densité  $\varphi(t)$ . La signification de  $t$  est générale ici, elle représente une variable par lesquels tous processus stochastiques peuvent être paramétrisé.

L'espérance mathématique et la variance de  $\mu$  sont définis par :

$$(\mu) = \int \mu(t) \varphi(t) dt$$

$$(\sigma^2_\mu) = (\mu^2) - (\mu)^2$$

Si l'espérance mathématique  $\langle \mu \rangle$  est estimé à partir de la moyenne arithmétique des  $N$  observations.

Nous appellerons la quantité  $\sigma_u/\sqrt{N}$  l'incertitude statistique associée à l'estimation de la grandeur  $\langle \mu \rangle$ .

L'écarttype  $\sigma_u$  (comme l'espérance mathématique  $\langle \mu \rangle$  et les moments d'ordre supérieur) peut aussi être estimé à partir de l'échantillon des  $N$  observation à l'aide de l'estimateur non biaisée suivant :

$$S_{\mu} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mu_i - \mu^0/N)^2}$$

Cette estimation est non biaisée car  $(S^2) = \sigma^2$  L'écart type de la moyenne de l'échantillon est la variable aléatoire définie par :

$$S_{\mu} = \frac{S_{\mu}}{N} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \left[ \sum_{i=1}^N \mu_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N \mu_i \right)^2 \right]}$$

C'est un estimateur de l'incertitude statistique  $\sigma_u/\sqrt{N}$ . La dernière forme est celle utilisée lors des simulations numériques pour estimer l'incertitude statistique de  $\langle \mu \rangle$ , elle ne nécessite que la mémorisation des sommes des observations et de leur carré.

A partir de la notion d'incertitude statistique nous pouvons déjà énoncer les propriétés suivantes des méthodes Monte Carlo :

- L'incertitude statistique  $\sigma_u/\sqrt{N}$  est associée à l'erreur d'une méthode Monte Carlo. C'est une convergence lente par rapport à d'autres méthodes numériques pour des problèmes de dimensions faibles.
- L'erreur peut être diminuée en réduisant  $\sigma_u$  c'est le but des méthodes de réduction de variance qui agissent sur la définition des « processus stochastiques ».

### V-3-3. ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité (AS) étudie comment la variation de la sortie d'un modèle peut être attribuée aux variations des différents paramètres. L'analyse de sensibilité d'un modèle permet d'améliorer la compréhension du comportement du modèle, c'est-à-dire comment le modèle va réagir par rapport aux paramètres d'entrée, la cohérence entre le modèle et le système qu'il représente et la manière dont les différentes parties du modèle interagissent.

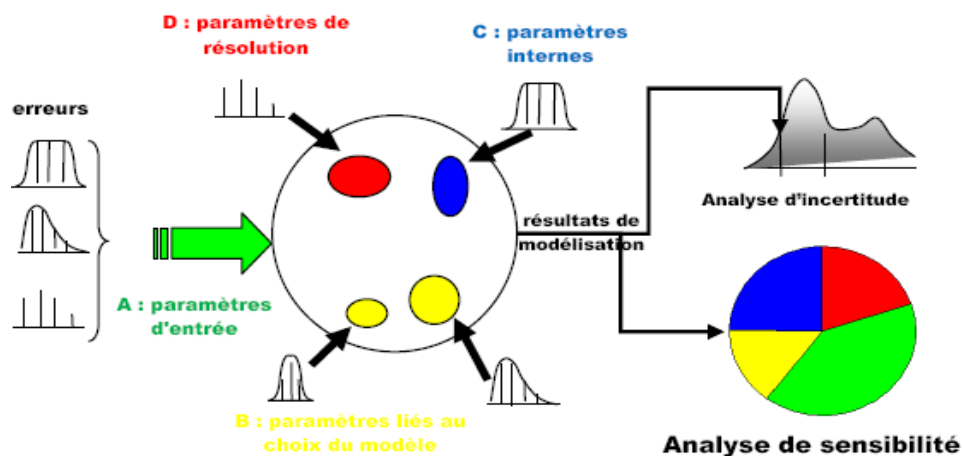


Figure 42 : Démarche d'analyse de sensibilité [111]



D'après Saltelli [112], les résultats de l'AS peuvent :

- Fournir des éléments pour approfondir l'étude des paramètres les plus influents sur la réponse du modèle ;
- Faire ressortir des zones critiques dans l'espace d'entrée qui génèrent des sorties irréalistes ;
- Aider à simplifier le modèle en négligeant les paramètres les moins influents du modèle ;
- Donner des arguments pour prendre une décision politique.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse de sensibilité selon le domaine d'application et le niveau de complexité du système. Il existe trois catégories de méthode [112] :

- Les méthodes de criblage ou « screening » ;
- Les méthodes d'analyse de sensibilité locale ;
- Les méthodes d'analyse de sensibilité globale.

### V-3-3.1 Méthodes de criblage ou « screening »

Les méthodes de « screening » analysent qualitativement l'importance des variables d'entrée sur la variabilité de la réponse du modèle [113, 114, 115, 116, 117]. L'objectif de ces méthodes est, dans un premier temps, d'isoler les paramètres qui sont très influents sur les résultats et donc, de réduire le nombre de paramètres à analyser avec des méthodes plus sophistiquées et/ou plus coûteuses. Ces méthodes sont souvent appliquées dans le cas où le modèle contient un nombre considérable de paramètres d'entrée et nécessite un temps de calcul très élevé.

### V-3-3-2. Méthodes d'analyse de sensibilité locale

Les méthodes d'analyse de sensibilité locale reposent sur le calcul d'un indice de sensibilité représentant les variations d'une sortie du modèle suite à une faible variation d'un paramètre d'entrée [118]. A chaque paramètre d'entrée est attribuée une valeur nominale de référence. L'analyse de sensibilité s'effectue en faisant varier la valeur de référence d'un paramètre d'entrée en fixant tous les autres paramètres d'entrée à leur valeur nominale.

Cette manière de procéder ne modifie la valeur que d'un paramètre d'entrée à la fois et ne permet aux analyses de sensibilité locale que de couvrir une partie de l'espace d'entrée, en excluant toute interaction entre paramètres. L'estimation de l'indice de sensibilité  $S_i$  par rapport au paramètre  $x_i$ , par une méthode OAT (« One-At-a-Time ») [119, 120] est définie par :

$$S_i^L = \frac{\partial y}{\partial x_i} (x_1^0, \dots, x_p^0)$$

Où  $y$  est une sortie,  $x_i$  est un paramètre d'entrée et l'exposant 0 symbolise la valeur nominale.

### V-3-3-3. L'analyse de sensibilité globale

L'analyse de sensibilité globale permet de quantifier l'influence des différents paramètres d'entrée sur la variabilité de la réponse d'un modèle numérique. Elle permet de déterminer les variables qui contribuent le plus à la variabilité de la réponse du modèle, les variables les moins influentes et les variables qui interagissent avec les autres.

Ces méthodes prennent en compte la densité de probabilité de chaque variable d'entrée et traitent la variation de tous les paramètres simultanément.

#### V-3-3-4. Indices de sensibilité

a. **L'indice de sensibilité du 1<sup>er</sup> ordre** est donné par l'équation suivante :

$$S = 1 + \frac{V(E(\frac{Y}{X_i}))}{V(Y)} - \frac{V_i}{V(Y)}$$

Où

- $V(Y)$  = variance totale de la sortie  $Y$
- $V(E(Y/X_i))$  = variance de l'espérance conditionnelle de  $Y$  par rapport à  $X_i$

Cet indice quantifie la sensibilité de la sortie  $Y$  par rapport au paramètre d'entrée  $X_i$ , ou encore la part de variance de  $Y$  imputable au paramètre  $X_i$ .

L'indice de sensibilité du 1<sup>er</sup> ordre représente l'influence « directe » de la variation du paramètre  $X_i$  sur  $Y$ .

b. **L'indice de sensibilité de 2<sup>ème</sup> ordre** est défini par :

$$S_{ij} = 1 + \frac{V(E(\frac{Y}{X_i, X_j}) - E(\frac{Y}{X_i}) - E(\frac{Y}{X_j}))}{V(Y)} = \frac{V_{ij}}{V(Y)}$$

Cet indice exprime la part de la variance de  $Y$  imputable à l'interaction croisée de  $X_i$  et de  $X_j$ , sans prendre en compte l'effet des variables seules.

L'interprétation de ces indices est assez facile puisque leur somme est égale à 1 et leurs valeurs sont toujours positives. Plus l'indice est grand (proche de 1), plus le paramètre a de l'importance. [113]

c. **Indice de sensibilité total** : D'après Homma et Saltelli [121] ont introduit des indices de sensibilité totaux, qui expriment la sensibilité totale de la variance  $Y$  à un paramètre, c'est-à-dire la sensibilité à ce paramètre sous toutes ses formes (sensibilité au paramètre seul et sensibilité aux interactions de ce paramètre avec d'autres paramètres).

L'indice de sensibilité total  $S_{Ti}$  au paramètre  $X_i$  est défini comme la somme de tous les indices de sensibilité relatifs à la variable  $X_i$  :

$$S_{Ti} = S_i + S_{i2} + S_{i3} + \dots + S_{23} + \dots$$

Donc, pour  $p$  paramètres d'entrée, il y a  $p$  indices de sensibilité totale.

L'utilisation et l'interprétation de ces indices de sensibilité totaux est plus simple, du fait de leur nombre plus faible [113].

### V-3-3-5. Indicateurs classiques d'analyses de sensibilité

Le but de l'analyse d'incertitude est de déterminer l'incertitude des estimations des variables d'intérêt, [122]. En outre le but de l'analyse de sensibilité est de déterminer les relations entre l'incertitude dans les variables indépendantes et l'incertitude dans les variables dépendantes qui en résultent.

**Analyse de régression :** la majorité de mesures quantitatives de sensibilité sont fondées sur une analyse de régression. Un échantillon multiple de l'entrée  $x$  est généré par une certaine stratégie d'échantillonnage (dimension de  $m \times k$ ), et la séquence correspondante de valeurs de sortie de  $m$  est calculée en utilisant le modèle en cours d'analyse. Si un modèle de régression linéaire est demandé de forme :

$$y_i = b_0 + \sum_j b_j x_{ij} + \xi$$

Avec  $y = 1, \dots$ , sont les valeurs de sortie du modèle,

$b_j = 1, \dots, k$  ( $k$  étant le nombre de variables d'entrée) sont les coefficients qui doivent être déterminés et  $\varepsilon$  est l'erreur (résiduelle) en raison de l'approximation. Pour déterminer les coefficients  $b_j$  la méthode des moindres carrés seront la plus performante ; où ils sont déterminés par la fonction :

$$F(b) = \sum_i \varepsilon_i^2$$

Une fois les coefficients  $b_j$  sont calculés, ils peuvent être utilisés pour indiquer l'importance de variables d'entrée individuels  $x$  par rapport à l'incertitude de la sortie  $y$ . En fait, en supposant que  $b_j$  a été calculée, le modèle de régression peut être réécrit sous la forme :

$$(y - \bar{y}) / \hat{s} = \sum_j (b_j \hat{s}_j / \hat{s})(x_j - \bar{x}_j) / \hat{s}_j$$

Les coefficients  $b_j \hat{s}_j / \hat{s}$  sont appelés coefficients de régression standardisé (Standardised Regression Coefficients SRC). Ceux-ci peuvent être utilisés pour l'analyse de sensibilité (lorsque les  $x$  sont indépendantes), car elles permettent de quantifier l'effet de la variation de chaque entrée variable loin de sa moyenne par une fraction fixe de sa variance tout en maintenant les autres variables à leurs valeurs attendues.

Lors de l'utilisation de la SRC, il est également important de considérer le coefficient de modèle de détermination :

$$R_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y})^2}$$

Avec :

- $R_y^2$  : est la mesure du modèle linéaire de régression basé de la SRC de sortie réelle  $y$ .
- $\hat{Y}_i$  : est l'estimation obtenue à partir du modèle de la régression.
- $R_y^2$  : représente la fraction de la variance de la sortie expliquée par la régression. Plus proche à l'unité, meilleure est la performance du modèle.

### V-3-3-6. Méthodes d'estimation des indices de sensibilité globale

Les indices de sensibilité globale peuvent parfois être calculés formellement lorsque la forme analytique du modèle et les densités de probabilité des paramètres d'entrée sont connues et relativement simples. Le plus souvent, le modèle étant très complexe ou la forme analytique étant inconnue, nous ne pouvons pas calculer les indices de sensibilité et il est alors nécessaire de les estimer [113]. L'estimation de ces indices est faite par des méthodes stochastiques telles que FAST ou Sobol. Ces deux méthodes sont basées sur le même principe de décomposition de la variance.

On considère le modèle :

$$Y = f(X_1, \dots, X_p)$$

Où  $Y$  est la réponse du modèle et  $[X_1, \dots, X_p]$  sont des  $p$  paramètres d'entrée du modèle. Ces deux méthodes sont basées sur l'hypothèse que les paramètres d'entrée sont indépendants [123].

#### I. Méthode de Sobol

Cette méthode est basée sur l'évaluation des intégrales multidimensionnelles pour estimer la décomposition de fonction  $f$  [124]. La méthode de Monte Carlo avec échantillonnage aléatoire des paramètres d'entrée  $X$  est la méthode de base pour calculer ces intégrales. Il existe diverses méthodes d'échantillonnage permettant d'améliorer la vitesse de convergence comme les échantillonnages Quasi-Monte Carlo, les méthodes pseudo-probabilistes (échantillonnage stratifié ou par hypercube latin (LHS)).

L'échantillonnage stratifié consiste à découper l'espace des variables d'entrée en petits espaces disjoints, puis à échantillonner au sein de chacun de ces sous espaces.

L'échantillonnage *LHS* est basé sur le même principe, en s'assurant que le découpage a défini des espaces équiprobables, et que chaque espace est bien échantillonné ; le quadrillage se fait dans le cube unité, pour un tirage aléatoire d'échantillon uniforme, puis ces échantillons sont transformés via la fonction de répartition inverse. Les méthodes de Quasi-Monte Carlo sont des versions déterministes des méthodes de Monte Carlo. Ces méthodes définissent des séquences d'échantillons déterministes qui ont une répartition uniforme dans l'espace des variables d'entrée.

## II. Méthode FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test)

Cette méthode [125] utilise la transformée de Fourier multidimensionnelle de  $f$  pour obtenir une décomposition de la variance de  $Y$  [122, 123]. Le principe de cette méthode est de remplacer les décompositions multidimensionnelles par des décompositions unidimensionnelles le long d'une courbe parcourant l'espace d'entrée  $[0,1]^p$ .

Cette courbe est définie par un ensemble d'équations paramétriques :

$$X_i(s) = g_i(\sin(\omega_i s)) \text{ pour } i = 1, \dots, p$$

Où  $g_i$  sont des fonctions à déterminer, permettant un recouvrement uniforme de  $[0, 1]^p$  et où  $(\omega_1, \dots, \omega_p)$  est un ensemble de fréquences entières linéairement indépendantes.

L'estimation des indices de sensibilité nécessite de définir les fonctions  $g_i$  et les fréquences  $\omega_i$  utilisées et d'effectuer l'évaluation du modèle avec un nombre suffisant de cas pour calculer les intégrales. Pour le choix des fonctions  $g_i$ , plusieurs possibilités ont été proposées. Saltelli et al. [126] définissent ces fonctions par :

$$X_i(s) = g_i(\sin(\omega_i s)) = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(\omega_i s))$$

Où  $s \in [-\pi, \pi]$  qui sont celles qui recouvrent le mieux l'espace  $[0, 1]^p$  en respectant une distribution uniforme des échantillons.

### V-3-4. THEORIE DES SOUS-ENSEMBLES FLOUS (FUZZY LOGIC)

La théorie des ensembles flous date depuis 1965. L'idée de la théorie a été induite par le professeur Lotfi Zadeh dans le cadre de manipuler les informations exprimées en langage naturel [127]. La théorie des ensembles classiques est basée sur une proposition qui soit vraie ou fausse [128]. En théorie des ensembles flous une proposition peut être partiellement vraie et fausse. Cette théorie est considérée comme étant le seul cadre dans lequel puissent être traitées des connaissances numériques et des connaissances exprimées symboliquement par des qualifications du langage naturel [76].

Soit  $X$  un ensemble référentiel et soit  $x$  un élément de  $X$ . On appelle un « ensemble flou »  $\tilde{A}$  de  $U$  un sous ensemble de  $E$  caractérisé par une fonction  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  qui prend ses valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Cette fonction dite « d'appartenance », donne le « degré d'appartenance » de  $x$  dans  $\tilde{A}$ . Un ensemble ordinaire est un cas particulier d'un ensemble flou ( $\mu_{\tilde{A}}(x)$  ne prend que 0 ou 1) [67, 99, 127, 129]. Formellement,  $\tilde{A}$  peut s'écrire comme :

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) / x \in E\}.$$

Le noyau de  $\tilde{A}$  représente l'ensemble des éléments qui appartiennent complètement à l'ensemble flou  $\tilde{A}$ , tel que :

$$\tilde{A} : \{x \in \Omega / \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\}.$$

Le support de  $\tilde{A}$  est défini par les éléments pour lesquels le degré d'appartenance n'est pas nul. Si le noyau de  $\tilde{A}$  est non vide,  $\tilde{A}$  est dite normalisé [61].

On appelle « nombre flou » tous ensemble flou  $\tilde{A}$  de référentiel l'ensemble  $R$  des nombres réels et possédant les deux propriétés suivantes [130] (Figure 43)

- 1)  $\tilde{A}$  est normalisé : il existe au moins une valeur  $m \in R$  telle que  $\mu_{\tilde{A}}(m) = 1$  ;
- 2)  $\tilde{A}$  est convexe :  $\forall (\alpha, \alpha') \in [0, 1]^2 : (\alpha \geq \alpha') \Rightarrow ([m_1 n_1] \leq [m_2 n_2])$

Un intervalle flou généralise un nombre flou sous forme d'intervalle (Figure 44). La représentation paramétrique d'un intervalle flou s'écrit :

$$\tilde{A} = (\alpha_1, [\alpha_2, \alpha_3], \alpha_4).$$

A noter un intervalle flou est un outil adapté à la représentation des quantités imprécises [131].

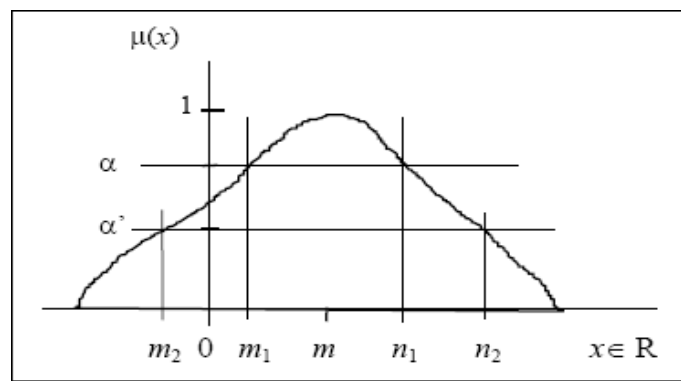


Figure 43 : Exemple d'un nombre flou.

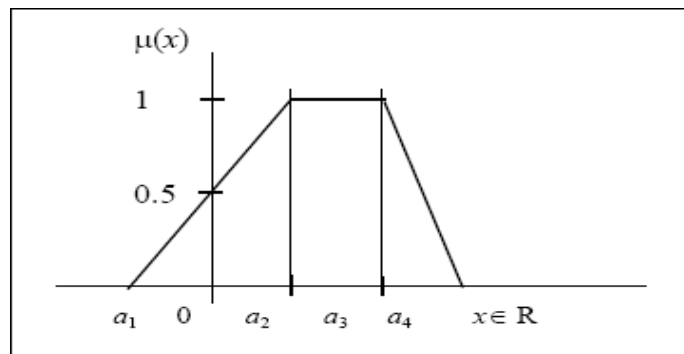


Figure 44 : Intervalle flou trapézoïdal.

Un nombre flou peut être caractérisé par un intervalle de confiance à un certain niveau  $\alpha$ . En effet, si on considère un nombre flou  $\tilde{A}$  de fonction d'appartenance  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ , en utilisant la méthode des  $\alpha$ -coupes, on obtient une série d'intervalles emboîtés. Les termes  $A_L^{(\alpha)}$  et  $A_R^{(\alpha)}$  représentent respectivement les limites gauche et droite de la fonction d'appartenance  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  à chaque  $\alpha$ - coupes [59, 131].

### V-3-5. THEORIE DES FONCTIONS DE CROYANCE (DST)

La théorie de *Dempster-Shafer* où théorie des fonctions de croyance fournit des outils mathématiques permettant à la fois de traiter de l'information de nature aléatoire et imprécise [132,

**133].** Les informations sont alors représentées comme des masses (poids de probabilité) affectées à des intervalles.

L'ensemble de la connaissance est synthétisé par une distribution de masse appelée aussi fonction de croyance. Toute distribution de probabilité et toute distribution de possibilité peuvent être représentées à l'aide d'une telle fonction ce qui a pour avantage de travailler dans un cadre commun pour traiter l'information quelle que soit sa nature aléatoire ou imprécise [61, 133].

La théorie de Dempster (1966-1968), complétée par les propositions Shafer en 1974, a donné naissance à un modèle mathématique de croyance connue sur le nom de la théorie de l'évidence. Cette théorie est un modèle d'inférence statistique qui généralise l'inférence Bayésienne et qui connaît des applications diverses telles que la modélisation des incertitudes dans les systèmes experts.

Elle permet de représenter explicitement, à partir d'outils mathématiques, l'incertitude liée aux connaissances (tels que l'avis des experts sur le degré de croyance que la PSV sera ouvert sur 5 sollicitations continu pendant 05 jours). Par cette méthode l'on peut modéliser le degré de croyance, notion « de croyance » qui se révèle particulièrement efficace lors de la combinaison de différents points de vue.

En résumant que la théorie DST est une théorie mathématique basée sur la notion de preuves [134] en utilisant les *fonctions de croyance* et le *raisonnement plausible*. Le but de cette théorie est de permettre de combiner des preuves distinctes pour calculer la probabilité d'un événement. [135]

La fonction de croyance  $Bel(A)$  (croyance que la vérité est dans  $A$ ) est par conséquent la somme des masses des propositions incluses dans  $A$ . Elle est définie par la formule suivante :

$$Bel(A) = \sum_{B_i \subset A} m(B_i)$$

La fonction de plausibilité  $Pl(A)$  (la plausibilité que la vérité est dans  $A$ ) est la somme de des masses des propositions dont l'intersection avec  $A$  n'est pas nulle, elle est donnée par la formule :

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B_i} m(B_i)$$

#### V-4. PROCEDURE DE CALCUL DE LA FREQUENCE D'ACCIDENT VIA LA METHODE NŒUD PAPIILLON

Dans le cadre de ce mémoire, nous proposons d'évaluer les incertitudes liées au calcul de la fréquence accidentelle. A cet effet, la méthode du nœud de papillon a été mise en œuvre.

Le Nœud Papillon est une approche arborescente développée par SHELL. Il permet de considérer une approche probabiliste dans le management du risque [136]. Le nœud papillon est une connexion d'un arbre de défaillances (AdD) et d'un arbre d'évènements (AdE), généralement établie lorsqu'il s'agit d'étudier des événements hautement critiques.

Le point central du Nœud Papillon est l'Événement Redouté Central. Généralement, ce dernier désigne une perte de confinement ou une perte d'intégrité physique (décomposition). La partie gauche sert à identifier les causes de cette perte de confinement, tandis que la partie droite du noeud s'attache à déterminer les conséquences de cet événement redouté central [136, 137].

Chaque scénario d'accident est relatif à un évènement redouté central et est représenté à travers un chemin possible allant des évènements indésirables ou courants jusqu'à l'apparition des effets majeurs.

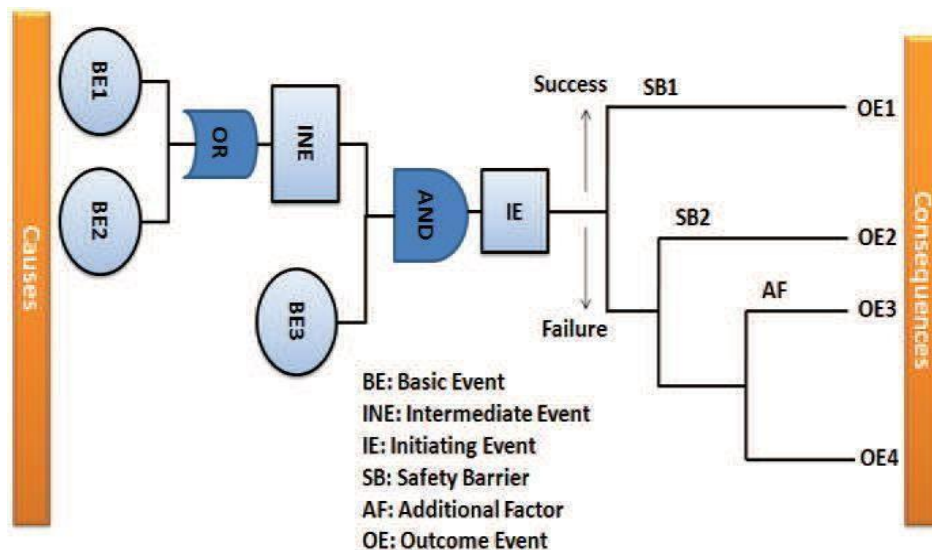


Figure 45 : Exemple d'un schéma de nœud de papillon [62].

Le nœud papillon permet d'avoir une vision globale des scénarios d'accident en mettant en exergue leurs causes, les liens logiques existant entre elles et les barrières de sécurité. La modélisation graphique des séquences accidentelles proposée par cet outil en fait un support adapté pour l'étape d'estimation probabiliste.

Les événements initiateurs peuvent être des agressions externes ou des défaillances du système étudié. Par exemple, le vieillissement des matériaux, le choc d'embâcles, la défaillance humaine lors d'une manœuvre, la non ouverture de clapets ou encore le séisme, la foudre, l'avalanche ...

Du point de vue pratique, les nœuds papillon mobilisent des méthodes spécifiques des arbres de défaillances et d'événements, et sont réalisés en groupe de travail. Ils permettent de visualiser :

- Les scénarios susceptibles de conduire à des accidents majeurs ;
- Les mesures de maîtrise des risques ;
- En conséquence directe des deux points précédents, les chemins critiques neprésentant pas suffisamment de mesures de maîtrise du risque.

Une fois que la structure nœud de papillon a été établie, par la suite une analyse probabiliste est effectuée. Elle vise à quantifier les fréquences de chaque ENS. Pour ce faire, la relation suivante s'applique :



$$w_{OE_i}(t) = w_{IE}(t) \cdot \prod_{j=1}^J P_{B_j}(t)$$

Avec :

- $w_{OE_i}(t)$  : Fréquence de l'événement indésirable d'ordre  $i$  (OE : Outcome Event).
- $w_{IE}(t)$  : fréquence de l'événement initiateur (IE : Initiating Event).
- $P_{B_j}(t)$  : probabilité de la branche d'ordre  $j$  (situé dans l'arbre d'événements) qui contribue à l'OE $_i$ .

Il est nécessaire de noter qu'on doit calculer la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur (événement de lancement) et pas sa probabilité comme on le voit dans de nombreux revues et publications.

Le  $w_{IE}(t)$  montant peuvent provenir de l'arbre de défaillance en utilisant les relations données ci-dessous [52, 138] :

$$w_{IE}(t) = \sum_{i=1}^I I_{BE_i}(t) \cdot \lambda_{BE_i} \cdot A_{BE_i}(t)$$

$$I_{BE_i}(t) = P_{TE/BE_i=true}(t) - P_{TE/BE_i=false}(t)$$

Avec :

- $I_{BE_i}(t)$  : coefficient d'importance de l'événement base (BE) de Birnbaum d'ordre  $i$ .
- $P_{TE}$  : Probabilité de l'événement indésirable.
- $\lambda_{BE_i}$  : Taux de défaillance du composant liée à la BE $_i$ .
- $A_{BE_i}(t)$  : Disponibilité du composant liée à la BE $_i$ .

Par ailleurs, la probabilité de défaillance d'une barrière de sécurité gérée avec un arbre de défaillance est calculée selon l'équation suivante. C'est une approximation basée sur les coupes minimales obtenus à partir de l'AdD. Des approches plus prisées peuvent servir à réaliser ce calcul, par exemple, diagramme de décision binaire (BDD) [139].

$$P_{TE}(t) = P(\text{UMCS}_i) \approx \sum_{i=1}^I P(\text{MCS}_i)$$

Les fréquences moyennes  $w_{OE_i}^{avg}$  liée aux événements de résultat sont calculées en intégrant l'équation :

$$w_{OE_i}(t) = w_{IE}(t) \cdot \prod_{j=1}^J P_{B_j}(t)$$

Sur une période d'observation donnée T :

$$w_{OEi}^{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T w_{OEi}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T w_E(t) \cdot \prod_{j=1}^J P_{Bj}(t) dt$$

## V-6. CONCLUSION

La prise en compte des incertitudes dans la démarche d'analyse des risques s'impose en raison des imperfections des modèles et données manipulés. Dans cette partie, nous avons rappelé les différents les notions d'incertitudes épistémique et stochastiques et aussi les niveaux de traitement d'incertitude dans l'analyse des risques. Puis nous avons présenté les Méthodes et techniques de l'évaluation des systèmes à paramètres imprécis comme Monte Carlo, logique floue et théorie de croyance.

Cependant dans la partie pratique nous expliquons la procédure de calcul de la fréquence d'accident utilisé dans notre mémoire.

## CHAPITRE VI : CALCUL DES FREQUENCES DE FUITE

### VI-1. INTRODUCTION

L'estimation des fréquences de fuites est une étape cruciale dans la conduite d'une évaluation quantitative des risques QRA dans le cadre d'une appréciation de la performance de la détection F&Gs.

Quand la fréquence à laquelle les fuites sont susceptibles d'être détectés peut-être déterminée, plusieurs facteurs doivent être pris en considération incluant ; la vétusté de l'équipement, le niveau de maintenance, le type de l'équipement, les paramètres opératoires, les conditions météorologiques et environnementales, ainsi que les dimensions de la fuite à prendre en compte. Ces éléments peuvent avoir un impact significatif sur une potentielle fréquence de fuite.

### VI-2. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE

En nous inspirant des données et bonnes pratiques stipulées dans les références du [DNVGL safety release notes v2017] et du [KRANCIJFERS handboek of failure frequencies 2016], La méthodologie pour laquelle nous avons optés pour cette étude dans le contexte du calcul des fréquences de fuite au niveau de la section de stockage 61 GPL/Butane Ambient ; consiste à calculer indépendamment la fréquence de fuite relative à chaque section constituant cette zone en identifiant en détails les différents points d'émission connus nommés « termes ou points sources » ainsi que leurs types et dimensions ; cette méthode se subdivise en les étapes suivantes :

#### VI-2-1. SEGMENTATION SCHEMATIQUE DU PROCESS DE LA SECTION

En se référant aux schémas P&ID de la section de stockage 61 incluant l'aire de stockage tampon (GPL) et l'aire de stockage C4 ambient, nous procéderons à la segmentation des sections en segments en vue d'une inventurisation des composants susceptibles d'être des points sources de fuite, nous citerons les vannes, brides, restrictions, piquages d'instrumentation, tuyauterie.

Les P&IDs suivants illustrent les brides, vannes et instruments ainsi que leurs dimensions (diamètre), les informations concernant la tuyauterie seront mises en exergue par les isométriques dont nous entamerons l'étude dans l'étape suivante :

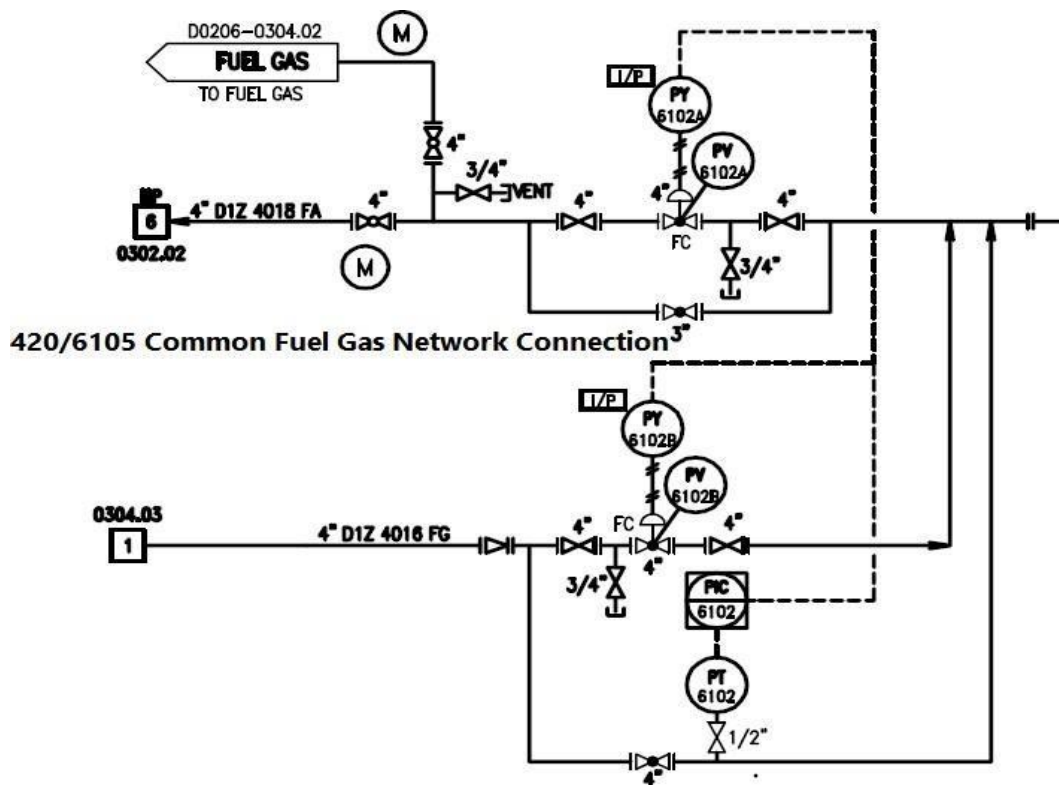


Figure 46 : Schéma P&ID du raccordement au réseau fuel gas des sphères 6105 Butane

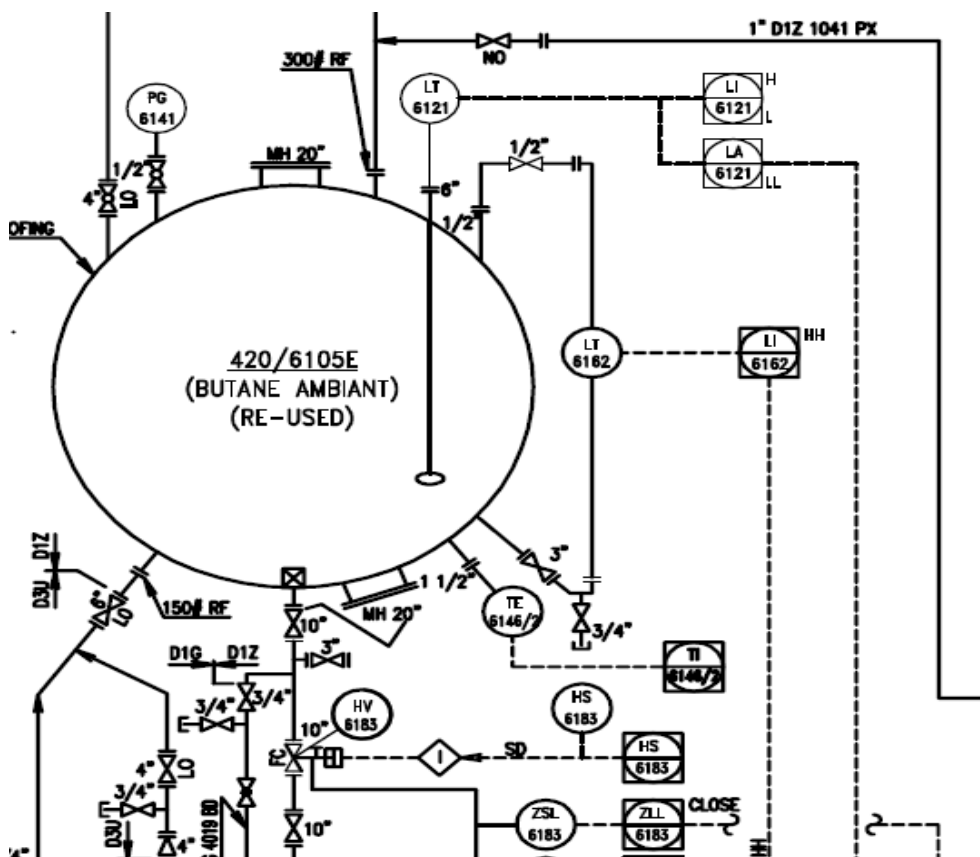


Figure 47 : Schéma P&ID des entrées et sorties de Sphères 6105 Butane

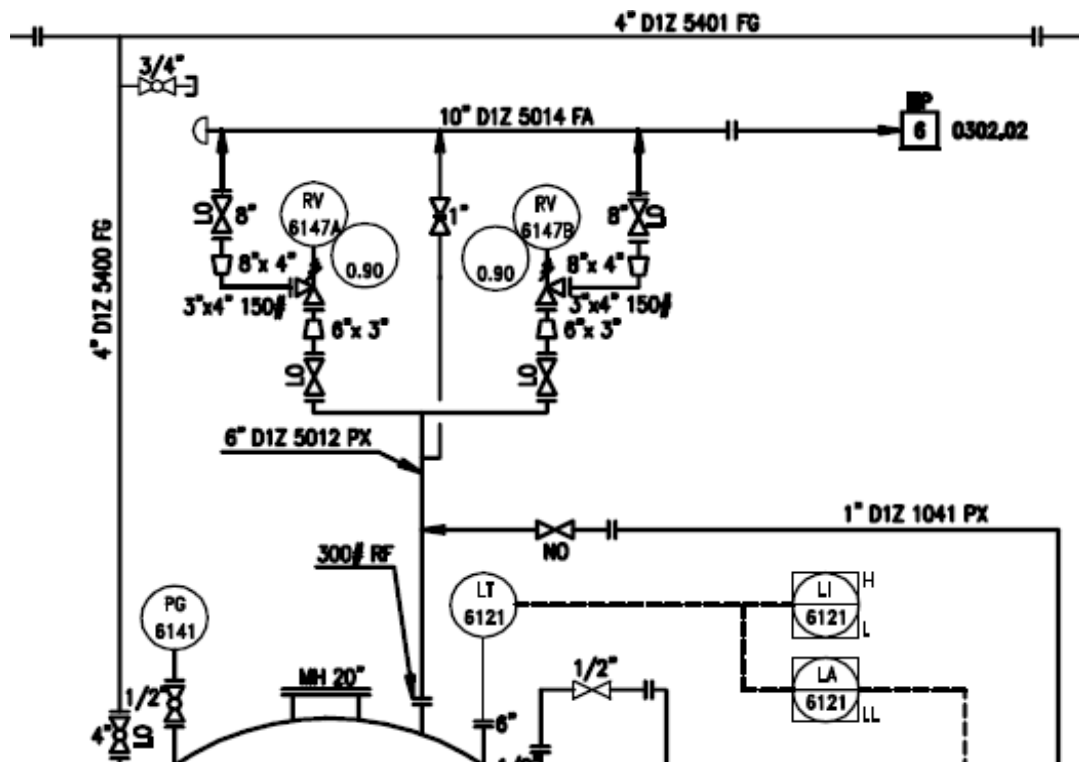


Figure 48 : Schéma P&ID du raccordement au réseau torchère des sphères A/G/E/F 6105

**N.B :** L'architecture des quatre sphères A/G/E/F ainsi que leurs raccordements aux réseaux F/G et torchère est identique hormis le point bas de la sphère G pourvue d'un appendice d'un diamètre de 20 pouces. L'autre variation réside dans les Inlets des sphères A/G et E/F, cette différence est illustrée dans le schéma à suivre.

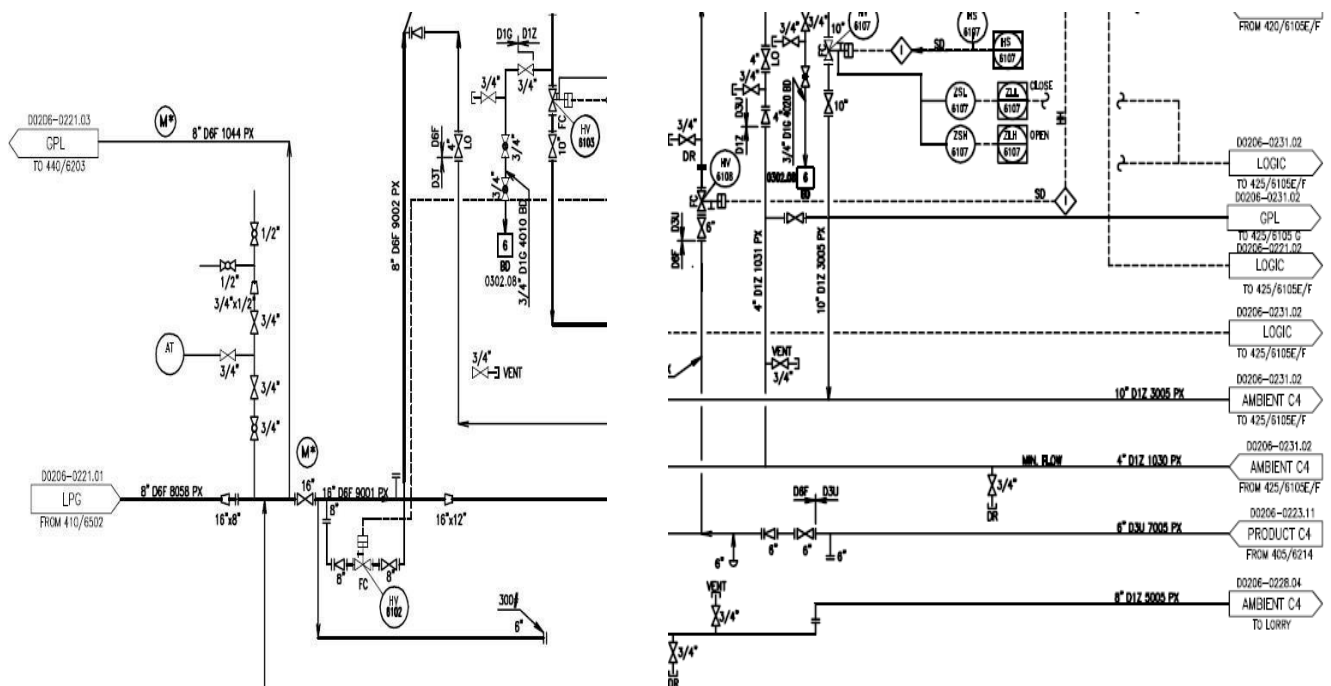


Figure 49 : Schéma P&ID comparatif des Intel des sphères 6105 A/G et E/F

## VI-2-2. IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT AINSI QUE LES PHASES ET RATIOS DU FLUIDE SPECIFIQUES A CHAQUE SECTION ET SEGMENT :

Le Matériel Balance ou bilan de matière constitue pour notre étude une pièce maîtresse dans la fiabilisation des résultats, or elle permet de situer avec détails les différentes phases du fluide dans les différents segments de la section ou zone étudiée, rappellerons-nous que le ratio ou le taux de chaque phase constitue une donnée essentielle à introduire dans la logique de calcul de fréquence de fuite du software DNVLEAK 3.3 que nous avons prévu à cet effet. Nous définirons à partir de la base de données locale du complexe GP2/Z les bilans de matière de chacun des segments définis dans l'étape précédente et ce dans un souci d'amoinrir au maximum l'erreur quadratique du résultat final que nous verrons dans les étapes successives du calcul.

Tableau 5 : Bilan de matière de l'entrée GPL des sphères 6105

| Stream No.                          | 101                | 102                    | 103               | 104                  | 105                   |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Description                         | 420/6105A<br>Inlet | 425/6205B/C/G<br>Inlet | 440/6203<br>Inlet | 440/6202A/B<br>Inlet | 440/6202A/B<br>Outlet |
| Phase                               | Liquid             | Liquid                 | Liquid            | Liquid               | Liquid                |
| Total Flow Rate [kg/hr]             | 250,000            | 175,000                | 175,000           | 175,000              | 175,000               |
| Temperature [C]                     | 38.0               | 38.0                   | 38.0              | 38.0                 | 38.0                  |
| Pressure [MPaG]                     | 2.00               | 0.70                   | 2.50              | 2.40                 | 2.25                  |
| Total Molecular Weight              | 49.27              | 49.27                  | 49.27             | 49.27                | 49.27                 |
| Vapor Flow Rate [kg/hr]             | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Vapor Density [kg/m <sup>3</sup> ]  | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Vapor Viscosity [mPa-s]             | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Liquid Flow Rate [kg/hr]            | 250,000            | 175,000                | 175,000           | 175,000              | 175,000               |
| Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ] | 504.7              | 516.6                  | 528.8             | 528.8                | 528.8                 |
| Liquid Viscosity [mPa-s]            | 0.104              | 0.113                  | 0.123             | 0.123                | 0.123                 |
| Surface Tension [N/m]               | 0.007              | 0.008                  | 0.009             | 0.009                | 0.009                 |
| Composition                         |                    |                        |                   |                      |                       |
| C1 [mol%]                           | 0.23               | 0.23                   | 0.23              | 0.23                 | 0.23                  |
| C2 [mol%]                           | 1.76               | 1.76                   | 1.76              | 1.76                 | 1.76                  |
| C3 [mol%]                           | 59.19              | 59.19                  | 59.19             | 59.19                | 59.19                 |
| iC4 [mol%]                          | 12.11              | 12.11                  | 12.11             | 12.11                | 12.11                 |
| nC4 [mol%]                          | 26.41              | 26.41                  | 26.41             | 26.41                | 26.41                 |
| iC5 [mol%]                          | 0.23               | 0.23                   | 0.23              | 0.23                 | 0.23                  |
| nC5 [mol%]                          | 0.07               | 0.07                   | 0.07              | 0.07                 | 0.07                  |

Tableau 6 : Bilan de matières de l'entrée/sortie des sphères 6105 C4

| Stream No.                          | 301               | 302               | 303                  | 306                  | 307                  | 308                   | 309               |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| Description                         | 410/6106<br>Inlet | 420/6104<br>Inlet | 461/6401A/H<br>Inlet | 430/6101D/E<br>Inlet | 430/6101D/E<br>Inlet | 430/6101D/E<br>Outlet | 405/6107<br>Inlet |
| Phase                               | Mixed             | Liquid            | Liquid               | Vapor                | Vapor                | Vapor                 | Vapor             |
| Total Flow Rate [kg/hr]             | 96,500            | 97,600            | 1,000,000            | 12,700               | (2,300)              | 15,000                | 9,830             |
| Temperature [C]                     | -45.0             | -44.5             | -44.6                | -44.7                | -44.6                | 60.0                  | 60.0              |
| Pressure [MPaG]                     | 0.004             | 0.38              | (0.30)               | 0.004                | 0.004                | 0.70                  | 0.70              |
| Total Molecular Weight              | 43.62             | 43.77             | 43.77                | 41.58                | 41.60                | 41.59                 | 41.59             |
| Vapor Flow Rate [kg/hr]             | 4,100             | n/a               | n/a                  | 12,700               | (2,300)              | 15,000                | 9,830             |
| Vapor Density [kg/m <sup>3</sup> ]  | 2.4               | n/a               | n/a                  | 2.4                  | 2.4                  | 13.1                  | 13.1              |
| Vapor Viscosity [mPa-s]             | 0.007             | n/a               | n/a                  | 0.007                | 0.007                | 0.009                 | 0.009             |
| Liquid Flow Rate [kg/hr]            | 92,400            | 97,600            | 1,000,000            | n/a                  | n/a                  | n/a                   | n/a               |
| Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ] | 586.8             | 586.9             | (587.0)              | n/a                  | n/a                  | n/a                   | n/a               |
| Liquid Viscosity [mPa-s]            | 0.211             | 0.211             | 0.211                | n/a                  | n/a                  | n/a                   | n/a               |
| Surface Tension [N/m]               | 0.016             | 0.016             | 0.016                | n/a                  | n/a                  | n/a                   | n/a               |
| Composition                         |                   |                   |                      |                      |                      |                       |                   |
| C1 [mol%]                           | 0.00              | 0.00              | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00              |
| C2 [mol%]                           | 4.25              | 3.19              | 3.16                 | 18.07                | 17.95                | 18.05                 | 18.05             |
| C3 [mol%]                           | 94.89             | 95.96             | 95.98                | 81.77                | 81.89                | 81.79                 | 81.79             |
| iC4 [mol%]                          | 0.72              | 0.72              | 0.72                 | 0.14                 | 0.14                 | 0.14                  | 0.14              |
| nC4 [mol%]                          | 0.14              | 0.14              | 0.14                 | 0.02                 | 0.02                 | 0.02                  | 0.02              |
| iC5 [mol%]                          | 0.00              | 0.00              | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00              |
| nC5 [mol%]                          | 0.00              | 0.00              | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00              |

Tableau 7 : Bilan de matières de l'entrée/sortie des sphères 6105 GPL

| Stream No.                          | 331                | 332                  | 333                    | 334                | 335               | 304               | 305                  |
|-------------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Description                         | 420/6105<br>Outlet | 430/6101A/B<br>Inlet | 405/6103,6104<br>Inlet | 410/6108<br>Outlet | 410/6107<br>Inlet | 420/6105<br>Inlet | 461/6401D/G<br>Inlet |
| Phase                               | Vapor              | Vapor                | Vapor                  | Liquid             | Vapor             | Liquid            | Liquid               |
| Total Flow Rate [kg/hr]             | 1,540              | 8,410                | 3,520                  | 1,540              | 4,890             | 80,040            | 800,000              |
| Temperature [C]                     | -7.4               | -7.4                 | 64.9                   | 40.0               | 64.9              | -9.2              | -9.2                 |
| Pressure [MPaG]                     | 0.004              | 0.004                | 0.60                   | 0.60               | 0.60              | 0.004             | 0.15                 |
| Total Molecular Weight              | 56.14              | 56.14                | 56.14                  | 56.14              | 56.14             | 57.62             | 57.62                |
| Vapor Flow Rate [kg/hr]             | 1,540              | 8,410                | 3,520                  | n/a                | 4,890             | n/a               | n/a                  |
| Vapor Density [kg/m <sup>3</sup> ]  | 2.8                | 2.8                  | 16.0                   | n/a                | 16.0              | n/a               | n/a                  |
| Vapor Viscosity [mPa-s]             | 0.007              | 0.007                | 0.009                  | n/a                | 0.009             | n/a               | n/a                  |
| Liquid Flow Rate [kg/hr]            | n/a                | n/a                  | n/a                    | 1,540              | n/a               | 80,040            | 800,000              |
| Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ] | n/a                | n/a                  | n/a                    | 532.6              | n/a               | 601.5             | 601.7                |
| Liquid Viscosity [mPa-s]            | n/a                | n/a                  | n/a                    | 0.124              | n/a               | 0.223             | 0.223                |
| Surface Tension [N/m]               | n/a                | n/a                  | n/a                    | 0.009              | n/a               | 0.015             | 0.015                |
| Composition                         |                    |                      |                        |                    |                   |                   |                      |
| C1 [mol%]                           | 0.00               | 0.00                 | 0.00                   | 0.00               | 0.00              | 0.00              | 0.00                 |
| C2 [mol%]                           | 0.00               | 0.00                 | 0.00                   | 0.00               | 0.00              | 0.00              | 0.00                 |
| C3 [mol%]                           | 14.37              | 14.38                | 14.38                  | 14.38              | 14.38             | 4.65              | 4.65                 |
| iC4 [mol%]                          | 43.86              | 43.87                | 43.87                  | 43.87              | 43.87             | 38.26             | 38.26                |
| nC4 [mol%]                          | 41.52              | 41.51                | 41.51                  | 41.51              | 41.51             | 56.05             | 56.05                |
| iC5 [mol%]                          | 0.23               | 0.23                 | 0.23                   | 0.23               | 0.23              | 0.93              | 0.93                 |
| nC5 [mol%]                          | 0.02               | 0.02                 | 0.02                   | 0.02               | 0.02              | 0.10              | 0.10                 |

Tableau 8 : Bilan de matières de l'alimentation en Fuel Gas des sphères 6105 GPL/C4

| Stream No.                          | 101                | 102                    | 103               | 104                  | 105                   |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Description                         | 420/6105A<br>Inlet | 425/6205B/C/G<br>Inlet | 440/6203<br>Inlet | 440/6202A/B<br>Inlet | 440/6202A/B<br>Outlet |
| Phase                               | Liquid             | Liquid                 | Liquid            | Liquid               | Liquid                |
| Total Flow Rate [kg/hr]             | 250,000            | 175,000                | 175,000           | 175,000              | 175,000               |
| Temperature [C]                     | 38.0               | 38.0                   | 38.0              | 38.0                 | 38.0                  |
| Pressure [MPaG]                     | 2.00               | 0.70                   | 2.50              | 2.40                 | 2.25                  |
| Total Molecular Weight              | 48.55              | 48.55                  | 48.55             | 48.55                | 48.55                 |
| Vapor Flow Rate [kg/hr]             | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Vapor Density [kg/m <sup>3</sup> ]  | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Vapor Viscosity [mPa-s]             | n/a                | n/a                    | n/a               | n/a                  | n/a                   |
| Liquid Flow Rate [kg/hr]            | 250,000            | 175,000                | 175,000           | 175,000              | 175,000               |
| Liquid Density [kg/m <sup>3</sup> ] | 501.3              | 516.9                  | 525.0             | 525.0                | 525.0                 |
| Liquid Viscosity [mPa-s]            | 0.102              | 0.113                  | 0.120             | 0.120                | 0.120                 |
| Surface Tension [N/m]               | 0.007              | 0.008                  | 0.008             | 0.008                | 0.008                 |
| <b>Composition</b>                  |                    |                        |                   |                      |                       |
| C1 [mol%]                           | 0.00               | 0.00                   | 0.00              | 0.00                 | 0.00                  |
| C2 [mol%]                           | 1.36               | 1.36                   | 1.36              | 1.36                 | 1.36                  |
| C3 [mol%]                           | 65.93              | 65.93                  | 65.93             | 65.93                | 65.93                 |
| iC4 [mol%]                          | 8.07               | 8.07                   | 8.07              | 8.07                 | 8.07                  |
| nC4 [mol%]                          | 24.24              | 24.24                  | 24.24             | 24.24                | 24.24                 |
| iC5 [mol%]                          | 0.34               | 0.34                   | 0.34              | 0.34                 | 0.34                  |
| nC5 [mol%]                          | 0.06               | 0.06                   | 0.06              | 0.06                 | 0.06                  |

Tableau 9 : Bilan de matière des soupapes de sécurité RV-6105G/A/E/F

| TAG NO.                     | -                          | RV-6104A/B        | RV-6110A/B   | RV-6131              |              |      |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------------------|--------------|------|
| CASE NO./NAME               | -                          |                   |              |                      |              |      |
| SERVICE                     | -                          | 420/6105A         | 420/6105G    | 425/6205B/C/G Disch. |              |      |
| GENERAL                     | LINE NO./VESSEL NO.        | -                 | -            | -                    |              |      |
|                             | NO. VALVES REQUIRED        | -                 | 2            | 1                    |              |      |
|                             | FULL NOZZLE/SEMI NOZZLE    | -                 | -            | -                    |              |      |
|                             | SAFETY/RELIEF              | -                 | SAFETY       | SAFETY               | RELIEF       |      |
|                             | CONV./BELLWS/PILOT OP (*1) | -                 | CONVENTIONAL | CONVENTIONAL         | CONVENTIONAL |      |
|                             | BONNET TYPE                | -                 | -            | -                    | -            |      |
| FLUID DATA                  | FLUID NAME                 | -                 | LPG          | LPG                  | LPG          |      |
|                             | FLUID PHASE                | -                 | Vapor        | Vapor                | Liquid       |      |
|                             | CAPACITY/UNIT              | -                 | 15,400 kg/h  | 15,400 kg/h          | 30 kg/h      |      |
|                             | MOL. WEIGHT(VAPOR)         | -                 | 49           | 49                   | -            |      |
|                             | OPE. DENSITY(LIQUID)       | kg/m <sup>3</sup> | -            | -                    | 526          |      |
|                             | OPE. PRESSURE              | MPaG              | 0.7          | 0.7                  | 2.5          |      |
|                             | SET PRESSURE               | MPaG              | 1.55         | 1.55                 | 2.90         |      |
|                             | TEMPERATURE(OPE./DES.)     | °C                | 38           | 60                   | 38           | 60   |
|                             | RELIEVING TEMP.            | °C                | 61           | 61                   | 38           | 38   |
|                             | BACK PRESS.                | CONSTANT          | MPaG         | 0.03                 | 0.03         | 0.03 |
|                             |                            | VARIABLE          | MPaG         | 0.02                 | 0.02         | 0.02 |
|                             |                            | TOTAL             | MPaG         | 0.05                 | 0.05         | 0.05 |
|                             | ACCUMULATION               | %                 | 20           | 20                   | 10           |      |
|                             | BLOWDOWN                   | %                 | -            | -                    | -            |      |
|                             | COMPRESS.FACTOR            | -                 | 0.763        | 0.763                | -            |      |
| LATENT HEAT OF VAPORIZATION | KJ/Kg                      | -                 | -            | -                    |              |      |
| RATIO OF SPECIFIC HEATS     | -                          | 1.3               | 1.3          | -                    |              |      |
| OPE. VISCOSITY(VAP/LIQ)     | mPa·S                      | 0.008             | -            | 0.008                | -            | 0.12 |
| CORROSIVE COMPOUNDS         | -                          | -                 | -            | -                    | -            |      |



### VI-2-3. IDENTIFICATION DES SEGMENTS COMPOSANT LA SECTION DE STOCKAGE 61 :

L'identification des segments se fera par l'inventorisation des différents éléments susceptibles d'être des points sources de fuite, ainsi que leurs paramètres d'opérabilité, la phase et le ratio du fluide, ce en se basant sur les données recueillies au préalable.

Ci-dessous les identifications par l'interface du software DNVLEAK v3.3 des différents éléments et organes sélectionnées dans le cadre de l'étude de la fréquence de fuite dans la section 61 de stockage :

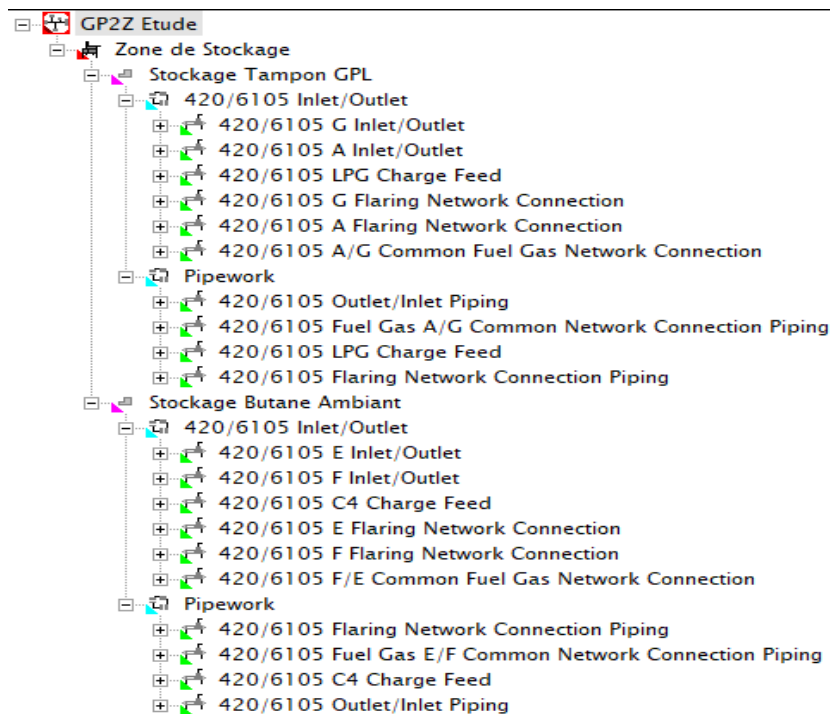


Figure 50 : Segmentation de la section de stockage 61

| Type                     | Library | Number | Size  | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--------------------------|---------|--------|-------|----------|-----------|--------------|
| -----                    | -----   | -----  | ----- | -----    | -----     | -----        |
|                          |         |        | (mm)  | (bar)    | (%)       | (%)          |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 3      | 76.2  | 7.8      | 2.75      | 97.25        |
| YONEKI300 WCB H User Def |         | 3      | 203.2 | 8        | 2.50      | 97.50        |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 1      | 152.4 | 7.8      | 2.75      | 97.25        |
| YONEKI300 WCB H User Def |         | 1      | 254   | 7.8      | 2.75      | 97.25        |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 1      | 50.8  | 7.8      | 2.75      | 97.25        |
| Appendix User Def        |         | 1      | 558.8 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 9      | 19.05 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Temperature Sen User Def |         | 1      | 25.4  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| FLANGE Standard          |         | 10     | 203.2 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| FLANGE Standard          |         | 4      | 101.6 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Manhole User Def         |         | 2      | 609.6 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| FLANGE Standard          |         | 2      | 609.6 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| FLANGE Standard          |         | 6      | 254   | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Backflow Valve User Def  |         | 1      | 203.2 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 1      | 609.6 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 1      | 558.8 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 5      | 19.05 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 2      | 76.2  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 1      | 12.7  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Welding User Def         |         | 2      | 50.8  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Level sensor Unknown     |         | 1      | 12.7  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Level sensor Unknown     |         | 1      | 76.2  | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Divergent Weldi User Def |         | 1      | 304.8 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| KOSO150 Pneumat User Def |         | 1      | 203.2 | 8        | 1.90      | 98.10        |
| Level Gauge User Def     |         | 1      | 152.4 | 8        | 1.90      | 98.10        |

Figure 51 : Identification des éléments composant le segment d'entrée et sortie des sphères A/G GPL

| Type                     | Library | Number | Size  | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--------------------------|---------|--------|-------|----------|-----------|--------------|
| -----                    | -----   | -----  | ----- | -----    | -----     | -----        |
|                          |         |        | (mm)  | (bar)    | (%)       | (%)          |
| YONEKI300 WCB H User Def |         | 1      | 406.4 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| YONEKI300 WCB H User Def |         | 1      | 355.6 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| FLANGE Standard          |         | 1      | 203.2 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| FLANGE Standard          |         | 1      | 101.6 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| FLANGE Standard          |         | 2      | 406.4 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| Convergent Weld User Def |         | 1      | 304.8 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| Convergent Weld User Def |         | 1      | 16    | 8        | 2.10      | 97.90        |
| Convergent Weld User Def |         | 1      | 406.4 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| Convergent Weld User Def |         | 1      | 19.05 | 8        | 2.10      | 97.90        |
| Backflow Valve User Def  |         | 1      | 101.6 | 8        | 2.10      | 97.90        |

Figure 52 : Identification des éléments composant le segment d'entrée de charge GPL

| Type                     | Library | Number | Size  | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--------------------------|---------|--------|-------|----------|-----------|--------------|
| -----                    | -----   | -----  | ----- | -----    | -----     | -----        |
|                          |         |        | (mm)  | (bar)    | (%)       | (%)          |
| FLANGE Standard          |         | 6      | 152.4 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Welding User Def         |         | 3      | 152.4 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Manhole User Def         |         | 1      | 609.6 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 2      | 152.4 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Convergent Weld User Def |         | 2      | 76.2  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Divergent Weldi User Def |         | 2      | 203.2 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Pressure Relief User Def |         | 2      | 101.6 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| FLANGE Standard          |         | 4      | 203.2 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| YONEKI300 WCB H User Def |         | 2      | 203.2 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 1      | 25.4  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Welding User Def         |         | 1      | 25.4  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 1      | 19.05 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| YONEKI300 LCB H User Def |         | 1      | 12.7  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Pressure Glass User Def  |         | 1      | 12.7  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| FLANGE Standard          |         | 2      | 101.6 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Welding User Def         |         | 2      | 19.05 | 1.3      | 97.20     | 2.80         |
| Welding User Def         |         | 2      | 12.7  | 1.3      | 97.20     | 2.80         |

Figure 53 : Identification des éléments du segment raccordement commun au réseau FG des sphères A/G/E/F

|   | Type            | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|---|-----------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|   |                 |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| 420/6105 A/G Common Fuel Gas Network Connection | -----           | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| VENT (x2)                                       | VENT            | User Def | 2      | 19.05  | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| YONEKI300 LCB HandValve (x3)                    | YONEKI300 LCB H | User Def | 3      | 19.05  | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| Binocle Joint (x1)                              | Binocle Joint   | User Def | 1      | 101.6  | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| Backflow Valve (x1)                             | Backflow Valve  | User Def | 1      | 101.6  | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| KOSO V3GA80 Pneumatic Shut Off BallValve (x2)   | KOSO V3GA80 Pnc | User Def | 2      | 101.6  | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| Manual Ballvalve (x1)                           | Manual Ballvalv | User Def | 1      | 76.2   | 6.9      | 96.80     | 3.20         |
| YONEKI300 LCB HandValve (x1)                    | YONEKI300 LCB H | User Def | 1      | 12.7   | 6.9      | 96.80     | 3.20         |

Figure 54 : Identification des éléments du segment de raccordement au réseau torchère des sphères A/G

|                              | Type      | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|------------------------------|-----------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|                              |           |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| Pipework                     |           |          |        |        |          |           |              |
| 420/6105 Outlet/Inlet Piping | -----     | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| PIPE 8" (x24.6)              | PIPE 8"   | User Def | 24.6   | 203.2  | 7.9      | 3.20      | 96.80        |
| 90° Elbow (x0.62)            | 90° Elbow | User Def | 0.62   | 203.2  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 8" (x18.3)              | PIPE 8"   | User Def | 18.3   | 203.2  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| 90° Elbow (x0.59)            | 90° Elbow | User Def | 0.59   | 203.2  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| 90° Elbow (x0.59)            | 90° Elbow | User Def | 0.59   | 203.2  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 8" (x7.6)               | PIPE 8"   | User Def | 7.6    | 203.2  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 6" (x1.36)              | PIPE 6"   | User Def | 1.36   | 152.4  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 10" (x13)               | PIPE 10"  | User Def | 13     | 254    | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| 90° Elbow (x5.2)             | 90° Elbow | User Def | 5.2    | 254    | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 10" (x2.6)              | PIPE 10"  | User Def | 2.6    | 254    | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 3/4" (x0.39)            | PIPE 3/4" | User Def | 0.39   | 19.05  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 3/4" (x0.46)            | PIPE 3/4" | User Def | 0.46   | 19.05  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 2" (x0.4)               | PIPE 2"   | User Def | 0.4    | 50.8   | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 1/2" (x0.22)            | PIPE 1/2" | User Def | 0.22   | 12.7   | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 3/4" (x0.3)             | PIPE 3/4" | User Def | 0.3    | 19.05  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |
| PIPE 3/4" (x0.23)            | PIPE 3/4" | User Def | 0.23   | 19.05  | 7.9      | 3.10      | 96.90        |

Figure 55 : Identification des éléments constituant la tuyauterie de l'entrée et sortie des sphères A/G

|  | Type       | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--|------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|  |            |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| 420/6105 Fuel Gas A/G Common Network Connection Piping | -----      | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| PIPE 4" (x3.8)   | PIPE 4"    | User Def | 3.8    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.4)                                       | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x3.2)   | PIPE 4"    | User Def | 3.2    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.4)                                       | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x2.6)   | PIPE 4"    | User Def | 2.6    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.4)                                       | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x2.06)  | PIPE 4"    | User Def | 2.06   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.4)                                       | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x2.76)  | PIPE 4"    | User Def | 2.76   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 110° Elbow (x0.65)                                     | 110° Elbow | User Def | 0.65   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x11.8)  | PIPE 4"    | User Def | 11.8   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 120° Elbow (x0.41)                                     | 120° Elbow | User Def | 0.41   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x10.7)  | PIPE 4"    | User Def | 10.7   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.39)                                      | 90° Elbow  | User Def | 0.39   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x8.1)   | PIPE 4"    | User Def | 8.1    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 90° Elbow (x0.29)                                      | 90° Elbow  | User Def | 0.29   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x2.8)   | PIPE 4"    | User Def | 2.8    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x20.2)  | PIPE 4"    | User Def | 20.2   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| 120° Elbow (x1.3)                                      | 120° Elbow | User Def | 1.3    | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |
| PIPE 4" (x84.7)  | PIPE 4"    | User Def | 84.7   | 101.6  | 8        | 96.40     | 3.60         |

Figure 56 : Identification des éléments de la tuyauterie du raccordement au réseau FG des sphères A/G

| 420/6105 LPG Charge Feed |                    | Type       | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--------------------------|--------------------|------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|                          |                    |            |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +                        | PIPE 8" (x15.2)    | -----      | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +                        | PIPE 16" (x6.3)    | PIPE 8"    | User Def | 15.2   | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | PIPE 12" (x11)     | PIPE 16"   | User Def | 6.3    | 406.4  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | PIPE 8" (x4.3)     | PIPE 12"   | User Def | 11     | 304.8  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | PIPE 14" (x3.6)    | PIPE 8"    | User Def | 4.3    | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | PIPE 4" (x12.3)    | PIPE 14"   | User Def | 3.6    | 355.6  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 110° Elbow (x0.8)  | PIPE 4"    | User Def | 12.3   | 101.6  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 120° Elbow (x0.9)  | 110° Elbow | User Def | 0.8    | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 110° Elbow (x0.56) | 120° Elbow | User Def | 0.9    | 406.4  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 90° Elbow (x0.38)  | 110° Elbow | User Def | 0.56   | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 90° Elbow (x0.41)  | 90° Elbow  | User Def | 0.38   | 101.6  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 90° Elbow (x0.4)   | 90° Elbow  | User Def | 0.41   | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |
| +                        | 90° Elbow (x0.4)   | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 203.2  | 8        | 2.20      | 97.80        |

Figure 57 : Identification des éléments de tuyauterie de l'alimentation en GPL des sphères A/G

| 420/6105 Flaring Network Connection Piping |                   | Type       | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--|-------------------|------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|  |                   |            |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +  | PIPE 6" (x1.2)    | -----      | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +  | 90° Elbow (x0.73) | PIPE 6"    | User Def | 1.2    | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 4" (x0.38)   | 90° Elbow  | User Def | 0.73   | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | 120° Elbow (x2.4) | PIPE 4"    | User Def | 0.38   | 101.6  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | 110° Elbow (x2.1) | 120° Elbow | User Def | 2.4    | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 8" (x4.6)    | 110° Elbow | User Def | 2.1    | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | 90° Elbow (x0.84) | PIPE 8"    | User Def | 4.6    | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 8" (x2.24)   | 90° Elbow  | User Def | 0.84   | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 8" (x4.46)   | PIPE 8"    | User Def | 2.24   | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 6" (x10.2)   | PIPE 8"    | User Def | 4.46   | 203.2  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | 90° Elbow (x0.82) | PIPE 6"    | User Def | 10.2   | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 6" (x11.3)   | 90° Elbow  | User Def | 0.82   | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | 90° Elbow (x0.6)  | PIPE 6"    | User Def | 11.3   | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 6" (x14.3)   | 90° Elbow  | User Def | 0.6    | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
| +  | PIPE 44" (x19.3)  | PIPE 6"    | User Def | 14.3   | 152.4  | 1.3      | 95.90     | 4.10         |
|  |                   | PIPE 44"   | User Def | 19.3   | 1117.6 | 1.3      | 95.90     | 4.10         |

Figure 58 : Identification des éléments de tuyauterie du raccordement au réseau torchère des sphères A/G/E/F

| 420/6105 Fuel Gas E/F Common Network Connection Piping |                    | Type       | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|--|--------------------|------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|  |                    |            |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +  | PIPE 4" (x3.8)     | -----      | -----    | -----  | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| +  | 90° Elbow (x0.4)   | PIPE 4"    | User Def | 3.8    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x3.2)     | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 90° Elbow (x0.4)   | PIPE 4"    | User Def | 3.2    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x2.6)     | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 90° Elbow (x0.4)   | PIPE 4"    | User Def | 2.6    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x2.06)    | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 90° Elbow (x0.4)   | PIPE 4"    | User Def | 2.06   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x2.76)    | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 110° Elbow (x0.65) | PIPE 4"    | User Def | 2.76   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x11.8)    | 110° Elbow | User Def | 0.65   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 120° Elbow (x0.41) | PIPE 4"    | User Def | 11.8   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x10.7)    | 120° Elbow | User Def | 0.41   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 90° Elbow (x0.39)  | PIPE 4"    | User Def | 10.7   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x8.1)     | 90° Elbow  | User Def | 0.39   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 90° Elbow (x0.29)  | PIPE 4"    | User Def | 8.1    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x2.8)     | 90° Elbow  | User Def | 0.29   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x20.2)    | PIPE 4"    | User Def | 2.8    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | 120° Elbow (x1.3)  | PIPE 4"    | User Def | 20.2   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
| +  | PIPE 4" (x84.7)    | 120° Elbow | User Def | 1.3    | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |
|  |                    | PIPE 4"    | User Def | 84.7   | 101.6  | 5.9      | 96.40     | 3.60         |

Figure 59 : Identification des éléments de tuyauterie du raccordement FG des sphères F/E

| 420/6105 C4 Charge Feed | Type       | Library  | Number | Size   | Pressure | Gas (Vol) | Liquid (Vol) |
|-------------------------|------------|----------|--------|--------|----------|-----------|--------------|
|                         |            |          |        | --(mm) | --(bar)  | --(%)     | --(%)        |
| PIPE 8" (x15.2)         | ---        | ---      | ---    | ---    | ---      | ---       | ---          |
| PIPE 8" (x4.3)          | PIPE 8"    | User Def | 15.2   | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| PIPE 4" (x12.3)         | PIPE 8"    | User Def | 4.3    | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 110° Elbow (x0.8)       | PIPE 4"    | User Def | 12.3   | 101.6  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 120° Elbow (x0.9)       | 110° Elbow | User Def | 0.8    | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 110° Elbow (x0.56)      | 120° Elbow | User Def | 0.9    | 406.4  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 90° Elbow (x0.38)       | 110° Elbow | User Def | 0.56   | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 90° Elbow (x0.41)       | 90° Elbow  | User Def | 0.38   | 101.6  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 90° Elbow (x0.41)       | 90° Elbow  | User Def | 0.41   | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 90° Elbow (x0.4)        | 90° Elbow  | User Def | 0.4    | 203.2  | 5        | 2.20      | 97.80        |
| PIPE 10" (x5.8)         | PIPE 10"   | User Def | 5.8    | 254    | 5        | 2.20      | 97.80        |
| 110° Elbow (x0.89)      | 110° Elbow | User Def | 0.89   | 254    | 5        | 2.20      | 97.80        |
| PIPE 10" (x6.7)         | PIPE 10"   | User Def | 6.7    | 254    | 5        | 2.20      | 97.80        |
| PIPE 10" (x5.9)         | PIPE 10"   | User Def | 5.9    | 254    | 5        | 2.20      | 97.80        |

Figure 60 : Identification des éléments de tuyauterie de l'alimentation en C4 des sphères F/E

**VI-2-4. IDENTIFICATION DES ISOMETRIQUES DE TUYAUTERIE ET VANNERIE DE LA SECTION DE STOCKAGE 61 A/G/E/F, LES RESTRICTIONS, AINSI QUE LEURS DIMENSIONS ET AGENCEMENT :**

La figure 62 ci-dessous est une schématisation en trois dimensions de l'alimentation en C4 ambient des sphères F/E, incluant deux lignes connectées à deux sphères de charge, et un jeu de vannes manuelles de types YONEKI WCB de 8 pouces, ainsi qu'une vanne pneumatique d'arrêt de type KOSO150 de 10 pouces en aval du manifold de distribution. La hauteur de la tuyauterie varie en 0.78m et 1.42m.



Figure 61 : Isométrique de piping et vannerie du segment de sortie C4 des sphères 6105E/F Butane ambient

La figure 63 représente le réseau torchère spécifique à la section de stockage 61, connecté au 4 sphères via 4 lignes de 10 pouces acheminées vers une ligne 30 pouces qui se caractérise par une restriction divergente faisant varier le diamètre vers 44 pouces vers le ballon torchère. La hauteur de la tuyauterie varie entre 5m47 et 6m10.

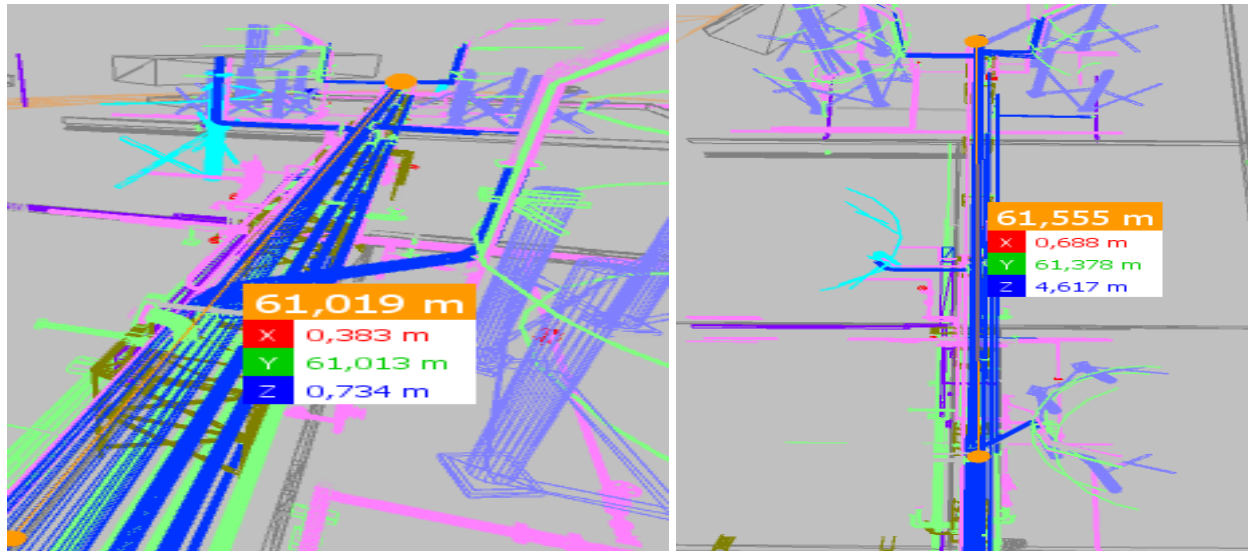


Figure 62 : Isométrique de piping du segment réseau torchère de la section de stockage 61 A/G/E/F

La figure 64 illustre les dimensions de la tuyauterie en tête des sphères de stockage, regroupant la connexion au réseau Fuel Gas et au réseau torchère par le biais d'une pipe de 10 pouces, ainsi que la vannerie de facture YONEKI LCB de diamètre 4 pouces et 6 pouces, et deux soupapes desécurité ANDERSON GREENWOOD CROSBY de 4pouces. La hauteur de la tuyauterie varie entre 11m24 et 12m16 du sol.

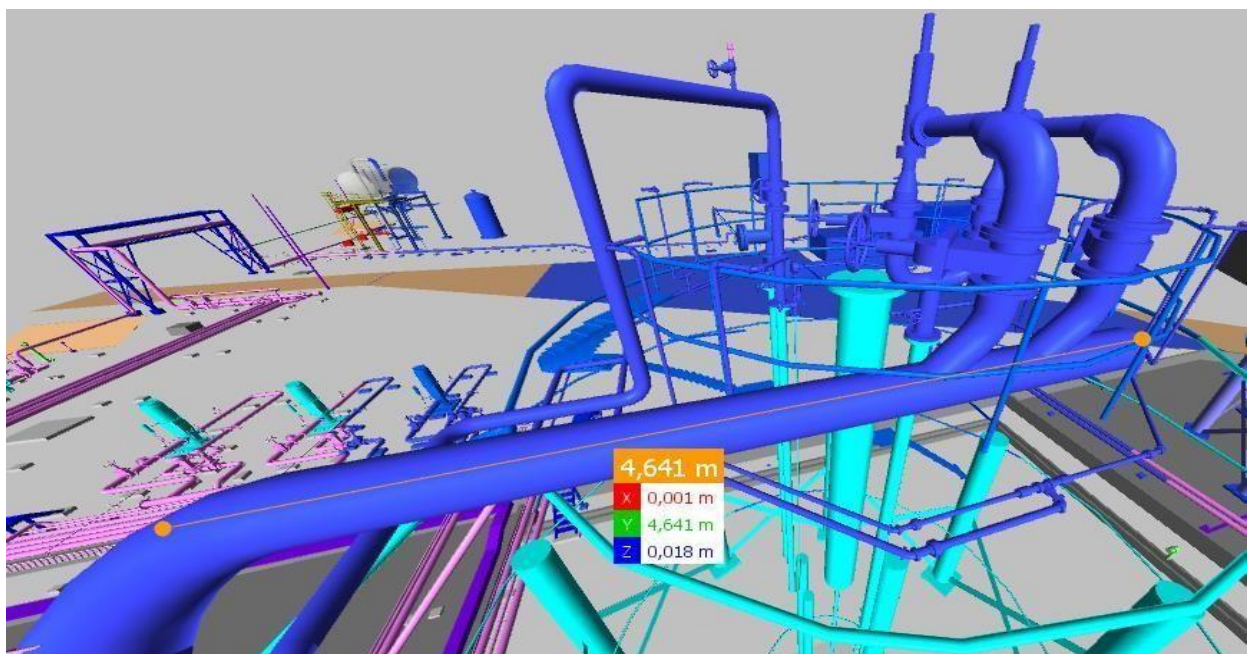


Figure 63 : Isométrique de piping et vannerie du segment de tête des sphères A/G/F/E

La figure 65 est une illustration de la vannerie relative au bas de sphère, elle inclue des brides deraccordement de type KOSO45 de diamètres 3 pouces et 6 pouces, des vannes manuelles de types YONEKI LCB de 6 et 3 pouces, et une hauteur de tuyauterie de 0.613m.

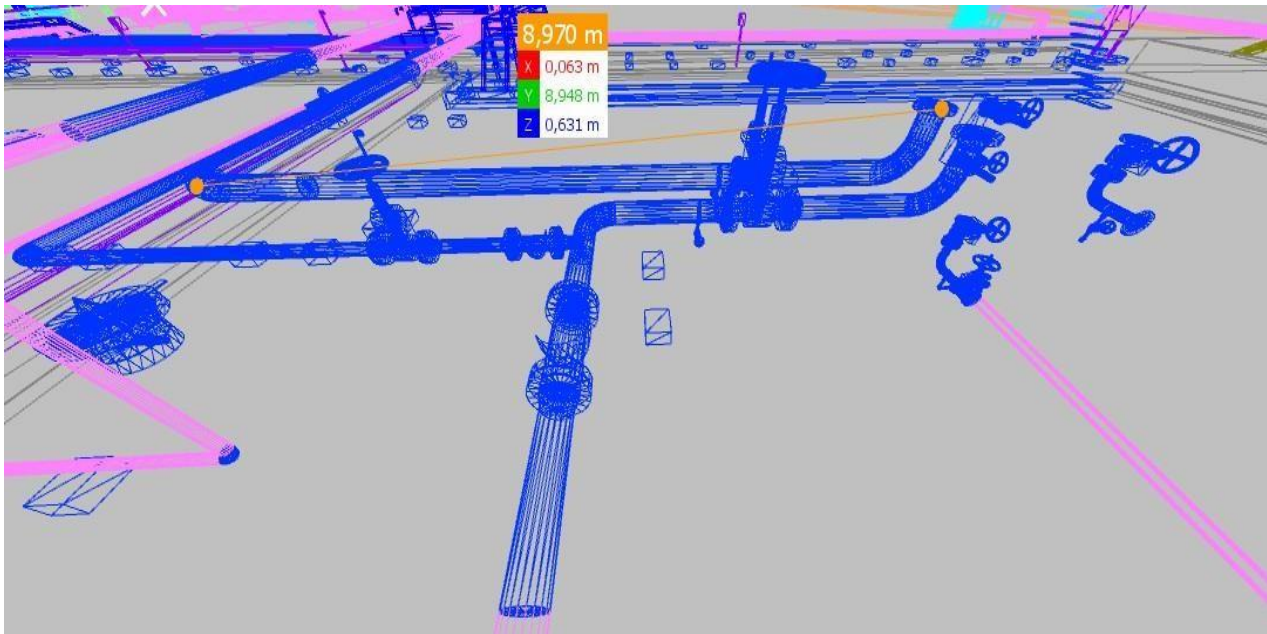


Figure 64. Isométrique de piping et vannerie du segment de bas de sphères A/G/E/F

La figure 66 est un réseau de tuyauterie agrémenté par un système de vannerie canalisant la charge d'entrée GPL vers les sphères 6105A et 6105G de stockage tampon, la vannerie est de facture KOSO120 et YONEKI WCB150 de diamètres 10 pouces et 8 pouces, trois lignes de 10 pouces connectées au pompes de charge acheminent le GPL vers un manifold de 10 pouces qui alimentera deux sphères A et G via des trunklines de 8 pouces. La hauteur de la tuyauterie est de 0.469m.

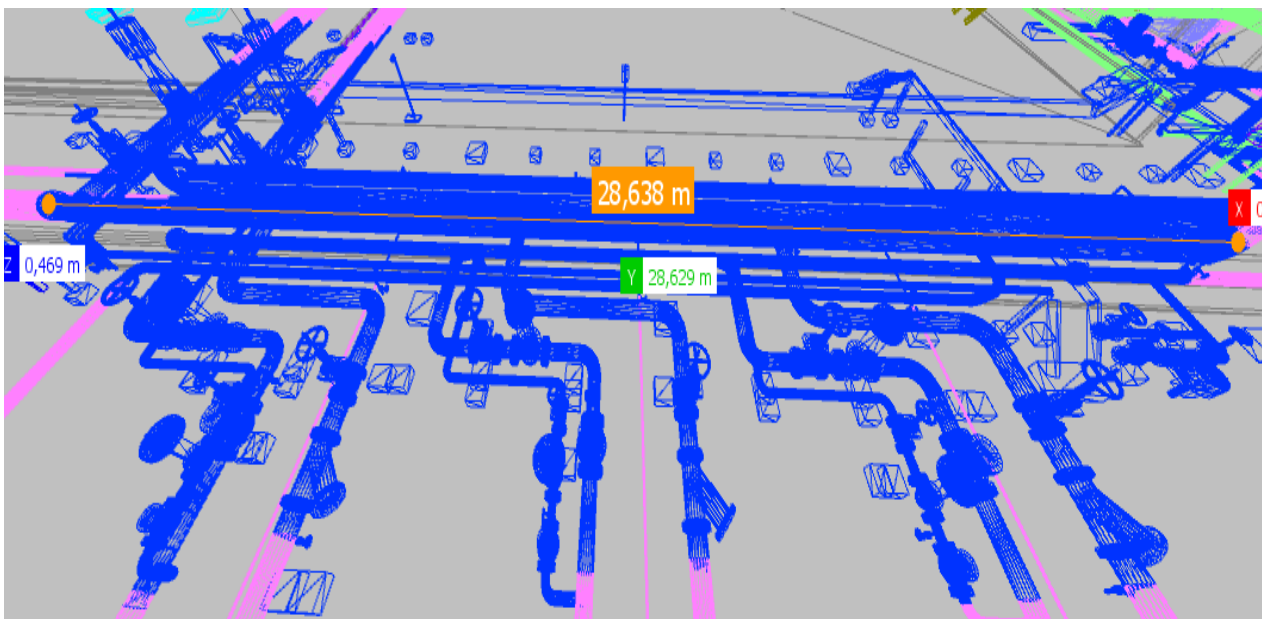


Figure 65 : Isométrique de piping et vannerie du segment d'entrée de charge GPL de la section de stockage 61

Nous considérerons la base de données de l'OGP (Oil and Gas Producers) dans ce contexte, des informations sur les fréquences de fuites caractéristiques à chaque équipement ou composant de différents constructeurs sont fournies, entre autres les constructeurs KOSO et YONEKI, EMERSON, TYCO, ANDERSON GREENWOOD et CROSBY dont les composants sont utilisés dans la section de stockage 61 du complexe GP2/Z.

Les tableaux ci-dessous représentent les fréquences de fuites de différents diamètres d'orifices en fonction du diamètre extérieur de l'élément pris en compte dans cette étude :

Tableau 10 : Fréquences de fuites des Vannes Manuelles YONEKI WCB

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 3.6E-07        | 7.1E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.2E-06          |
| 3 to 10             | 3.5E-07        | 6.9E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.1E-06          |
| 10 to 50            | 2.4E-06        | 7.8E-07         | 1.2E-06          | 1.6E-06          | 1.9E-06          | 2.4E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 4.0E-06         | 7.1E-07          | 9.2E-07          | 1.1E-06          | 1.4E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 5.4E-06          | 7.0E-06          | 8.5E-06          | 1.1E-05          |
| TOTAL               | 3.1E-06        | 6.2E-06         | 9.5E-06          | 1.2E-05          | 1.5E-05          | 1.9E-05          |

Tableau 11 : Fréquence de fuite de Brides de raccordement KOSO45

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 1.5E-06        | 1.7E-06         | 2.6E-06          | 4.2E-06          | 6.7E-06          | 1.4E-05          |
| 3 to 10             | 1.1E-06        | 1.2E-06         | 1.9E-06          | 3.1E-06          | 4.9E-06          | 1.1E-05          |
| 10 to 50            | 2.0E-06        | 1.0E-06         | 1.5E-06          | 2.5E-06          | 4.0E-06          | 8.6E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 1.3E-06         | 6.4E-07          | 1.1E-06          | 1.7E-06          | 3.6E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 1.4E-06          | 2.2E-06          | 3.5E-06          | 7.6E-06          |
| TOTAL               | 4.6E-06        | 5.3E-06         | 7.9E-06          | 1.3E-05          | 2.1E-05          | 4.5E-05          |

Tableau 12 : Fréquence de fuite du Piping K91618 en acier au carbone

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 3.7E-06        | 3.2E-06         | 3.1E-06          | 3.1E-06          | 3.1E-06          | 3.1E-06          |
| 3 to 10             | 2.7E-06        | 2.3E-06         | 2.3E-06          | 2.3E-06          | 2.3E-06          | 2.3E-06          |
| 10 to 50            | 6.0E-06        | 1.9E-06         | 1.8E-06          | 1.8E-06          | 1.8E-06          | 1.8E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 3.4E-06         | 7.7E-07          | 7.6E-07          | 7.6E-07          | 7.6E-07          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 2.6E-06          | 2.6E-06          | 2.6E-06          | 2.6E-06          |
| TOTAL               | 1.24E-05       | 1.07E-05        | 1.06E-05         | 1.05E-05         | 1.05E-05         | 1.05E-05         |



Tableau 13 : Fréquence de fuite des Vannes Pneumatiques Automatisées à clapet sphérique KOSO150

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 1.5E-06        | 1.7E-06         | 2.6E-06          | 4.2E-06          | 6.7E-06          | 1.4E-05          |
| 3 to 10             | 1.1E-06        | 1.2E-06         | 1.9E-06          | 3.1E-06          | 4.9E-06          | 1.1E-05          |
| 10 to 50            | 2.0E-06        | 1.0E-06         | 1.5E-06          | 2.5E-06          | 4.0E-06          | 8.6E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 1.3E-06         | 6.4E-07          | 1.1E-06          | 1.7E-06          | 3.6E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 1.4E-06          | 2.2E-06          | 3.5E-06          | 7.6E-06          |
| TOTAL               | 4.6E-06        | 5.3E-06         | 7.9E-06          | 1.3E-05          | 2.1E-05          | 4.5E-05          |

Tableau 14 : Fréquence de fuite des Vannes Manuelles YONEKI LCB

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 3.6E-07        | 7.1E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.2E-06          |
| 3 to 10             | 3.5E-07        | 6.9E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.1E-06          |
| 10 to 50            | 2.4E-06        | 7.8E-07         | 1.2E-06          | 1.6E-06          | 1.9E-06          | 2.4E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 4.0E-06         | 7.1E-07          | 9.2E-07          | 1.1E-06          | 1.4E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 5.4E-06          | 7.0E-06          | 8.5E-06          | 1.1E-05          |
| TOTAL               | 3.1E-06        | 6.2E-06         | 9.5E-06          | 1.2E-05          | 1.5E-05          | 1.9E-05          |

Tableau 15 : Fréquence de fuite des Soupapes de sécurité EMERSON (Relief Valve)

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 4.4E-05        | 6.5E-05         | 9.6E-05          | 1.2E-04          | 1.5E-04          | 2.1E-04          |
| 3 to 10             | 1.8E-05        | 2.6E-05         | 3.9E-05          | 5.1E-05          | 6.2E-05          | 8.5E-05          |
| 10 to 50            | 1.5E-05        | 1.1E-05         | 1.6E-05          | 2.1E-05          | 2.5E-05          | 3.4E-05          |

Tableau 16 : Fréquence de fuite des soupapes de sécurité ANDERSON GREENWOOD

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 3.6E-07        | 7.1E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.2E-06          |
| 3 to 10             | 3.5E-07        | 6.9E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.1E-06          |
| 10 to 50            | 2.4E-06        | 7.8E-07         | 1.2E-06          | 1.6E-06          | 1.9E-06          | 2.4E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 4.0E-06         | 7.1E-07          | 9.2E-07          | 1.1E-06          | 1.4E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 5.4E-06          | 7.0E-06          | 8.5E-06          | 1.1E-05          |
| TOTAL               | 3.1E-06        | 6.2E-06         | 9.5E-06          | 1.2E-05          | 1.5E-05          | 1.9E-05          |

Tableau 17 : Fréquence de fuite des clapets anti-retour TYCO-GRISS

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 1.5E-06        | 1.7E-06         | 2.6E-06          | 4.2E-06          | 6.7E-06          | 1.4E-05          |
| 3 to 10             | 1.1E-06        | 1.2E-06         | 1.9E-06          | 3.1E-06          | 4.9E-06          | 1.1E-05          |
| 10 to 50            | 2.0E-06        | 1.0E-06         | 1.5E-06          | 2.5E-06          | 4.0E-06          | 8.6E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 1.3E-06         | 6.4E-07          | 1.1E-06          | 1.7E-06          | 3.6E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 1.4E-06          | 2.2E-06          | 3.5E-06          | 7.6E-06          |
| TOTAL               | 4.6E-06        | 5.3E-06         | 7.9E-06          | 1.3E-05          | 2.1E-05          | 4.5E-05          |

Tableau 18 : Fréquence de fuite soupape de sécurité CROSBY

| HOLE DIA RANGE (mm) | 2" DIA (50 mm) | 6" DIA (150 mm) | 12" DIA (300 mm) | 18" DIA (450 mm) | 24" DIA (600 mm) | 36" DIA (900 mm) |
|---------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 to 3              | 3.6E-07        | 7.1E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.2E-06          |
| 3 to 10             | 3.5E-07        | 6.9E-07         | 1.1E-06          | 1.4E-06          | 1.7E-06          | 2.1E-06          |
| 10 to 50            | 2.4E-06        | 7.8E-07         | 1.2E-06          | 1.6E-06          | 1.9E-06          | 2.4E-06          |
| 50 to 150           | 0.0E+00        | 4.0E-06         | 7.1E-07          | 9.2E-07          | 1.1E-06          | 1.4E-06          |
| >150                | 0.0E+00        | 0.0E+00         | 5.4E-06          | 7.0E-06          | 8.5E-06          | 1.1E-05          |
| TOTAL               | 3.1E-06        | 6.2E-06         | 9.5E-06          | 1.2E-05          | 1.5E-05          | 1.9E-05          |

**N.B :** La base de données recueillie au niveau de l'OGP a démontré une marge d'offset (marge d'erreur) de 3.74%. Après calcul des fréquences de fuites au niveau de chacun des segments décrits par les P&IDs lors de la première étape et comparaison avec les résultats expérimentaux relatives à des fuites aux niveaux de points sources de sphères de GPL de capacité similaire à celle des sphères A/E/F/G (1220 mètres cube), ces chiffres sont prélevés des données empiriques « FIELD DATA » de divers équipements fournis par Health and Safety Executive, U.K. Onshore Release Statistics Data. March 2011.

L'algorithme du calculateur du software DNVGL PHAST v8.0.0 tolère une marge d'erreur allant jusqu'à 3.82% ce qui garantit la fiabilité de la modélisation des différents scénarios, nous rappellerons que les résultats qui seront obtenus lors de ce chapitre constituent l'input principal pour l'étude de dispersion atmosphérique du nuage inflammable dans le chapitre à suivre.

## VI-2-5. CALCUL DES FREQUENCES DE FUITE DE L'AIRE DE STOCKAGE TAMPON GPL :

### Section d'entrée et sortie 420/6105 GPL :

*Segment d'entrée et sortie de la sphère G du stockage tampon GPL :*

\GP2Z Etude\Zone de Stockage\Stockage Tampon GPL\420/6105 Inlet/Outlet\420/6105 G Inlet/Outlet

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 1.31666e-006                | 3.19                    | 56.57                 | 0.0002617                      | 3.19                       | 13.89                    |
| Medium Leak | 7.39776e-007                | 11.71                   | 107.79                | 4.61053e-005                   | 15.83                      | 30.95                    |
| Large leak  | 2.42009e-006                | 42.83                   | 202.93                | 0.000212953                    | 165.30                     | 96.68                    |

*Segment d'entrée et sortie de la sphère A du stockage tampon GPL :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 1.36548e-006                | 3.19                    | 56.57                 | 0.000245054                    | 3.19                       | 13.89                    |
| Medium Leak | 5.21197e-007                | 12.60                   | 111.73                | 4.31727e-005                   | 15.83                      | 30.95                    |
| Large leak  | 2.67484e-006                | 42.83                   | 202.93                | 0.000195632                    | 173.90                     | 99.58                    |

*Segment d'alimentation GPL des deux sphères A/G :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 2.91622e-007                | 3.19                    | 56.57                 | 5.23357e-005                   | 3.19                       | 13.89                    |
| Medium Leak | 1.91693e-007                | 11.43                   | 106.58                | 9.22032e-006                   | 15.83                      | 30.95                    |
| Large leak  | 4.56687e-007                | 54.19                   | 230.52                | 4.01868e-005                   | 195.16                     | 105.32                   |

*Segment de raccordement au réseau torchère de la sphère G :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 8.74368e-005                | 1.89                    | 117.06                | 1.57859e-006                   | 3.19                       | 30.53                    |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                    | 0.00                  | 2.7811e-007                    | 15.83                      | 68.03                    |
| Large leak  | 0                           | 0.00                    | 0.00                  | 2.51944e-006                   | 47.41                      | 116.98                   |

*Segment de raccordement au réseau torchère de la sphère A :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 9.58967e-005                | 1.98                    | 111.27                | 1.7428e-006                    | 3.19                       | 28.41                    |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                    | 0.00                  | 3.07041e-007                   | 15.83                      | 63.31                    |
| Large leak  | 0                           | 0.00                    | 0.00                  | 2.66181e-006                   | 49.58                      | 111.19                   |

*Segment de raccordement commun au réseau Fuel Gas des deux sphères A/G :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Contrib.<br>--(fraction)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liq Contrib.<br>--(fraction)-- |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Small leak  | 2.48534e-005                | 0.00                           | 2.92                    | 58.26                 | 1.77011e-006                   | 0.00                           |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 2.73279e-007                   | 0.00                           |
| Large leak  | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 7.337e-007                     | 0.00                           |

**Section Piping de l'aire de stockage tampon GPL 420/6105 :***Segment de tuyauterie de l'entrée/sortie des sphères A/G :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 2.28807e-006    | 0.00           | 3.19        | 56.93     | 0.000267135     |
| Medium Leak | 4.03105e-007    | 0.00           | 15.83       | 126.83    | 4.7063e-005     |
| Large leak  | 4.15067e-005    | 0.00           | 31.89       | 179.99    | 0.0013187       |

*Segment de tuyauterie du raccordement commun des sphères A/G au réseau Fuel Gas :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 8.45067e-008    | 0.00           | 3.69        | 60.83     | 4.67587e-009    |
| Medium Leak | 2.22172e-007    | 0.00           | 10.14       | 100.88    | 1.47999e-009    |
| Large leak  | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 1.08131e-008    |

*Segment de tuyauterie de la charge GPL des sphères A/G :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 9.77852e-007    | 0.00           | 3.19        | 56.57     | 0.000167341     |
| Medium Leak | 1.72275e-007    | 0.00           | 15.83       | 126.03    | 2.94816e-005    |
| Large leak  | 1.76338e-005    | 0.00           | 32.09       | 179.43    | 0.000823406     |

*Segment de tuyauterie du raccordement au réseau torchère des sphères A/G :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 2.3096e-008     | 0.00           | 1.19        | 93.42     | 4.27155e-010    |
| Medium Leak | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 1.35202e-010    |
| Large leak  | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 9.87809e-010    |

**N.B :** Nous procéderons de la même manière à une segmentation de la section de stockage dédiée au butane ambiant en définissant les fréquences de fuites relatives, et ce dans le but de compiler les résultats obtenus par une méthode d'approximation mathématique nommé régression linéaire dans le but d'obtenir la fréquence de fuite spécifique à la section de stockage 61 totale, ce calcul se fera par le biais du soft DNVLEAK 3.3.

## VI-2-6. CALCUL DES FREQUENCES DE FUITE DE L'AIRES DE STOCKAGE C4 AMBIANT :

### Section d'entrée et sortie 420/6105 C4 :

*Segment d'entrée et sortie de la sphère E de l'aire de stockage de butane ambiant :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 1.54947e-006                | 2.92                    | 68.38                 | 0.000224135                    | 3.19                       | 15.98                    |
| Medium Leak | 1.58493e-007                | 15.83                   | 159.42                | 3.94874e-005                   | 15.83                      | 35.60                    |
| Large leak  | 2.33891e-006                | 32.04                   | 223.74                | 0.000200973                    | 134.17                     | 101.12                   |

*Segment d'entrée et sortie de la sphère F de l'aire de stockage de butane ambiant :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 1.35345e-006                | 3.02                    | 69.55                 | 0.000209591                    | 3.19                       | 15.98                    |
| Medium Leak | 1.75177e-007                | 15.83                   | 159.42                | 3.6925e-005                    | 15.83                      | 35.60                    |
| Large leak  | 2.58511e-006                | 32.04                   | 223.74                | 0.000184322                    | 140.97                     | 104.08                   |

*Segment d'alimentation C4 des sphères E/F :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 4.50409e-007                | 2.94                    | 68.54                 | 6.02977e-005                   | 3.19                       | 15.98                    |
| Medium Leak | 4.77171e-008                | 15.83                   | 159.42                | 1.0623e-005                    | 15.83                      | 35.60                    |
| Large leak  | 5.90378e-007                | 44.76                   | 265.64                | 4.86e-005                      | 182.62                     | 117.78                   |

*Segment de raccordement au réseau torchère de la sphère E :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Contrib.<br>--(fraction)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Small leak  | 4.20146e-005                | 0.50                           | 1.61                    | 120.24                | 1.09809e-006                   |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 1.93457e-007                   |
| Large leak  | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 1.9342e-006                    |

*Segment de raccordement au réseau torchère de la sphère F :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Contrib.<br>--(fraction)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Small leak  | 4.20585e-005                | 0.46                           | 1.61                    | 120.24                | 1.07313e-006                   |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 1.8906e-007                    |
| Large leak  | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 1.89024e-006                   |

*Segment de raccordement commun au réseau Fuel Gas des sphères E/F :*

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Contrib.<br>--(fraction)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Small leak  | 1.68399e-006                | 0.00                           | 2.19                    | 54.60                 | 1.76397e-008                   |
| Medium Leak | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 5.4004e-009                    |
| Large leak  | 0                           | 0.00                           | 0.00                    | 0.00                  | 4.87021e-008                   |

**Section Piping de l'aire de stockage butane 420/6105 :***Segment de tuyauterie de l'entrée/sortie des sphères F/E :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 1.90077e-006    | 0.00           | 2.40        | 132.54    | 1.8414e-007     |
| Medium Leak | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 3.3617e-008     |
| Large leak  | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 8.13464e-008    |

*Segment de tuyauterie du raccordement commun des sphères F/E au réseau Fuel Gas :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 2.47479e-007    | 0.00           | 3.11        | 65.01     | 3.84048e-009    |
| Medium Leak | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 1.21558e-009    |
| Large leak  | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 8.88123e-009    |

*Segment de tuyauterie de la charge C4 des sphères F/E :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 7.80361e-007    | 0.00           | 3.19        | 71.56     | 0.00014631      |
| Medium Leak | 1.37481e-007    | 0.00           | 15.83       | 159.42    | 2.57764e-005    |
| Large leak  | 1.75708e-005    | 0.00           | 25.36       | 201.76    | 0.000816699     |

*Segment de tuyauterie du raccordement au réseau torchère des sphères F/E :*

| Category    | Gas Leak        | Gas Contrib.   | Gas Rate    | Gas Size  | Liquid Leak     |
|-------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|-----------------|
| -----       | --(/AvgeYear)-- | --(fraction)-- | --(kg/s )-- | --(mm )-- | --(/AvgeYear)-- |
| Small leak  | 1.47915e-006    | 0.00           | 1.79        | 114.47    | 1.38797e-007    |
| Medium Leak | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 2.53391e-008    |
| Large leak  | 0               | 0.00           | 0.00        | 0.00      | 6.33007e-008    |

**N.B :** L'approximation par régression linéaire tolérera tout de même une marge d'erreur de 0.4e-004 AvgeYear dans le calcul final de la fréquence de fuite au niveau de la section de stockage 61.

Dans un souci d'accroître la précision des résultats un calcul semi-automatique est entamé par tâtonnement via le software DNVLEAK v1.27, la convergence des résultats des deux méthodes confirme la véracité et la fiabilité de la méthodologie choisie.

### VI-2-7. RESULTAT FINAL DU CALCUL DES FREQUENCES DE FUITES DE LA SECTION DE STOCKAGE 61 :

| Category    | Gas Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Gas Rate<br>--(kg/s )-- | Gas Size<br>--(mm )-- | Liquid Leak<br>--(/AvgeYear)-- | Liquid Rate<br>--(kg/s )-- | Liquid Size<br>--(mm )-- |
|-------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Small leak  | 0.000365371                 | 1.84                    | 117.03                | 0.00106104                     | 3.19                       | 15.00                    |
| Medium Leak | 1.83405e-006                | 12.79                   | 119.52                | 0.00018693                     | 15.83                      | 33.42                    |
| Large leak  | 1.1066e-005                 | 38.60                   | 216.67                | 0.000895837                    | 155.70                     | 101.69                   |

**N.B :** L'input à prendre en compte après compilation des données par DNVLEAK v3.3 est la fréquence de fuite gazeuse de 0.000365371/AvgeYear et la fréquence de fuite liquide 0.00106104/AvgeYear, le choix de l'input dépendra du choix du scénario et des paramètres opératoires de la capacité qui détermineront la phase du fluide.

Ces données sont cruciales à l'évaluation de la dispersion atmosphérique du mélange inflammable (GPL, C4 et FG) ambiant que nous réaliserons via le software DNVGL PHASTv8.0.0, la figure ci-dessous illustre l'onglet spécifique à la dispersion atmosphérique :

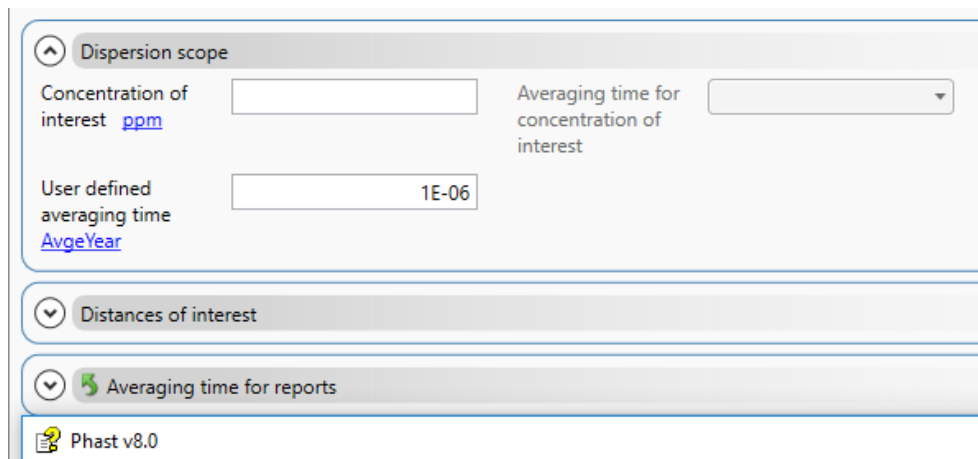


Figure 66 : Onglet spécifique à la dispersion PHASTv8.0.0

## VI-3. CONCLUSION

Les résultats obtenus lors de ce chapitre constituent la donnée d'entrée du chapitre à suivre à savoir l'étude de dispersion, il convient de souligner que la simulation gaussienne nécessite l'apport de la donnée de fréquence de fuite en probabilité d'occurrence par an.

## CHAPITRE VII : APPLICATION DE LA NŒUD PAPILLON SUR LA SECTION DE STOCKAGE TAMPON

### VII-1. INTRODUCTION

Dans l'industrie pétrolière, le process d'exploitation présente des risques majeurs et nécessite des moyens de sécurité sophistiqués pour la maîtrise de ces risques. Parmi ces moyens en retrouve les systèmes de régulation (BPCS) et les SIS. L'implémentation de ces systèmes requière la détermination de leurs niveaux d'intégrité de sécurité (SIL). Le problème qui se pose dans l'évaluation de ces indicateurs est la fiabilité des différents paramètres qui s'y associent : taux de défaillance, couverture de diagnostic, proportion de défaillance de cause commune... En effet, ces paramètres sont généralement entachés d'incertitudes, d'autant plus que les SIS sont des systèmes très fiables et produisent donc un faible retour d'expérience [60].

### VII-2. METHODOLOGIE

#### VII-2-1. CONSTRUCTION DES NOEUDS PAPILLON [25, 70 , 118]

La méthodologie combinée des arbres de défaillances - arbres d'évènements dite méthode du nœud papillon est utilisée.

Le nœud papillon est une représentation graphique sous forme de double arborescence, combinant un arbre de défaillance et un arbre d'évènements. La partie gauche du nœud papillon correspond à un arbre de défaillances et permet d'identifier les causes et combinaisons de causes de l'évènement redouté (dit évènement redouté central ERC). La partie droite du nœud papillon est un arbre d'évènements et permet de déterminer les conséquences de l'ERC. Dans cette représentation, pour un même évènement redouté central, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine (évènement indésirable ou courant) jusqu'à l'apparition de dommages au niveau des cibles (effets majeurs) désigne un scénario particulier (un chemin = un scénario).

Les Mesures de Maîtrise des Risques (MMR) sont représentées sur le nœud papillon par des barres verticales symbolisant le fait qu'elles s'opposent au développement du scénario d'accident.

Une même barrière ne peut pas apparaître plusieurs fois sur un même chemin allant de l'EI au PhD et à ses effets en passant par l'ERC.

Les différents Evénements Initiateurs (EI) sont reliés par des portes logiques « ET » et « OU » suivant que l'évènement aval nécessite ou non pour se produire, la réalisation de plusieurs EI :

- Porte « ET » : la réalisation de tous les EI (ou causes) est nécessaire à la réalisation de l'évènement aval.
- Porte « OÙ » : la réalisation d'un des EI (ou causes) suffit à la réalisation de l'évènement aval.

La méthode du nœud papillon est une méthode d'analyse des risques à la fois inductive et déductive.



Elle permet :

- D’apporter une démonstration renforcée de la bonne maîtrise des risques en présentant clairement l'action des mesures de sécurité sur le déroulement du scénario envisagé,
- De sensibiliser efficacement les opérateurs sur la base d'un schéma détaillé mais compréhensible pour tous.

Le Noud Papillon consiste à :

- Rechercher, par une construction graphique, toutes les combinaisons d'événements qui peuvent conduire à l'apparition d'un danger,
- Puis, envisager la mise en place de mesures maitrise des risques (MMR) s'opposant à la succession des événements dangereux.

Cette construction graphique est représentée sous la forme d'une double arborescence (voir figure suivante), combinant un arbre de défaillance et un arbre d'événements.

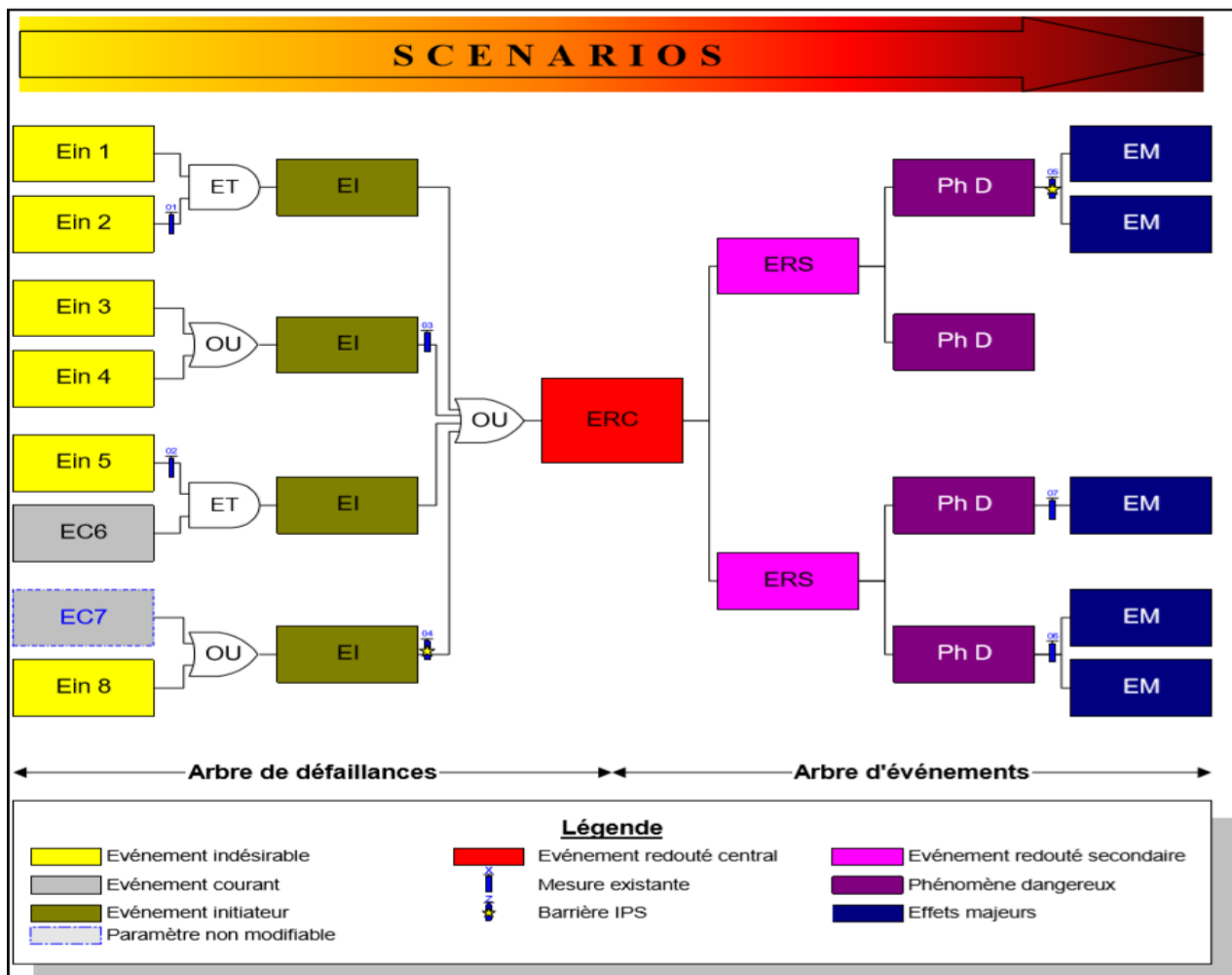


Figure 67 : Formalisme d'une séquence accidentelle avec la méthode des nœuds papillons [79]

La partie gauche du Noeud Papillon correspond à un arbre de défaillances et permet d'identifier les causes de l'événement redouté (dit événement redouté central (ERC)).

La partie droite du Noeud Papillon est un arbre d'événements et permet de déterminer les conséquences de l'ERC. Dans cette représentation graphique, chaque chemin conduisant d'une défaillance d'origine jusqu'à l'apparition d'effets majeurs désigne un scénario d'accident particulier pour un même événement redouté central. [68]

Les Mesures de Maîtrise des Risques (MMR) sont représentées sur le noeud papillon par des barres verticales, symbolisant le fait qu'elles s'opposent au développement du scénario d'accident. [68, 88, 112]

Tableau 19 : Légende des événements figurant sur le modèle de nœud papillon

| Désignation | Signification                | Définition   | Exemples  |
|-------------|------------------------------|--|---|
| <b>EIn</b>  | Evènement Indésirable        | Dérive ou défaillance sortant du cadre des conditions d'exploitation usuelles définies                                       | Le surremplissage ou un départ d'incendie à proximité d'un équipement dangereux peuvent être des événements initiateurs |
| <b>EC</b>   | Evènement Courant            | Evènement admis survenant de façon récurrente dans la vie d'une installation   | Les actions de test, de maintenance ou la fatigue d'équipements sont généralement des événements courants               |
| <b>EI</b>   | Evènement Initiateur         | Cause directe d'une perte de confinement ou d'intégrité physique   | La corrosion, l'érosion, les agressions mécaniques, une montée en pression sont généralement des événements initiateurs |
| <b>ERC</b>  | Evènement Redouté Central    | Perte de confinement sur un équipement dangereux ou perte d'intégrité physique d'une substance dangereuse                    | Rupture, brèche, ruine ou décomposition d'une substance dangereuse dans le cas d'une perte d'intégrité physique         |
| <b>ERS</b>  | Evènement Redouté Secondaire | Conséquence directe de l'évènement redouté central, l'évènement redouté secondaire caractérise le terme source de l'accident | Formation d'une flaque ou d'un nuage lors d'un rejet d'une substance diphasique   |
| <b>Ph D</b> | Phénomène Dangereux          | Phénomène physique pouvant engendrer des dommages majeurs  | Incendie, explosion, dispersion d'un nuage toxique  |
| <b>EM</b>   | Effets Majeurs               | Dommages occasionnés au niveau des cibles (personnes, environnement ou biens) par les effets d'un phénomène dangereux        | Effets létaux ou irréversibles sur la population synergies d'accident   |

## VII-2-2. QUANTIFICATION DE LA PROBABILITE

La probabilité est quantifiée à partir de fréquences de fuites génériques issues de la littérature (Purple Book et Loss Prevention). Le calcul de la probabilité s'effectue donc à partir de l'ERC et non directement à partir des Ein, EC ou EI. Cette démarche est possible car il existe pour les industries pétrolières et pétrochimiques des bases de données internationalement reconnues de fréquences

d'ERC. **Les barrières de prévention standard (agissant en amont de l'ERC) sont déjà prises en compte dans les probabilités de l'ERC retenues.**

Il a été retenu ici les bases de données du TNO (CPR 18E ou « Purple Book ») et de Loss Prevention, celles-ci étant adaptées à tout type d'installations industrielles.

La quantification de la probabilité des accidents majeurs est réalisée selon la méthodologie suivante :

- Les probabilités d'occurrence de l'événement redouté (ERC) sont déterminées à partir des banques de données probabilistes (TNO).

**Nota :** ces bases de données intègrent déjà les obligations réglementaires en matière de conception, de procédures d'exploitation et de maintenance et d'inspection. Cette approche réaliste en termes d'évaluation des probabilités des événements redoutés ne permet pas de quantifier les événements initiateurs et leurs barrières spécifiques sous peine de les compter 2 fois et de fausser l'évaluation. [6, 25, 60]

- Les probabilités de défaillance des mesures de détection, protection et mitigation sont estimées en attribuant un niveau de confiance à ces barrières,
- À partir des valeurs précédentes, les probabilités d'occurrence des effets des phénomènes dangereux sont calculées en appliquant les règles d'agrégation suivantes :
  - Fréquence d'apparition des dommages : Elle est calculée en faisant le produit de la fréquence d'occurrence de l'ERC et de la probabilité de défaillance des barrières de mitigation et / ou protection
  - Probabilité d'ignition de la fuite : Elle est calculée en faisant le produit de la fréquence d'occurrence obtenue ci-dessus et de la probabilité d'ignition totale de la fuite en fonction de la phase et du débit (Loss Prevention)

**Nota 1 :** Les probabilités des ERC pour l'ADR s'appuient sur le Purple Book. Certains facteurs correctifs pourront être utilisés en fonction du retour d'expérience sur les installations de la SONATRACH. Les probabilités seront agglomérées pour une section fonctionnelle. Par exemple, pour une section donnée, les équipements susceptibles de donner lieu à des scénarios sélectionnés en ADR seront répertoriés. Les probabilités de fuite de chaque équipement retenu seront alors ajoutées pour obtenir la probabilité de l'ERC, [60]

Concernant les lignes, soit une longueur forfaitaire sera attribuée selon sa fonction (ligne de tête, ligne de fond, alimentation...), soit la longueur réelle est utilisée si disponible.

**Nota 2 :** Dans une première approche conservative, la probabilité totale d'ignition sera retenue. Si besoin, le détail de la probabilité retardée (UVCE, Flash Fire) ou immédiate sera effectué.

Enfin le niveau de probabilité des phénomènes dangereux est déterminé selon **l'échelle quantitative** suivante (dernière ligne) :

**Echelle de probabilité**

Tableau 20 : Echelle de probabilité

| Niveau de fréquence                       | E   | D  | C   | B   | A  |
|---|---|--|---|---|--|
| <b>Qualitative</b>                        | Possible mais extrêmement peu probable<br>N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations | Très improbable<br>S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité | Improbable<br>S'est déjà produit dans ce secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité | Probable<br>S'est déjà produit et/ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'installation | Courant<br>S'est produit sur site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives |
| <b>½ quantitative</b>                     | Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte des mesures de maîtrise des risques mises en place                            |  |   |   |  |
| <b>Quantitative (par unité et par an)</b> | 10 <sup>-5</sup>  | 10 <sup>-4</sup>   | 10 <sup>-3</sup>  | 10 <sup>-2</sup>  |  |

Sur la base des nœuds papillon réalisés, l'évaluation de la probabilité peut être faite selon trois méthodes :

- Qualitative : acceptable uniquement pour les A simples
- Semi-quantitative : à partir des valeurs de fréquence d'occurrence des événements initiateurs et en tenant compte de la décote apportée par les éventuelles MMR de prévention compte tenu du niveau de confiance accordé.
- Quantitative : quand le REX et les bases de données le permettent.

Les valeurs de fréquence d'occurrence utilisées seront tirées de bases de données probabilistes reconnues (ARAMIS, LEES, OREDA, ...), et/ou du REX du site. Dans tous les cas, il convient de vérifier que les valeurs retenues sont cohérentes pour le site étudié.

La probabilité sera évaluée de façon qualitative essentiellement sur la base des retours d'expérience (accidents survenus sur des installations similaires).

**VII-2-3. QUANTIFICATION DE LA GRAVITE [25,110]**

Les types de brèches retenues permettent de couvrir l'ensemble des tailles de brèches. En effet, les types de brèches retenus sont :

- La brèche 50% retenue pour les brèches allant de 0 à 50%,

- La rupture 100% retenue pour les brèches allant de 50% à 100%.

**Nota :** la brèche 50% est communément retenue dans les études de danger, notamment pour les sites dits « SEVESO »

Les modélisations sont effectuées pour les scénarios sélectionnés. Cependant pour l'étude d'une section fonctionnelle, **le phénomène dangereux majorant est retenu pour le calcul de la gravité.**

La gravité est évaluée à deux niveaux :

- Le personnel interne (PI),
- Les personnes hors des limites de propriété de la SONATRACH AVAL (PE).

L'évaluation du nombre de personnes internes impactées est déterminée en fonction de la localisation des salles de contrôle, des bâtiments administratifs, des laboratoires ainsi que de la présence du personnel sur le terrain.

L'évaluation du nombre de personnes impactées hors des limites de propriété SONATRACH AVAL consiste à déterminer le nombre de personnes susceptibles d'être présentes dans les zones d'effets, selon les principes généraux rappelés ci-dessous, issus de la fiche na accompagnant la circulaire DPPR du 28/12/2006 sur la réalisation des études de dangers, intitulée « EDD : Eléments pour la détermination de la gravité des accidents » de la réglementation française.

#### Principales dévaluations de la gravité :

|   | <b>Equivalent personne</b>   |
|---|--|
| <b>Etablissement Recevant de Public (ERP)</b> | Capacité d'accueil<br><br>Pour les ERP de catégorie 5 dont la capacité n'est pas définie : <ul style="list-style-type: none"> <li>- 10 personnes par magasin de détail de proximité (boulangerie et autre alimentation, presse, coiffeur)</li> <li>- 15 personnes pour les tabacs, cafés, restaurants, supérettes, bureaux de poste</li> </ul>   |
| <b>Habitations</b>                            | 2,5 personnes / logement (sauf si des données locales indiquent un autre chiffre)<br><br>Ou règle forfaitaire (applicable en milieu urbain et périurbain, hors centres villes et grandes agglomérations): <ul style="list-style-type: none"> <li>- Habitat individuel dispersé : 40 personnes/hectare</li> <li>- Habitat pavillonnaire dense : 100 personnes/hectare</li> <li>- Habitat collectif ou immeuble : 600 personnes/hectare</li> </ul> |
| <b>Routes avec risque d'embouteillages</b>    | 300 personnes permanentes par voie de circulation et par kilomètre exposé  |
| <b>Routes sans risque d'embouteillages</b>    | 0,4 personne par km exposé et par tranche de 100 véhicules/jour  |
| <b>Voies ferroviaires</b>                     | 0,4 personne par km exposé et par train, en comptant le nombre réel de train circulant quotidiennement sur la voie   |

|   |   |
|---|---|
| <b>Appontement bateau</b>   | 50 personnes par bateau présent   |
| <b>Zones d'activités (industrielles ou autres)</b>  | Nombre de salariés (ou nombre maximal de personnes présentes simultanément dans le cas de travail en équipes) |
| <b>Terrains non bâtis très peu fréquentés ou peu fréquentés (champs, forêts, jardins, vignes, ...)</b>                                    | 1 personne / 10 ha  |
| <b>Terrains non bâtis fréquentés ou très fréquentés (parkings de centres commerciaux, parcs, terrains de sport, zones de loisirs ...)</b> | 10 personnes / ha   |

De manière générale, l'objectif de la détermination de la gravité (par la détermination du nombre de personnes potentiellement exposées) est d'aboutir à une évaluation du niveau de risque présenté par l'installation et en aucun cas de prévoir « qui » seront les victimes en cas d'accident.

Dans le cas d'un phénomène dangereux lié à une dispersion de nuage (UVCE) ou à un jet enflammé, la fuite sera orientée dans une direction donnée suivant l'emplacement de la fuite ou le sens et la vitesse du vent.

**Pour le dénombrement des personnes susceptibles d'être impactées par un phénomène de dispersion de nuage (UVCE) ou un jet enflammé, nous avons considéré le secteur angulaire de 60° correspondant à la zone la plus densément peuplée (approche conservatoire)** (cf. accompagnant la circulaire DPPR du 28/12/2006 sur la réalisation des études de dangers, intitulée « Phénomènes de dispersion atmosphérique : représentation et cotation en probabilité-gravité » de la réglementation française. L'évaluation du niveau de gravité nécessite l'agrégation du nombre de personnes impactées en interne et en externe SONATRACH AVAL. [62, 79]

En réalisant une synthèse de la réglementation française (arrêté du 29 septembre 2005) et la norme EN 1473 (GNL), l'impact sur l'externe est majoré d'un facteur 10x. Cette « sur-évaluation » des personnes extérieures est justifiée par l'absence de culture du risque, la non connaissance des signaux d'alertes et des bonnes pratiques en matière de sécurité pour notamment se mettre à l'abri.

Cette méthode représente un compromis entre la grille "SEVESO" de la réglementation française et les exigences de la réglementation algérienne. [80]

Le nombre de personnes impactées (P) se calcule de la manière suivante :

$$P = PI + 10 PE$$

Par exemple, si le seuil des effets létaux significatifs touche 5 personnes en interne et 5 en externe, le nombre P à prendre en compte sera de 55, soit un niveau de gravité « catastrophique »

### Echelle de gravité

| Niveau de gravité    | Zone d'établissement par le seuil des effets létaux significatifs | Zone délimitée par le seuil des effets létaux | Zone délimitée par le seuil des effets inversible sur la vie humain |
|----------------------|---|---|---|
| <b>5. Désastreux</b> | Plus de 100 personnes exposées <sup>(1)</sup>                     | Plus de 1 000 personnes exposées              | Plus de 10 000 personnes exposées                                   |

|                          |                                    |                                      |  |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|
| <b>4. Catastrophique</b> | Entre 10 et 100 personnes exposées | Entre 100 et 1000 personnes exposées | Entre 1 000 et 10 000 personnes exposées |
| <b>3. Important</b>      | Entre 1 et 10 personnes exposées   | Entre 10 et 100 personnes exposées   | Entre 100 et 1 000 personnes exposées    |
| <b>2. Sérieux</b>        | Au plus 1 personne exposée         | Au plus 10 personnes exposée         | Entre 10 et 100 personnes exposées       |
| <b>1. Modère</b>         | Aucune personne exposée            | Au plus 1 personne exposée           | Moin de 10 personnes exposées            |

<sup>(1)</sup> Personnes exposées : **personnes exposées**, en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

### VII-3. HIERARCHISATION DES RISQUES - POSITIONNEMENT DANS LA MATRICE GP [113]

#### Bilan de l'analyse des risques

A l'issue de l'analyse détaillée des risques, les phénomènes dangereux majeurs potentiels (sans tenir compte des MMR sauf passives) et résiduels (en tenant compte des MMR) sont hiérarchiser selon leur probabilité et gravité, dans la matrice « de criticité » gravité x probabilité.

La criticité est évaluée selon la matrice suivante :

**Matrice de criticité :** La matrice d'acceptabilité des risques retenue par SONATRACH AVAL s'appuie sur la grille de criticité de la réglementation française (circulaire du 29 septembre 2005 relative aux critères d'appréciation de la démarche de maîtrise des risques d'accidents) qui définit trois niveaux de risques :

| Gravité                  | Probabilité (sens croissant de E vers A) |            |            |            |            |
|--------------------------|--|------------|------------|------------|------------|
|                          | E  | D          | C          | B          | A          |
| <b>5. Désastreux</b>     | NON                                      | NON        | NON        | NON        | NON        |
|                          | MMR rang 2                               |            |            |            |            |
| <b>4. Catastrophique</b> | MMR rang 1                               | MMR rang 2 | NON        | NON        | NON        |
| <b>3. Important</b>      | MMR rang 1                               | MMR rang 1 | MMR rang 2 | NON        | NON        |
| <b>2. Sérieux</b>        |  |            | MMR rang 1 | MMR rang 2 | NON        |
| <b>1. Modéré</b>         |  |            |            |            | MMR rang 1 |

En fonction du niveau de criticité obtenu, des mesures complémentaires peuvent être proposées.

- ❖ **Zone en rouge « NON »** : zone de risque élevé ⇔ accidents « **inacceptables** » susceptibles d'engendrer des dommages sévères à l'intérieur et hors des limites du site (mesures compensatoires à mettre en œuvre)
- ❖ **Zone en jaune et orange « MMR »** : zone de Mesures de Maîtrise des Risques. Les phénomènes dangereux dans cette zone doivent faire l'objet d'une démarche d'amélioration continue en vue d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation ⇔ zone ALARP (As Low As Reasonably Practicable). Il est important de démontrer que toutes les mesures de maîtrise des risques ont été envisagées et mises en œuvre (dans la mesure du techniquement et économiquement réalisable). [25,23,135]

La gradation des cases "MMR " en " rangs ", correspond à un risque croissant, depuis le rang 1 jusqu'au rang 2. Cette gradation correspond à la priorité que l'on peut accorder à la réduction des risques, en s'attachant d'abord à réduire les risques les plus importants (rangs les plus élevés).

- ❖ **Zone en vert** : zone de risque moindre ⇔ accidents « **acceptables** » dont il n'y a pas lieu de s'inquiéter outre mesure (le risque est maîtrisé). Pas de mesures de réduction complémentaire du risque.

**VII-4. ARBRE DE DEFAILLANCE D'UVCE PAR LOGICIEL ARBRE ANALYSTE WIN2-3-2 :**

**Construction de l'arbre :**

Après l'identification des événements d'après les accidents des retours d'expériences, en passe à la construction. L'analyse de ces accidents permet de qualifier la nature de l'événement initiateur et la dynamique de développement d'UVCE.

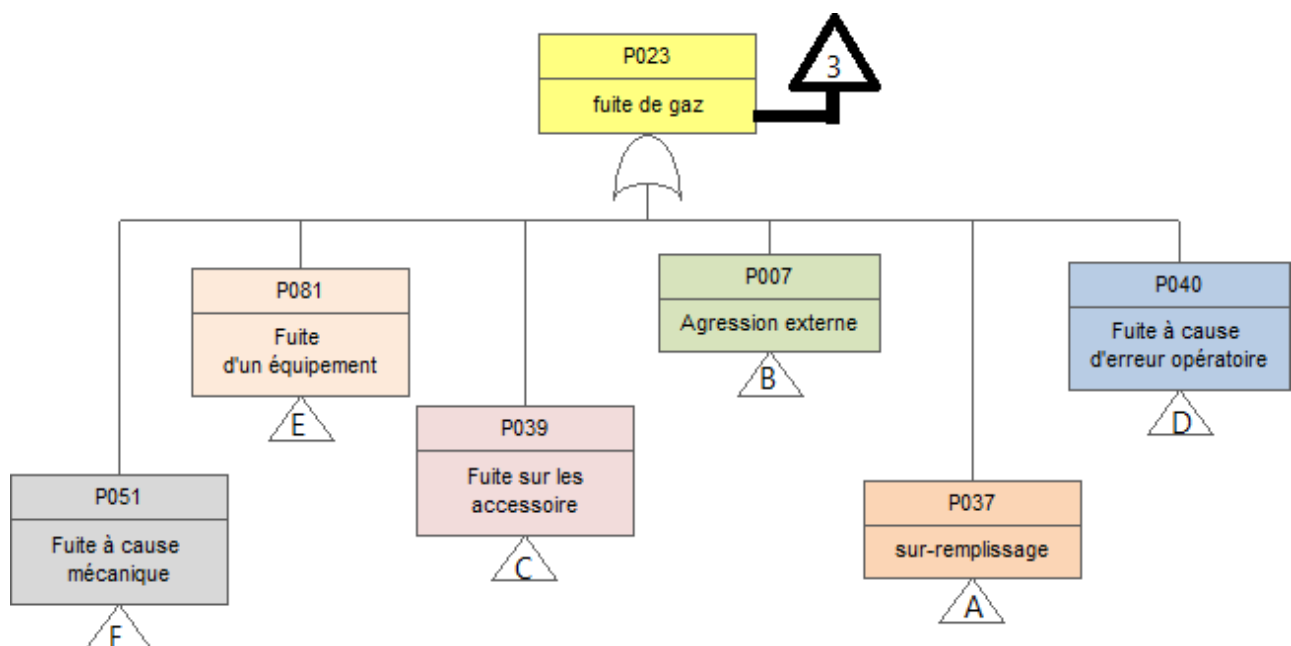


Figure 68 : Sous-système (fuite de gaz)



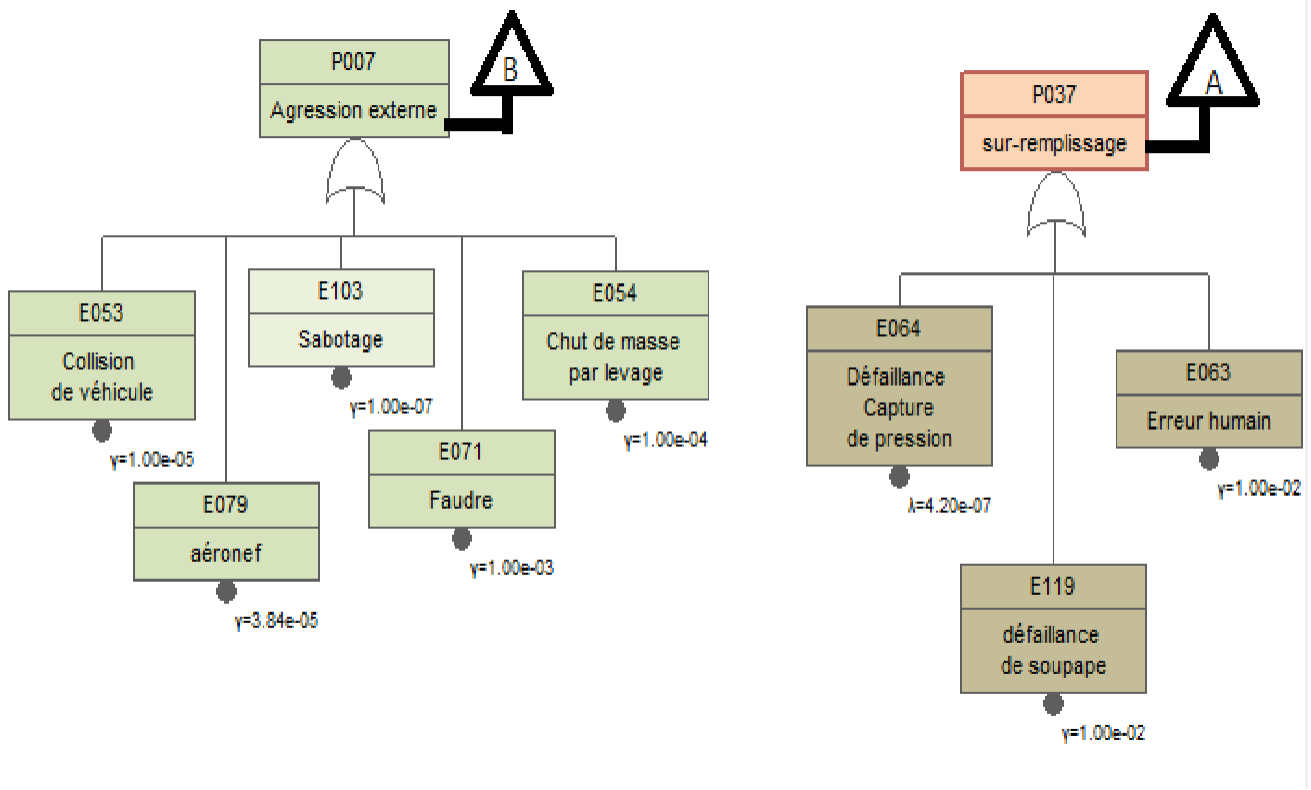


Figure 69 : Sous-système (agression externe – sur-remplissage)

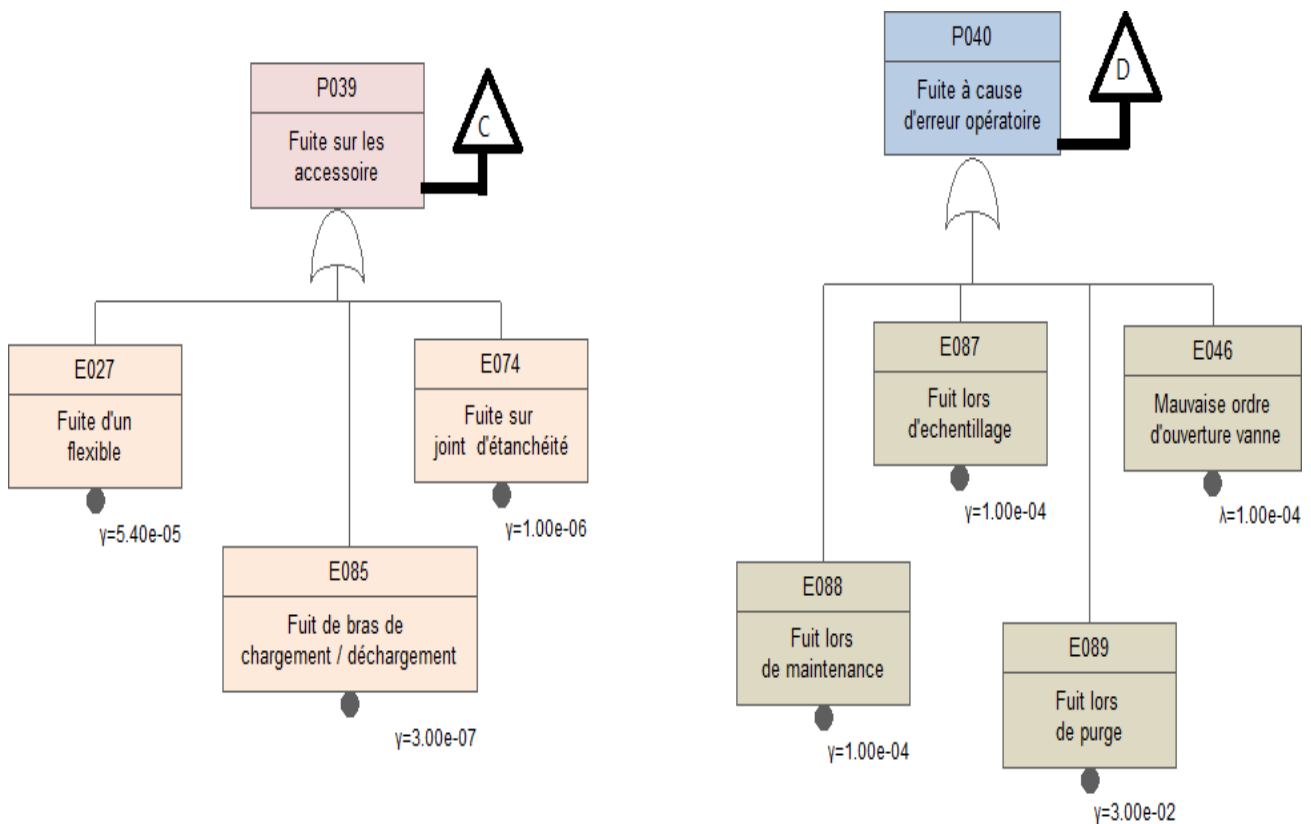


Figure 70 : Sous-système (fuit su accessoires – fuite à cause erreur opératoire)

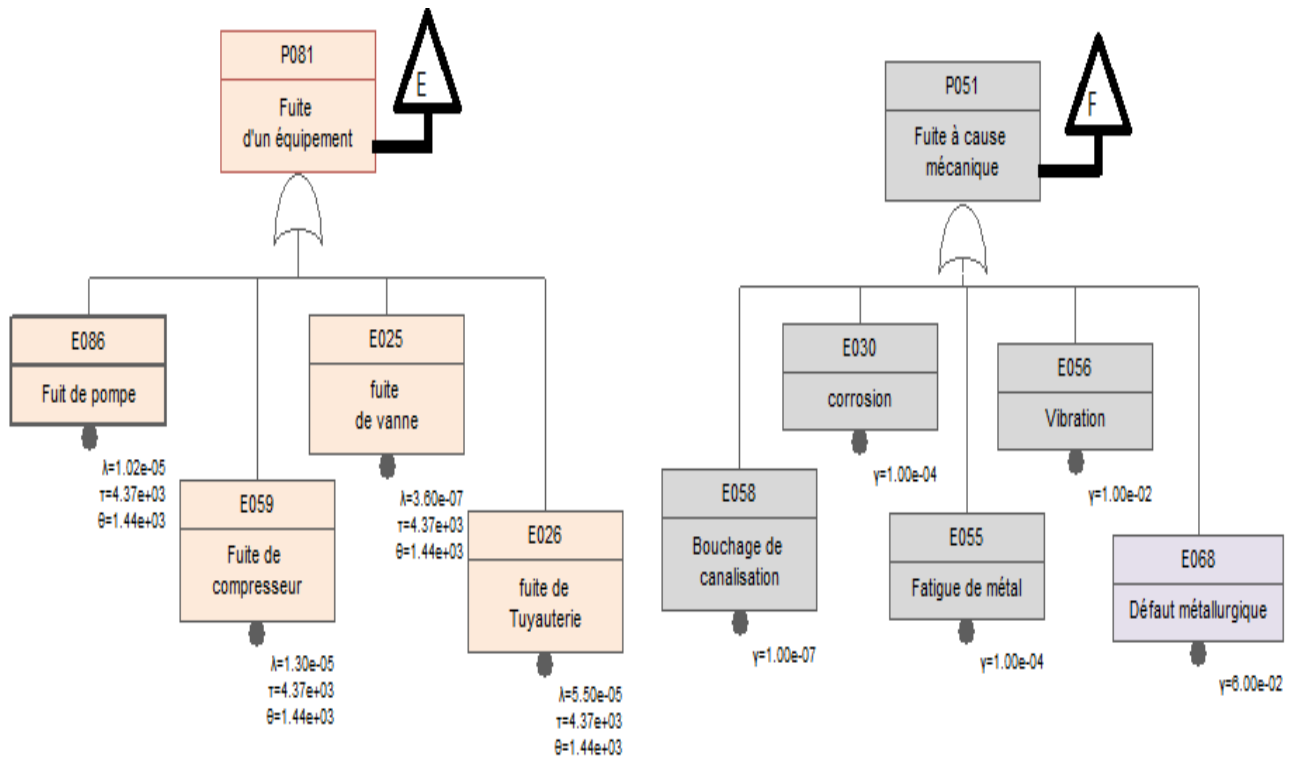


Figure 71 : Sous-système (fuite d'un équipement – fuite à cause mécanique)

Détermination de la gravité

|               | SELS            | Niveau de gravité |
|---------------|-----------------|-------------------|
|               | $P = PI + 10PE$ |                   |
| Brèche 50%    | $P > 100$       | Désastreux        |
| Repâture 100% | $P > 100$       | Désastreux        |

Placement dans la matrice de criticité

| Gravité           | Probabilité (sens croissant de E vers A) |                       |   |   |   |
|-------------------|--|-----------------------|---|---|---|
|                   | E  | D                     | C | B | A |
| 5. Désastreux     |  | Rupture<br>brèche 50% |   |   |   |
| 4. Catastrophique |  |                       |   |   |   |
| 3. Important      |  |                       |   |   |   |
| 2. Sérieux        |  |                       |   |   |   |
| 1. Modéré         |  |                       |   |   |   |

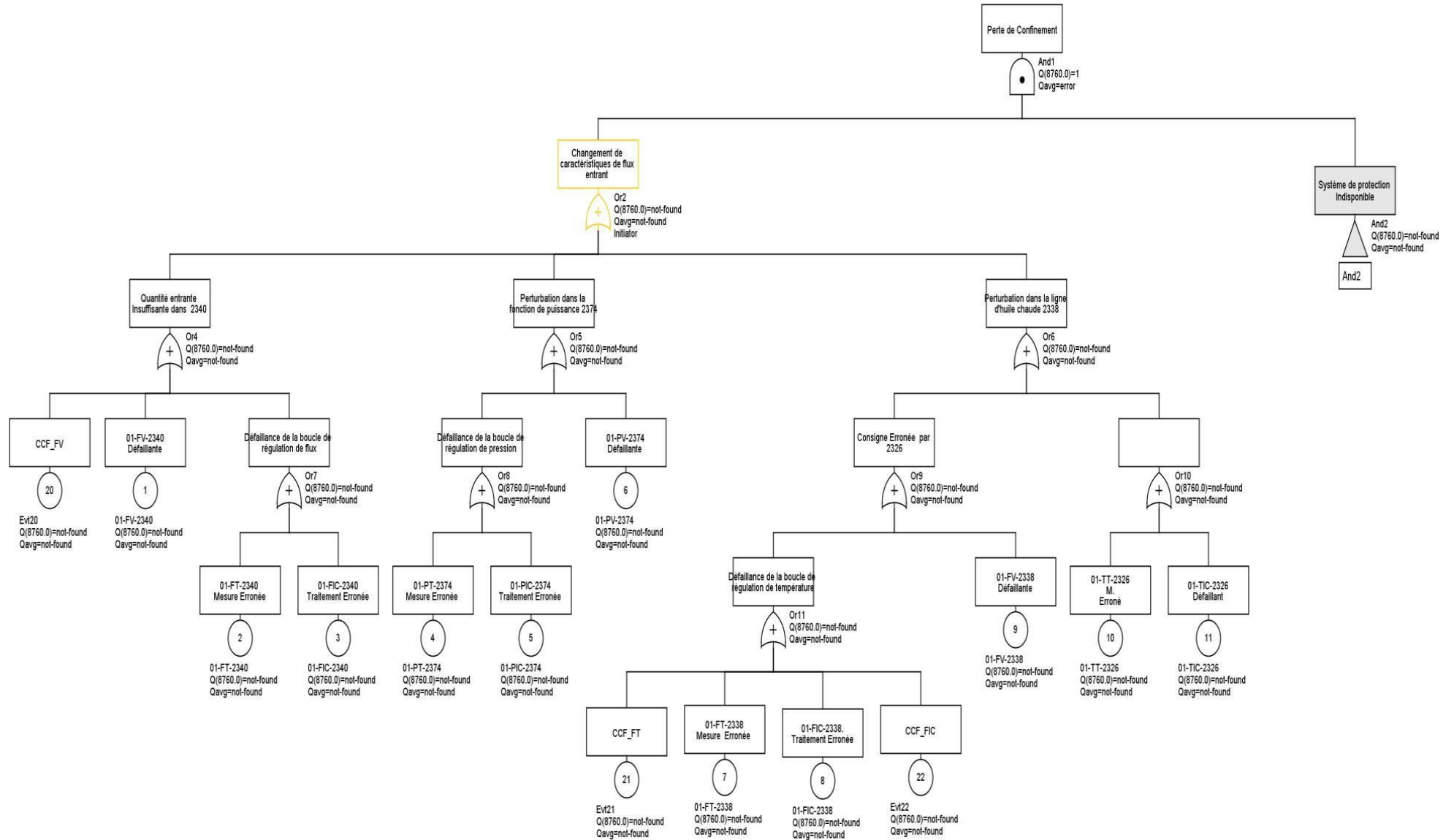


Figure 72 : Arbre de défaillance de l'événement : perte de confinement

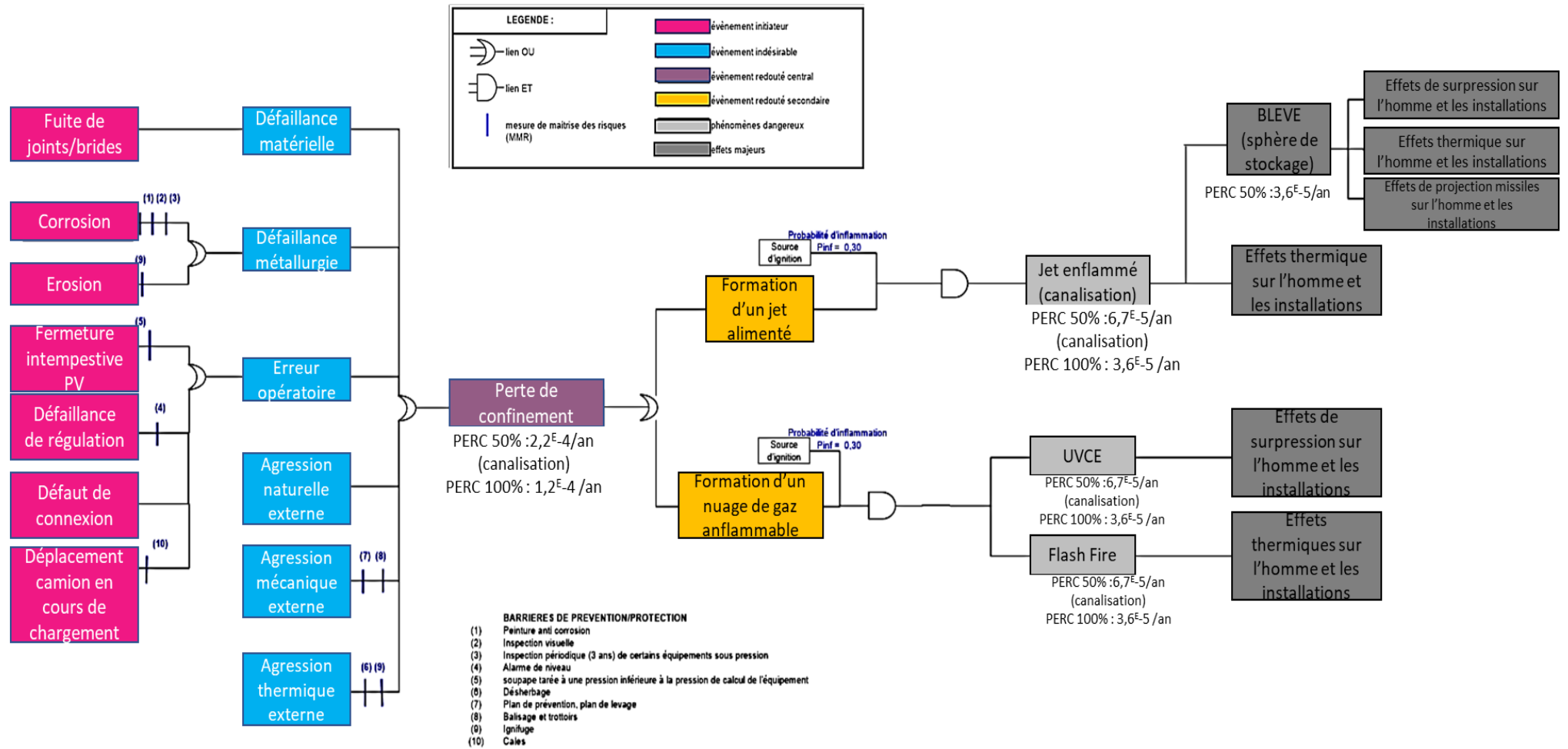


Figure 73 : Onde de papillon : perte de confinement

## CHAPITRE VIII : ÉTUDE DE DISPERSION DES FLUIDES INFLAMMABLES

### VIII. INTRODUCTION

La dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et dans l'espace d'un nuage de gaz inflammable des produits suivants ; mélange gazeux GPL, le Fuel Gas et C4 de la section de stockage 61 incluant le stockage tampon et le stockage du butane ambiant dans les quatre sphères A/G/E/F, L'émission de ces produits à l'atmosphère peut revêtir un caractère :

- Soit chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Nous citerons les fuites.
- Soit accidentel, avec des émissions à l'atmosphère ponctuelles dans le temps, non désirées comme la fuite des équipements que nous avons désignés dans cette étude. Nous citerons les ruptures entre autres.

Ce travail traitera des mécanismes de dispersion atmosphérique en situation accidentelle (fuites et ruptures).

Il s'agit ici à la fois d'identifier les mécanismes physiques intervenant dans la dispersion atmosphérique des produits étudiés à savoir le GPL, le Fuel Gas et le C4, et de présenter les principales méthodes d'estimation de la dispersion atmosphérique de ces derniers et en particulier celles relatives à l'analyse quantitative des risques QRA par le modèle Gaussien traité par DNVGL PHAST v8.0.0 et à la résolution numérique CFD (Dynamique Computationnelle des Fluides) traitée par le software Insight Influx v1.27. [113]

En amont à la modélisation de la dispersion atmosphérique, il convient généralement de quantifier un « terme source », c'est-à-dire de caractériser le rejet étudié vers l'air en termes de débit, température, état physique etc., ces données constituent les inputs et outputs de la modélisation numérique que nous entamerons.

#### VIII-1. DEMARCHE OBSERVEE

La démarche adoptée pour le présent rapport consacré à l'étude du phénomène de la « Dispersion atmosphérique » du GPL, Fuel Gas et du C4 de la section de stockage 61 du complexe GP2/Z est décrite ci-après :

- Sous-chapitre I : Mécanismes physiques.
- Sous-chapitre II : Modélisation.

#### IV-1-1. MECANISMES PHYSIQUES

Les conditions de dispersion atmosphérique d'un produit vont dépendre de plusieurs paramètres :

- Les conditions de rejet (nature du nuage de produit, mode d'émission...);
- Les conditions météorologiques (champ de vent, de température...);
- L'environnement (nature du sol, présence d'obstacles, topographie, orographie, urbanisme).

Différents processus dont l'importance relative dépend des conditions de rejet, entrent en jeu et agissent simultanément ou successivement. Ces différents mécanismes physiques sont présentés dans cette partie.

#### **IV-1-2. CONDITIONS DE REJET [25,113]**

##### **ETAT PHYSIQUE INITIAL DU POLLUANT**

Avant d'être rejetées dans l'atmosphère, les substances stockées dans les sphères A/G (GPL) et E/F (C4 ambiant) se trouvent sous forme d'un gaz liquéfié.

Les rejets vont donner lieu à une émission diphasique pouvant conduire à la formation d'une nappe suite au phénomène de Rain-out ou de condensation du nuage gazeux.

Pour diverses raisons, ces produits peuvent être relâchés dans l'environnement. La rupture du confinement va entraîner des phénomènes variables selon le produit considéré, les paramètres et conditions de stockage, l'importance et la position du point de rejet.

#### **IV-1-3. REACTIVITE AVEC L'ATMOSPHERE (STABILITE CHIMIQUE)**

Le cas étudié dans ce travail traite de produits inertes ou stables (le C1, C2, C3, C4, C5), c'est-à-dire ne subissant pas ou peu de transformations ou d'altération d'origine chimique en contact avec l'atmosphère.

#### **IV-1-4. MODE D'EMISSION**

Parmi les types de rejet à l'atmosphère, on distingue les rejets instantanés des rejets continus.

##### **a. Rejet instantané :**

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

Lors d'un rejet instantané de gaz, en l'absence d'obstacle de taille significative à proximité, l'extension initiale du nuage est relativement isotrope. Il en résulte un volume gazeux sphérique, ou semi-sphérique si l'émission a lieu au niveau du sol.

##### **b. Rejet continu :**

La fuite continue se produit à partir d'une bride ou d'une vanne ou de l'émission par un événement, piquage d'instrumentation, purge ou reniflard.

La fuite va principalement dépendre des conditions de stockage au moment de la fuite mais aussi de la taille, de la géométrie et de la hauteur de l'orifice de fuite.

A partir de ces données, il est possible d'estimer un terme-source (débit, vitesse, température... du rejet) par la modélisation intégrale et gaussienne du logiciel PHAST v8.0.0. [113]

Pour un rejet à partir d'un réservoir, le débit varie généralement dans le temps puisque durant l'avidange du réservoir, la quantité de produit stocké diminuant, la pression de fuite s'atténue dans le temps.

Le panache est dans la plupart des cas de forme allongée communément appelé « plume ». Lorsque la densité du gaz rejeté est plus grande que celle de l'atmosphère comme dans le cas du C3 et C4, les forces de gravité influencent de façon importante sur la dispersion du nuage.

A proximité du rejet, la force de gravité est à l'origine d'un mouvement d'ensemble vers le sol et l'expansion verticale du nuage est réduite. En contact avec le sol, le nuage se répand, poursuit son effondrement ce qui favorise son développement transversal.

Enfin, il s'établit sur les faces latérales du nuage une recirculation interne favorisée par l'étalement du nuage au sol à mesure de son effondrement. Ce comportement est illustré par la modélisation de DNVGL PHAST 8.0.0 régit par le modèle de PENG-ROBINSON que nous entamerons dans les sous-chapitres suivants.

#### IV-1-5. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Les phénomènes météorologiques à prendre en compte dépendent de la dimension du domaine étudié. Dans le cas que nous traiterons, l'échelle spatiale ne dépassera pas quelques centaines de mètres et celle du temps quelques dizaines de secondes, à une minute. Ceci afin de circonscrire l'étude à la section de stockage 61 et de limiter l'évaluation de la performance du système de détection F&G à cette zone uniquement.



Figure 74 : Visualisation satellite de la section de stockage 61 du complexe GP2/Z

#### ECHELLE DES MOUVEMENTS ATMOSPHERIQUES

- La vitesse moyenne du vent joue un grand rôle dans le processus de diffusion.
- La rose des vents suivante illustrera l'influence de cet aspect météorologique sur la dispersion et nous permettra de définir le paramètre météo à prendre en compte lors de la modélisation gaussienne.

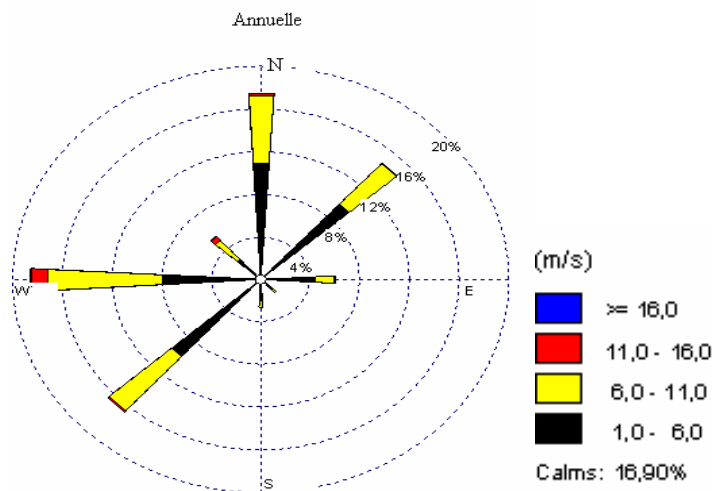


Figure 75 : Rose des vents de la région du complexe GP2/Z

### TURBULENCE D'ORIGINE MECANIQUE

Lorsque le nuage est en contact avec le sol, les effets de rugosité dus à la nature de la surface créent une zone de turbulence à l'interface d'origine mécanique.

La notion de rugosité sous-entend que les éléments (végétation...) qui la définissent, sont beaucoup plus petits que la taille du nuage. Si ces éléments sont de taille comparable à celle du nuage, ils doivent être considérés comme des obstacles qui génèrent des perturbations beaucoup plus importantes que la turbulence de petite échelle (tourbillons, zones de recirculations, brise).

Le modèle gaussien traduit la présence d'obstacles, de la végétation sous la forme d'un paramètre global de rugosité.

L'étude orographique et géologique du site GP2/Z de manière générique et de la section de stockage 61 de manière spécifique telle que présentée dans l'étude de danger fournit les données suivantes :

Une classification de la stabilité atmosphérique peut être effectuée au travers des classes de Pasquill qui varie de A à F, de l'atmosphère la plus instable à la plus stable.

Les classes de stabilité peuvent être associées à des conditions météorologiques données par le tableau ci-dessous :



Tableau 21 : Degrés de stabilité Atmosphérique de l'échelle Pasquill

| Vitesse du vent à 10 m | JOUR                         |        |        | NUIT             |      |
|------------------------|------------------------------|--------|--------|------------------|------|
|                        | Rayonnement solaire incident |        |        | Nébulosité       |      |
| [m/s]                  | Fort                         | Modéré | Faible | entre 4/8 et 7/8 | <3/8 |
| <2                     | A                            | A-B    | B      | F                | F    |
| 2-3                    | A-B                          | B      | C      | E                | F    |
| 3-5                    | B                            | B-C    | C      | D                | E    |
| 5-6                    | C                            | C-D    | D      | D                | D    |
| >6                     | C                            | D      | D      | D                | D    |

Les degrés de stabilité pris en compte dans le cas de cette étude sont :

**Stabilité diurne estivale :**

- Le degré 5/D
- Le degré 10/D
- Le degré 1.5/F
- Le degré 3/B-C

**Stabilité nocturne estivale :**

- Le degré 2/F
- Le degré 5/D
- Le degré 6/E

**Stabilité diurne hivernale :**

- Le degré 20/D
- Le degré 5/C

**Stabilité nocturne hivernale :**

- Le degré 10/D
- Le degré 7/D

**IV-1-6. ENVIRONNEMENT**

La dispersion atmosphérique d'un produit est influencée par l'occupation du sol, avec la présence d'obstacles, nous citerons la vannerie et tuyauterie ainsi que la présence d'équipements dans les points bas des sphères A/E/F/G de la section de stockage.

Par ailleurs, les éventuelles discontinuités de recouvrement du sol vont être à l'origine d'effets thermiques propres à modifier le comportement du rejet gazeux avec la formation de stagnations et poches. Ceci sera défini dans le cas de la section de stockage 6105 du complexe GP2/Z par l'étude topographique, l'étude du sol et l'étude orographique et de porosité présentée dans l'étude de danger y afférente.

Un terme de réflexion au sol peut être pris en compte pour modéliser la capacité de réflexion ou d'absorption du produit sur le sol.

De façon évidente, ce phénomène est plus ou moins accentué suivant la nature du produit et l'environnement. Les coefficients universels suivants sont utilisés pour décrire le degré de réflexion du sol ;  $\sigma_0$  : absorption partielle et  $\sigma_1$  : réflexion totale pour un sol non poreux avec un produit ne pouvant réagir avec ce sol ou la végétation (un gaz comme le GPL sur du béton).

La modélisation dépendra ainsi de deux paramètres corrélés, nous citerons la rugosité du sol et le degré de stabilité météorologique en Pasquill, la corrélation générera un facteur de correction qui a pour finalité de réduire l'erreur quadratique de la simulation par régression linéaire.

Tableau 22 : Facteurs de correction de modélisation par corrélation des classes de stabilité et rugosité du sol

| Classe de stabilité | Coefficient a |       |       | Coefficient s |       |      |
|---------------------|---------------|-------|-------|---------------|-------|------|
|                     | Rugosité      |       |       |               |       |      |
|                     | 1 cm          | 10 cm | 1 m   | 1 cm          | 10 cm | 1 m  |
| A                   | 0,102         | 0,140 | 0,190 | 0,94          | 0,90  | 0,83 |
| B                   | 0,062         | 0,080 | 0,110 | 0,89          | 0,85  | 0,77 |
| C                   | 0,043         | 0,056 | 0,077 | 0,85          | 0,80  | 0,72 |
| D                   | 0,029         | 0,038 | 0,050 | 0,81          | 0,76  | 0,68 |
| E                   | 0,017         | 0,023 | 0,031 | 0,78          | 0,73  | 0,65 |
| F                   | 0,009         | 0,012 | 0,017 | 0,72          | 0,67  | 0,58 |

A et S sont les coefficients relatifs à l'équation suivante calculant l'erreur quadratique  $\sigma_z$  de la régression linéaire :

$$\sigma_z = a x^s \text{ avec } x \text{ [km]}$$

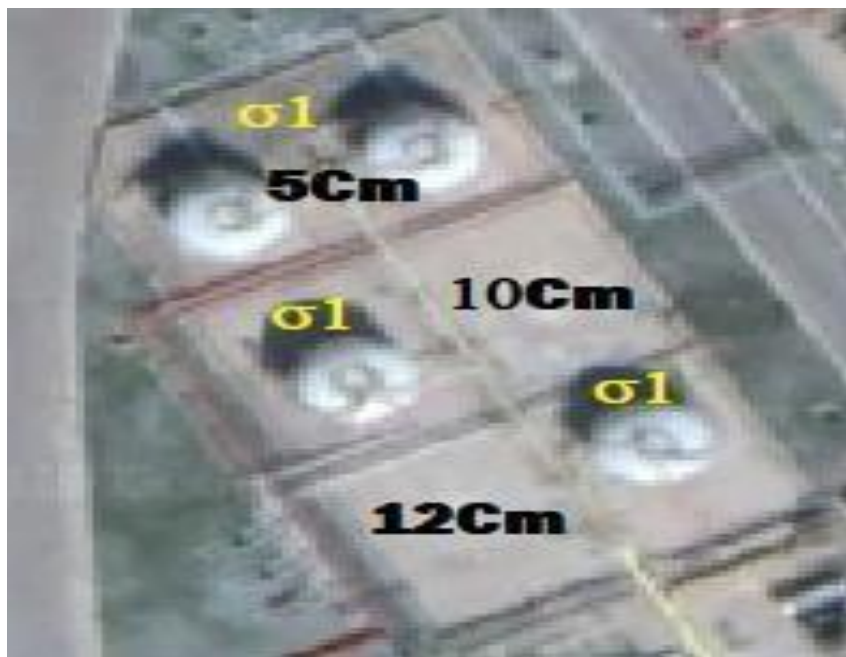


Figure 76 : Image satellite démontrant le facteur de réflexion et de rugosité du sol de la section de stockage 61

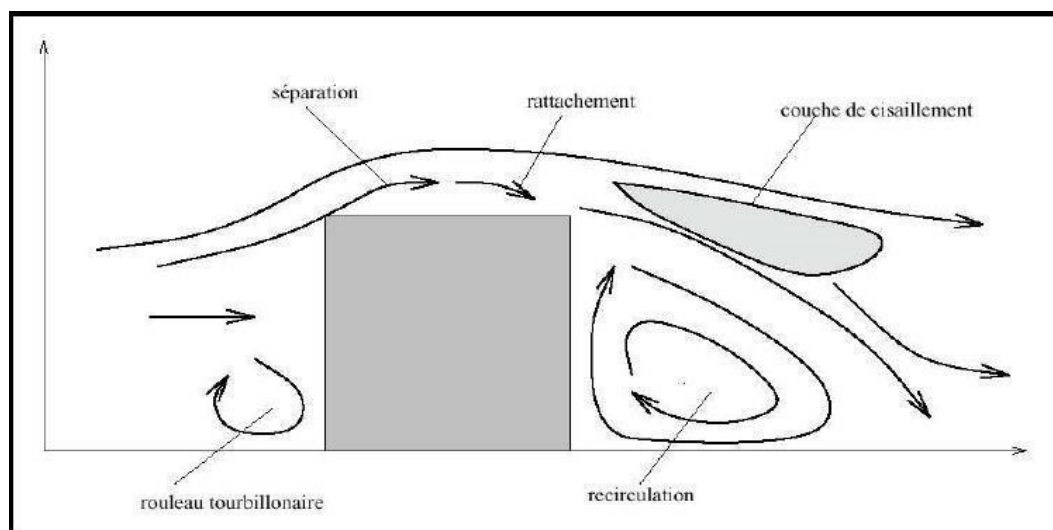


Figure 77. : Comportement d'un nuage de vapeur en contact avec un obstacle en présence d'un sol non-poreux et rugueux (cas de la section 61)

## Commentaires

Relativement à la dispersion d'un produit, on peut observer :

### 1. En amont de l'obstacle :

- L'accroissement de la concentration ;
- L'augmentation du temps d'exposition ;
- La présence de zones de recirculation ;

### 2. En aval de l'obstacle :

- La décroissance de la concentration ;
- L'augmentation du temps d'exposition ;

- La diminution de la largeur du nuage ;
- L'homogénéité verticale de la concentration.

La vitesse du vent et la densité du gaz rejeté jouent des rôles particulièrement importants. Ainsi, plus le vent est faible et le gaz est dense, plus la présence de l'obstacle se fait sentir.

#### **IV-2. MODELISATION [25, 23, 7, 129, 142]**

La modélisation numérique présente a priori des avantages certains par rapport aux techniques physiques que sont les essais in situ ou à échelle réduite :

- Rapidité de l'étude ;
- Possibilité d'envisager un grand nombre de situations.

Les modèles numériques de dispersion dont nous avons usés se rangent par ordre de complexité croissante en trois principales familles :

- Les modèles gaussiens ;
- Les modèles intégraux ;
- Les modèles CFD (Computational Fluid Dynamics).

Globalement, les deux premiers types d'outils s'attachent à modéliser la dispersion à partir d'équations paramétrées et simplifiées répertoriées dans la base de données du software DNVGL PHAST v8.0.0.

Les temps de calcul sont courts, de l'ordre de la minute.

La troisième famille résout directement le système d'équation décrivant les mécanismes physiques de la dispersion décrits dans les sous-chapitres précédents.

Les temps de calcul sont plus longs, de l'ordre de plusieurs minutes. Ce type de modèle de calcul est fourni par le software Insight Influx v1.27 avec une illustration tridimensionnelle de la dispersion et de son comportement vis-à-vis des conditions météorologiques et topographiques du site.

##### **IV-2-1. SIMULATION PAR LE MODELE GAUSSIEN PHAST**

Les modèles Gaussiens PHAST que nous utiliserons déterminent les lieux de l'espace où une concentration donnée est observée. Il est donc possible, en première approximation, de ne s'intéresser qu'à la distance maximale sous le vent de la source où une concentration donnée est atteinte. Cette méthode nécessite la définition de plusieurs scénarios de danger que nous mettrons en exergue comme suit :

##### **Sphères de Stockage A/E/F/G**

- Fuite de 13mm bride 3" T.S
- Fuite de 25mm bride 6" T.S

- Fuite de 30mm bride 8" B.S
- Fuite de 50mm bride 10" B.S
- Rupture de la ligne C4 10" B.S
- Fuite de 5mm de la vanne manuelle YONEKI WCB 8" T.S
- Fuite de 5mm de la vanne manuelle YONEKI WCB 10" B.S
- Fuite de 5mm de la vanne manuelle YONEKI LCB 3" B.S
- Fuite de 5mm de la vanne manuelle YONEKI LCB 3/4" B.S
- Fuite de 5mm de la vanne pneumatique KOSO 6" B.S
- Fuite de 5mm de la soupape de sécurité ANDERSON GREENWOOD 3" T.S
- Fuite de 10mm de la ligne 4" d'alimentation en FG T.S
- Fuite de 3mm du manomètre de pression 1/2" T.S
- Fuite de 5mm de la soupape de sécurité TYCO GRISS CROSBY 3" T.S

**N.B :** Dans un souci d'accroître la fiabilité de la modélisation nous avons opté pour un choix de scénario relatifs à des « termes sources » d'emplacements différents tel que cité ci-dessus T.S (Tête de Sphère) et B.S (Bas de Sphère), et de dimensions différentes.

### Ligne torchère 30"

- Fuite de 10mm au niveau de la restriction divergente
- Fuite de 13mm au niveau de la jointure du raccordement 8"
- Fuite de 10mm au niveau de la génératrice supérieure
- Fuite de 10mm au niveau de la génératrice inférieure

### Ligne torchère 44"

- Fuite de 10mm au niveau de la restriction divergente
- Fuite de 13mm au niveau de la jointure du raccordement 8"
- Fuite de 10mm au niveau de la génératrice supérieure
- Fuite de 10mm au niveau de la génératrice inférieure

**N.B :** Le choix des diamètres des orifices s'est fait en s'appuyant sur le protocole opératoire de l'étude de dispersion édicté par la rubrique « Functional safety –Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 3 : Guidance for the determination of the dispersion model Incorporating Amendment » No. 1 to BS IEC 61511-3 :2003 du manuel britannique Health and Safety Executive. [69]

Notre étude se scindera en deux parties incluant une étude estivale et une étude hivernale, les facteurs qui caractérisent ces études sont la vitesse du vent, le rayonnement solaire incident, la nébulosité nocturne, le taux d'humidité et la température de l'atmosphère, ces critères sont décrits par les degrés de stabilité cités précédemment et qui sont considérés comme des données d'entrée de la modélisation.

| Étude     | Température moyenne | Taux d'humidité | Vitesse du vent | Rayonnement solaire incident | Nébulosité nocturne |
|-----------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---------------------|
| Estivale  | 31,2°C              | 80,4%           | 1-6 m/s         | D                            | F                   |
| Hivernale | 14,7°C              | 70,2%           | 12-28 m/s       | F                            | E                   |

Ci-dessous un tableau comparatif des critères :

Ces données ont pour origine l'ONML ainsi que l'étude de danger relative au complexe GP2/Z, ce document peut être consulté dans les fichiers annexes.

|   |   |
|---|---|
| <p>▲ 420/6105E Butane tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3" D1Z-5401E-FG-7 Flange 13mm Leak</li> <li>6" D1Z-5406E-PX-9 Flange 25mm Leak</li> <li>8" D1Z-5411E-FA-3 Flange 30mm Leak</li> <li>10" D1Z-5562E-PX-8 Flange 50mm Leak</li> <li>C4 10" D1Z-5004-PX:B1 unload Line</li> <li>8" YONEKI WCB D1Z-5013-FA Manual Valve leak</li> <li>10" YONEKI WCB D1Z-3015-PX Manual Valve leak</li> <li>3" YONEKI LCB D1Z-420-LE61 Manual Valve leak</li> <li>3/4 YONEKI LCB D3U-7065-PX Manual Valve leak</li> <li>6" KOSO Pneumatic Valve HV6171</li> <li>3" RV PV6185A Leak</li> <li>4"420/6105E/N-3 Fuel Gas Feed Leak</li> <li>1/2" D1F-5911-DC Pressure Glass Indicator Leak</li> <li>3" RV PV6174 Leak</li> </ul> | <p>▲ 420/6105F Butane tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3" D1Z-5401F-FG-7 Flange 13mm Leak</li> <li>6" D1Z-5406F-PX-9 Flange 25mm Leak</li> <li>8" D1Z-5411F-FA-3 Flange 30mm Leak</li> <li>10" D1Z-5562F-PX-8 Flange 50mm Leak</li> <li>C4 10" D1Z-5005-PX:B1 unload Line</li> <li>8" YONEKI WCB D1Z-5015-FA Manual Valve leak</li> <li>10" YONEKI WCB D1Z-3005-PX Manual Valve leak</li> <li>3" YONEKI LCB D1Z-420-LT61 Manual Valve leak</li> <li>3/4 YONEKI LCB D3U-7005-PX Manual Valve leak</li> <li>6" KOSO Pneumatic Valve HV6108</li> <li>3" RV PV6102A Leak</li> <li>4"420/6105F/N-3 Fuel Gas Feed Leak</li> <li>1/2" D1F-5893-DC Pressure Glass Indicator Leak</li> <li>3" RV PV6105 Leak</li> </ul> |
|---|---|

Figure 78 : Inventorisation des scénarios de danger relatifs au stockage C4 ambiant tel que présenté dans le software DNVGL PHAST v8.0.0

|   |  |
|---|--|
| <p>▲ 420/6105G LPG tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3" D1Z-5411-FG-7 Flange 13mm Leak</li> <li>6" D1Z-5496-PX-9 Flange 25mm Leak</li> <li>8" D1Z-5311-FA-3 Flange 30mm Leak</li> <li>10" D1Z-5862-PX-8 Flange 50mm Leak</li> <li>LPG 10" D1Z-5012-PX:C1 unload Line</li> <li>8" YONEKI WCB D1Z-5015-GA Manual Valve leak</li> <li>10" YONEKI WCB D1Z-4218-PX Manual Valve leak</li> <li>3" YONEKI LCB D1Z-420-LF12 Manual Valve leak</li> <li>3/4 YONEKI LCB F4U-7005-PX Manual Valve leak</li> <li>6" KOSO Pneumatic Valve HV6118</li> <li>3" RV PV6102A Leak</li> <li>4"420/6105F/N-3 Fuel Gas Feed Leak</li> <li>1/2" D1F-5893-DC Pressure Glass Indicator Leak</li> <li>3" RV PV6105 Leak</li> </ul> | <p>▲ 420/6105A LPG tank</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3" D1Z-5401-FG-7 Flange 13mm Leak</li> <li>6" D1Z-5406-PX-9 Flange 25mm Leak</li> <li>8" D1Z-5411-FA-3 Flange 30mm Leak</li> <li>10" D1Z-5562-PX-8 Flange 50mm Leak</li> <li>C4 10" D1Z-5005-PX:B1 unload Line</li> <li>8" YONEKI WCB D1Z-5015-FA Manual Valve leak</li> <li>10" YONEKI WCB D1Z-3005-PX Manual Valve leak</li> <li>3" YONEKI LCB D1Z-420-LT61 Manual Valve leak</li> <li>3/4 YONEKI LCB D3U-7005-PX Manual Valve leak</li> <li>6" KOSO Pneumatic Valve HV6108</li> <li>3" RV PV6102A Leak</li> <li>4"420/6105A/N-3 Fuel Gas Feed Leak</li> <li>1/2" D1a-5893-DC Pressure Glass Indicator Leak</li> <li>3" RV PV6105 Leak</li> </ul> |
|---|--|

Figure 79 : Inventorisation des scénarios danger relatifs au stockage tampon GPL ambiant tel que présenté dans le software DNVGL PHAST v8.0.0

Les conséquences d'un potentiel accident industriel sont entre autres quantifiées en termes de distances limites en deçà desquelles il pourrait être observé des effets sur la santé humaine irréversibles et létaux.

Pour cela, dans le cas d'un rejet de gaz inflammable, il faut apprécier :

- La distance où est atteinte la limite inférieure d'explosibilité (LIE) ;
- Celle où est atteinte la limite supérieure d'explosibilité (LSE) ;

Nous procéderons pour la détermination de ces valeurs à la simulation des scénarii inventoriés pour chaque équipement et ce dans la finalité de générer un rapport permettant de mettre en évidence les éléments cités ainsi que les suivants :

- La vitesse de la fuite à la sortie
- La température du fluide à la sortie
- Le débit du fluide à la sortie
- Les fractions du fluide à la sortie
- Le diamètre des particules liquides à la sortie
- Quantité de vapeur recondensée
- Distance de recondensation de vapeur par rapport à la source

Ces données constitueront entre autres les inputs principaux de la réalisation de la modélisation CFD et seront compilées en représentation tridimensionnelle du nuage gazeux.

**N.B :** La modélisation CFD ne permet pas de mesurer avec précision le volume du gaz, cette fonctionnalité reste du ressort de la modélisation Gaussienne et ce par la génération d'une coupe transversale et d'une coupe longitudinale de l'émission gazeuse.

#### IV-2-3. CHOIX DES TERMES SOURCES

Les critères de choix des équipements et organes à prendre en compte dans l'étude de dispersions est fait sur la base des critères suivants :

- Vu la grande influence de l'élévation de l'organe par rapport au niveau du sol sur la dispersion du nuage gazeux, notre choix s'est porté sur des scénarios relatifs à des termes sources situés en tête et bas des sphères A/G/E/F
- La fréquence de fuite calculée dans le chapitre précédent est un facteur déterminant dans le choix du terme source en vue d'une étude de dispersion, nous opterons par cet effet pour les organes et éléments caractérisés par les fréquences de fuites les plus élevées et ce vu la probabilité d'occurrence très importante du scénario de danger y afférent.
- Les paramètres susceptibles d'être générateurs de scénarios de danger tel que la pression et la température, ces données peuvent être fournies par les bilans de matière spécifiques à chaque segment regroupant les termes sources relatifs aux scénarios.

Notre sélection sera ainsi portée sur les termes sources suivants :

- **Sphère 6105E :**
  - Bride de raccordement au réseau Fuel Gas 4"420/6105E/N-2 en tête de sphère
  - Avec une fréquence de fuite de  $1.54947e-006/\text{An}$  et une élévation de 11,2m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 5,3 barg.
  - Vanne manuelle 3/4" YONEKI LCB D7U-7045-PX en bas de sphère avec une fréquence de fuite de  $1.58493e-007/\text{An}$  et une élévation de 0,61m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 4,9 barg.

- **Sphère 6105F :**

- Bride de raccordement au réseau Fuel Gas 4"420/6105F/N-3 en tête de sphère
- Avec une fréquence de fuite de 1.34947e-006/An et une élévation de 11,1m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 5,3 barg.
- Vanne manuelle 3/4" YONEKI LCB D3U-7005-PX en bas de sphère avec une fréquence de fuite de 1.98493e-007/An et une élévation de 0,58m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 4,9 barg.

- **Sphère 6105A :**

- Bride 4" D1Z-5401-FG-7 de raccordement au réseau Fuel Gas en tête de sphère avec une fréquence de fuite de 1.84632e-005/An et une élévation de 11,3m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 8,23 barg.
- Coude de la tuyauterie de la ligne 3/4" LCB D3U-7055-PX de la purge de la ligne d'arrivée GPL 7005-PX en bas de sphère avec une fréquence de fuite de 1.8414e-007/An, une élévation de 0,43m et une pression opératoire de 8 barg.

- **Sphère 6105G :**

- Bride 4" D1Z-5501-FG-7 de raccordement au réseau Fuel Gas en tête de sphère avec une fréquence de fuite de 1.89522e-005/An et une élévation de 11,3m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 8,23 barg.
- Bride de raccordement 18" de l'appendice 22" avec la ligne D1A-5893-DC en bas de sphère avec une fréquence de fuite de 1.26472e-005/An, une élévation de 1,1m par rapport au niveau du sol et une pression opératoire de 8,2 barg.

Ci-dessous un exemple de simulation par modèle gaussien du scénario de danger « Fuite de 25mm au niveau de la bride 4 pouces 420/6105F/N-3 du raccordement au réseau FG de la sphère 6105F stockage C4 ambiant » avec génération de schéma graphique, image satellite et rapport de modélisation.

**N.B :** L'exemple ci-dessous est traité en prenant compte d'une direction du vent nord-est d'une vitesse de 6 m/s et un degré de stabilité 5/D, conformément à la rose des vents du complexe.



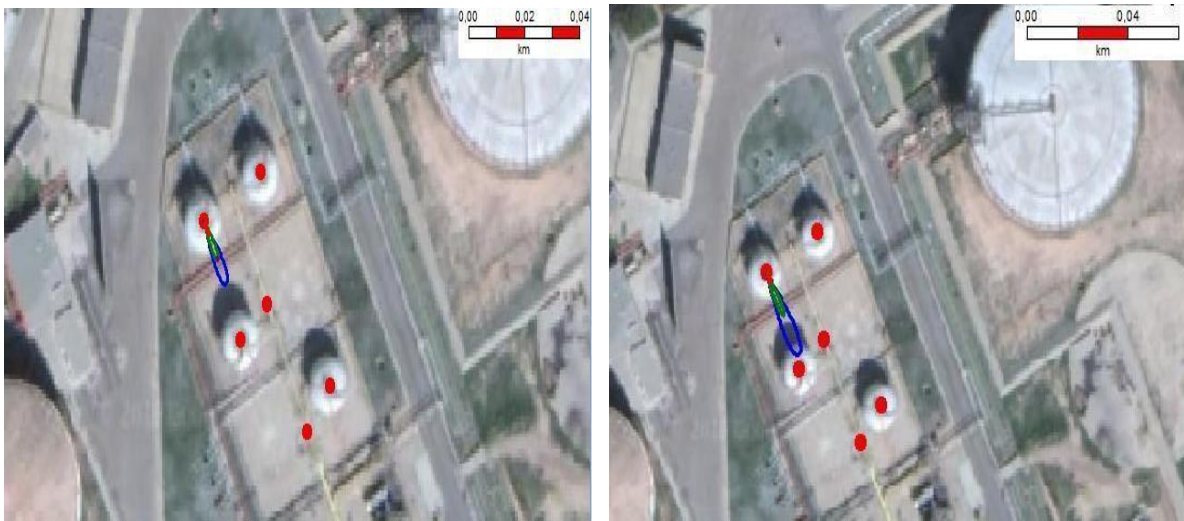


Figure 80 : Comparaison entre les études de dispersion hivernales (à gauche) et estivales (à droite) de la fuite 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambient

Les catégories illustrées dans les légendes de l'image satellite représentent :

- -1% de la LSI du C4 représentée par l'extrémité de la plume bleue et constituant une concentration de gaz de 7500 ppm dans l'atmosphère.
- -50% de la LSI du C4 représentée par l'extrémité de la plume verte et constituant une concentration de gaz de 15000ppm dans l'atmosphère.
- -100% de la LSI du C4 représentée par l'extrémité de la plume rouge et constituant une concentration de gaz de 90000 ppm dans l'atmosphère.
- -Un quatrième paramètre est à prendre en compte lors de l'étude hivernale, qui est la formation d'une flaque des suites de la recondensation par rain-out du nuage de vapeur sous l'effet de la température atmosphérique estimée à 14,7°C.

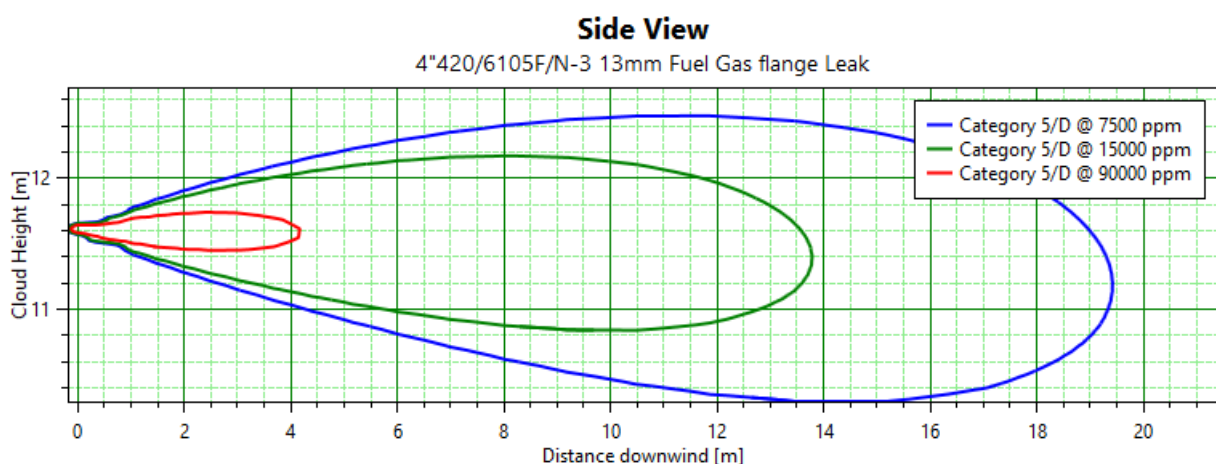


Figure 81 : Représentation graphique d'une coupe longitudinale du nuage gazeux issu d'une fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambient

Tel que mentionné dans les commentaires précédents les catégories désignent les différents pourcentages de la LSI, les graphiques apportent une information supplémentaire en décrivant avec

précision l'étendue du nuage dans la direction du vent ainsi que son élévation par rapport au niveau du sol.

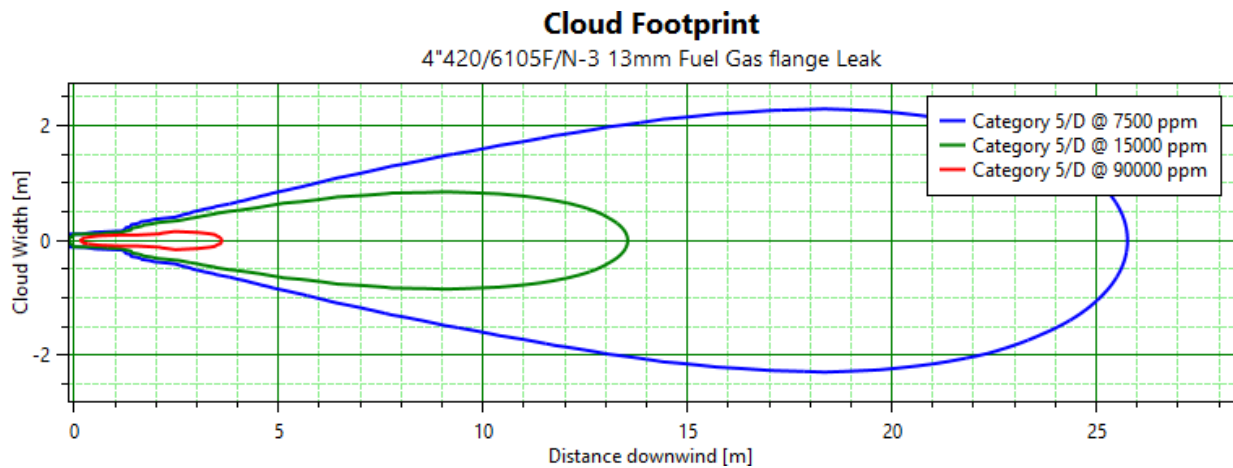


Figure 82 : Graphique illustrant une coupe transversale d'un nuage gazeux issu d'une fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4" 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambiant

Le graphique ci-dessus met en exergue les dimensions du nuage gazeux en termes de longueur et largeur en définissant les mensurations de chaque zone dépendamment du pourcentage de la LSI.

Les informations générées par les deux graphiques permettent d'avoir une idée sur le volume de gaz relâché vers l'atmosphère et constituent une donnée primaire à l'élaboration d'une classification des zones dangereuses inhérentes à l'approche de monitoring du système F&G dont nous évaluerons les performances dans les chapitres à venir.

Tableau 23 : Exemple de données de dispersion générées par le rapport de modélisation d'une fuite de 13mm de la bride 4" 420/6105F/N-3 du raccordement FG de la sphère 6105F C4 ambiant

| Path  | Scenario  | Weather         | Mass flow rate [kg/s] | Temperature [degC] | Liquid mass fraction in material [fraction] | Droplet diameter [um] | Expanded diameter [m] | Velocity [m/s] | Release duration [s] |
|---|---|-----------------|-----------------------|--------------------|---|-----------------------|-----------------------|----------------|----------------------|
| GP2Z STUDY<br>BACKUP\Etude<br>Estivale Zone de<br>Stockage<br>\420/6105F Butane<br>tank | 4"420/61<br>05F/N-3<br>13mm<br>Fuel Gas<br>flange<br>Leak | Category<br>5/D | 1,76179               | -0,53260<br>9      | 0,816173                                    | 222,2                 | 0,039831<br>7         | 98,4879        | 208,735              |
| Pressure  |   |                 |                       | 1,01325            |   | bar                   |                       |                |                      |
| Temperature   |   |                 |                       | 30,9703            |   | degC                  |                       |                |                      |
| Liquid mass fraction  |   |                 |                       | 1                  |   | fraction              |                       |                |                      |
| Velocity at vena contracta<br>(at exit for pipe releases)                               |   |                 |                       | 39,0819            |   | m/s                   |                       |                |                      |
| Discharge coefficient   |   |                 |                       | 0,6                |   |                       |                       |                |                      |
| Mass flow rate  |   |                 |                       | 1,76179            |   | kg/s                  |                       |                |                      |
| Release duration  |   |                 |                       | 208,735            |   | s                     |                       |                |                      |

| Scenario  | Weather      | Max flash fire distance [m] | Height of the max flash fire distance [m] | Time [s] |
|---|--------------|-----------------------------|---|----------|
| 4"420/6105F/<br>N-3 13mm Fuel<br>Gas flange<br>Leak | Category 5/D | 19,4201                     | 11,2088                                   | 26,9508  |

Ces données seront l'input à l'étude de dispersion par le modèle dynamique computationnel des fluides CFD

Tableau 24 : Interface des inputs de la modélisation CFD du software INSIGHT NUMERICS IN : FLUX v1.27

Type: Custom Gas Emission (Velocity, diameter, temperature, composition.)

Name: Release 01

Template: [dropdown] Reset

Gas: 6105LPG

Velocity: 10 m/s Use Flow Rate

Temperature: 10 °C

Gas: 6105LPG

Upstream Pressure: 10 bar(g)

Upstream Temperature: 10 °C

Discharge Coefficient: 0,8 Auto-Add:

Hole Size, Location and Orientation

Diameter: 50 mm Use Flow Rate

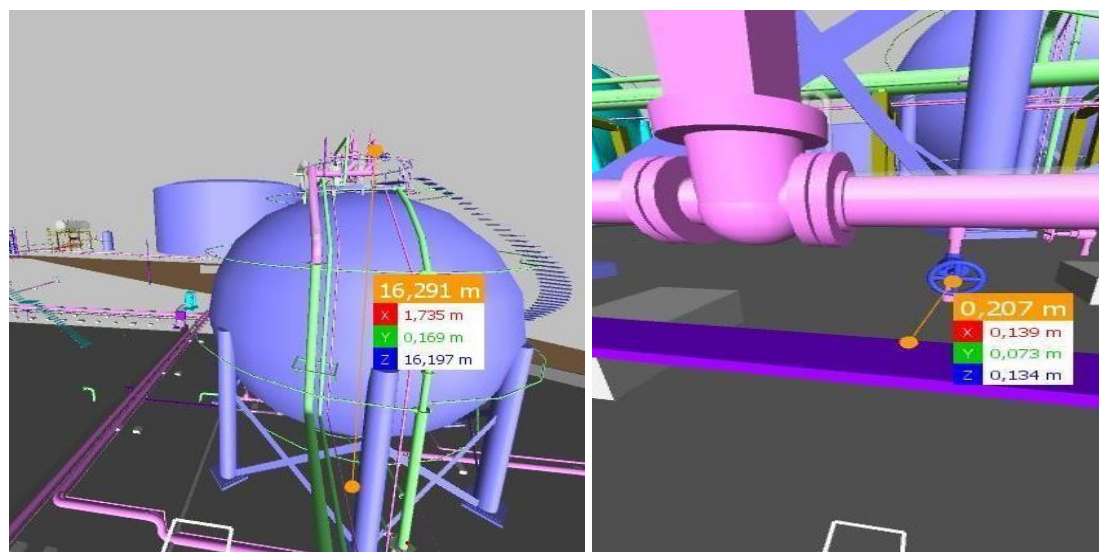


Figure 83 : Localisation des points bas des sphères de stockage par NAVISWORKS Manage v2020

**N.B :** Le software NAVISWORKS MANAGE 2020 nous a permis de situer les termes sources et de les identifier en vue de l'élaboration d'une classification plus poussée des zones dangereuses dans le chapitre suivant, la localisation tridimensionnelle est d'une importance cruciale dans cette démarche tel qu'édictée par le code IP15 du TNO sachant que le comportement des émissions de vapeurs diffère selon ce paramètre.

La simulation du comportement physique du nuage de vapeur se fera par la modélisation de la dynamique computationnelle des fluides (CFD) par INSIGHT InFLUX v1.27. [113, 141, 142]

Le modèle numérique tridimensionnel Influx v1.27 permet de simuler les rejets de gaz en prenant en compte l'ensemble des phénomènes intervenant de façon significative sur la dispersion, qu'ils soient liés à l'atmosphère comme la turbulence thermique, ou au site comme les obstacles ou le relief.

Ce modèle s'attache donc à résoudre directement le système d'équations physiques qui gouverne la dispersion sans le dégrader comme dans la démarche des modèles de type intégral et Gauss utilisé par PHAST v8.0.0.

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

- La conservation de la quantité de mouvement du nuage gazeux GPL6105/C4/FG ;
- La conservation de l'énergie ;
- La conservation de la masse d'air en prenant compte les paramètres Pasquill du complexe GP2Z ;
- La conservation de la quantité de GPL6105/C4/FG ;
- L'équation d'état du mélange gazeux afin de déterminer les différentes phases du rejet ;
- L'équation donnant la masse molaire du mélange dans le but de déterminer la LII et LSI.

Nous prendrons pour exemple la simulation des termes sources cités précédemment en entamant une comparaison entre les deux modélisations, à savoir Gaussienne et CFD.

Ci-dessous une représentation tridimensionnelle d'une fuite de 13mm de la bride 4" 420/6105F/N-3 du raccordement FG de la sphère 6105F C4 ambient, les quatre points cardinaux sont pris en compte dans un souci de fiabilisation de la modélisation.

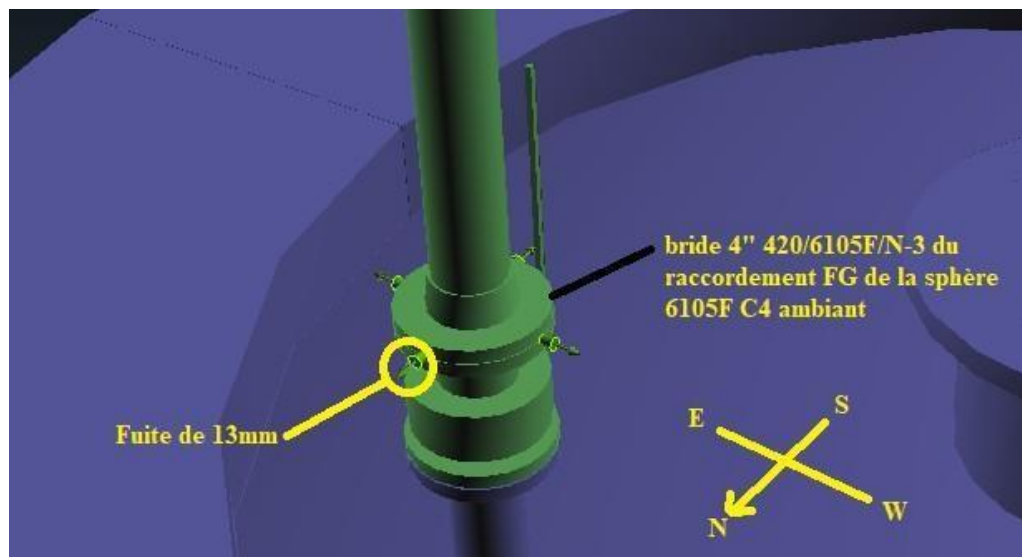


Figure 84 : Représentation 3D de la bride 420/6105/N-3 du raccordement FG de la sphère 6105F C4 ambient

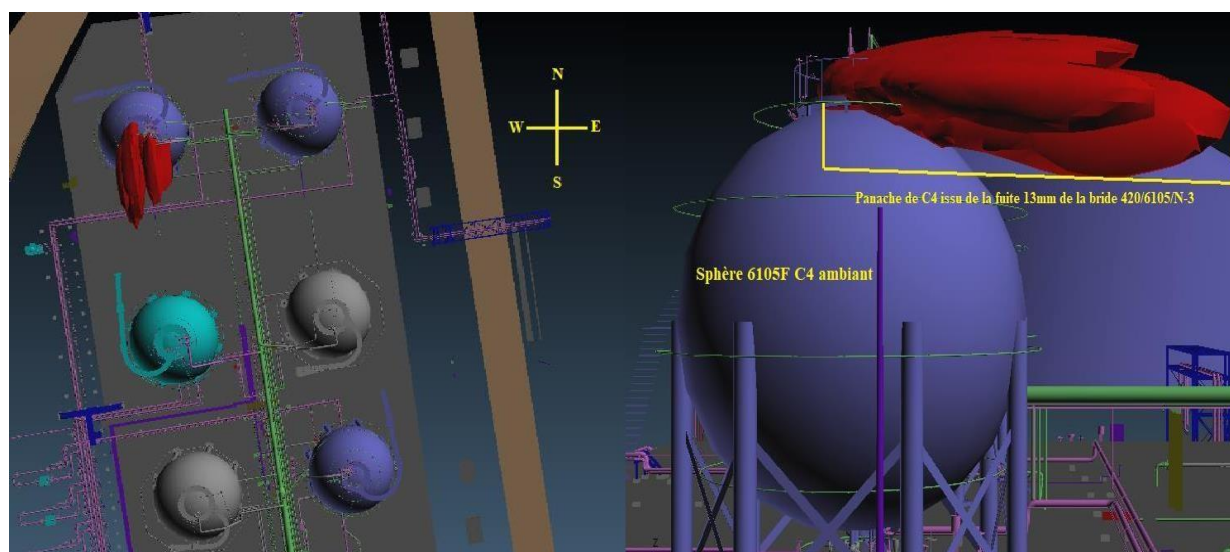


Figure 85 : Modélisation CFD de la fuite de 13mm de la bride de raccordement au réseau FG 4'' 420/6105F/N-3 de la sphère 6105F C4 ambient

**N.B :** Vu les contraintes temporelles liées à la simulation CFD par le software Insight In : Flux v1.27 caractérisées par une modélisation du rejet plafonnée à une durée de 56s.

Nous avons été dans l'obligation d'effectuer un calcul manuel par le modèle corrélatif de rejet continu Pasquill-Turner appuyé par les résultats graphiques de la simulation gaussienne par DNVGL PHAST v8.0.0, et ce dans le but d'estimer la distance relative au rain-out du panache de C4 de la fuite de la bride 420-6105/N-3 et sa re-condensation au niveau du sol, cette modélisation complémentaire est requise pour la définition des zones de détection vu l'implantation des détecteurs du système mit en place.

Nous soulignons que le modèle utilisé est également applicable aux points hauts des trois sphères 420/6105A/G et 420/6105E, ci-dessous un exemple de modélisation effectuée pour lecas de la bride 420-6105/N3 de la sphère 420/6105F C4 ambient :

Le modèle de rejet continu Pasquill-Turner s'écrit comme suit :

$$D = \int Q/2\pi v \sigma_y \sigma_z \exp(- (y-y_0)^2) (\exp(-z-z_0)^2) + \alpha \exp(-(z+z_0)^2)$$

- D : Distance approximative du rain-out
- Q : Débit de la fuite
- $\sigma_y$  : Degré de stabilité Pasquill suivant le plan y
- $\sigma_z$  : Degré de stabilité Pasquill suivant le plan z
- Y : Coordonnée du point extrême du panache suivant le plan Y
- Z : Coordonnée du point extrême du panache suivant le plan Z
- z0 : Coordonnée du point de fuite suivant le plan Z
- y0 : Coordonnée du point de fuite suivant le plan Y
- v : Vitesse du panache au point de fuite

Les données spatiales sont fournies par l'outil de mesure AUTODESK NAVISWORKS MANAGE v2020, les données relatives au débit de la fuite, la vitesse et les degrés de stabilité sont quant à elles fournies par le rapport de modélisation de la dispersion de DNVGL PHAST v8.0.0 et indiquent :

**Q** : 1,76179 Kg/s     **$\sigma_y$**  : 0,405     **$\sigma_z$**  : 0,135    **Z0** : 12,28m    **Y** : 3,7m  
**Z** : 11,47m    **Y0** : 0,3m    **V** : 98,4879 m/s

L'application numérique indique que la distance parcourue par le panache de C4 sur le plan X avant de subir le phénomène de rain-out et entamer une descente vers le sol est de D= 23.42m.

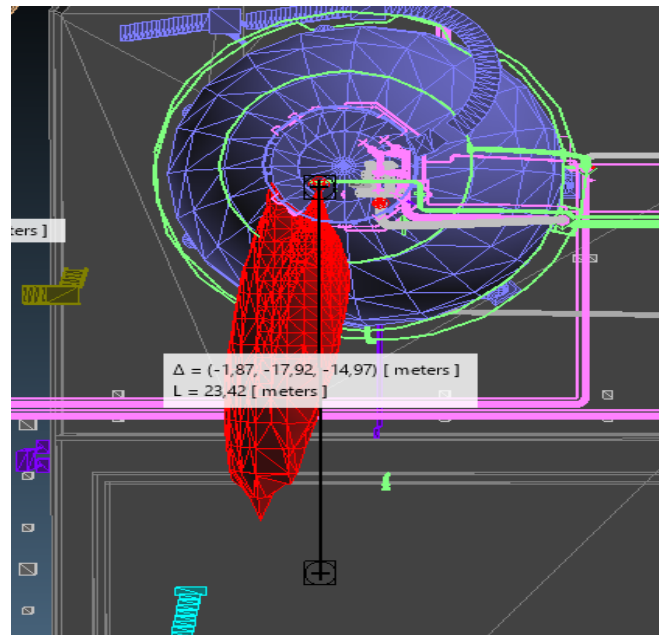


Figure 86 : Schématisation par NVW v2020 de la distance nécessaire à la condensation du panache de C4 de la fuite de la bride 420/6105/N-3

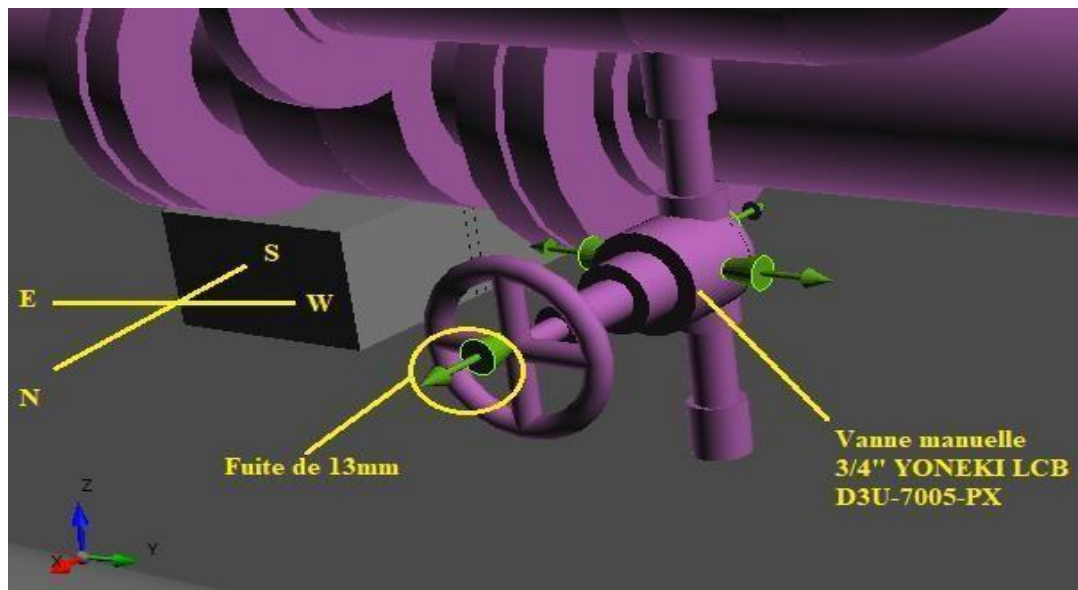


Figure 87 : Représentation 3D de la vanne YONEKI LCB D3U-7005-PX 3/4"

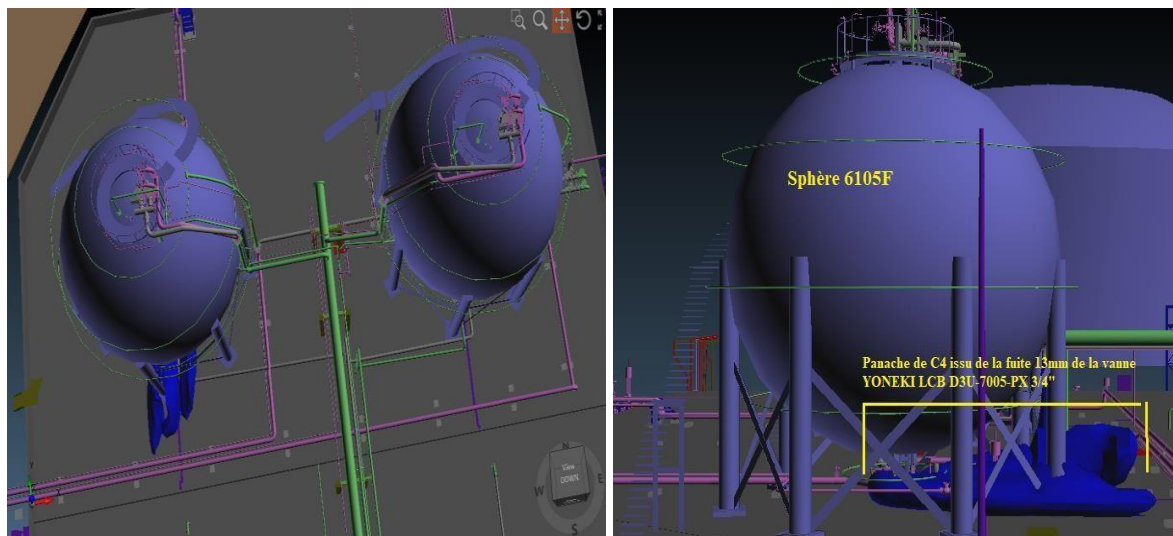


Figure 88 : Modélisation CFD de la fuite de 13mm de la vanne manuelle YONEKI LCB D3U-7005-PX 4'' de la sphère 6105F C4 ambient

**N.B :** Les exemples de modélisation mentionnés ont été élaborés sur la base des conditions suivantes :

- -Vent d'azimut 11° Nord-ouest d'une vitesse de 11 m/s
- -Taux d'humidité de 80,3%
- -Température de 28,1°C
- -Degré de stabilité météorologique diurne 5/D Pasquill
- -Degré de nébulosité nocturne E/F
- -Durée de rejet maximum estimée à 48s

Nous procéderons par la même approche à la modélisation des autres scénarios relatifs aux termes sources mentionnées dans le sous-chapitre précédent.

Ceci dans la finalité d'établir une classification des zones dangereuses (monitored zone) en identifiant chaque aire de détection.

Nous soulignerons aussi que les différentes itérations de la simulation CFD sont réalisées suivants différents paramètres anémométriques basés sur la rose des vents de l'EIE, nous citerons :

- Nord Azimut 95°, vitesse 11 m/s
- Nord-est Azimut 44°, vitesse 14 m/s
- Nord-Ouest Azimut 126°, vitesse 3 m/s
- Ouest Azimut 180°, vitesse 18 m/s
- Est Azimut 3°, vitesse 2.2 m/s
- Sud-Ouest Azimut 234°, vitesse 5.2 m/s

Les conditions atmosphériques prises en compte sont de l'ordre d'une température de 14.7°C et un taux d'humidité de 70.4% pour la simulation de la dispersion en période hivernale et d'une



température de 31.2°C et un taux d'humidité de 80.52% pour la simulation de la dispersion en période estivale.

## CONCLUSION

La simulation du comportement des panaches de gaz inflammable à savoir ceux du GPL, C4, Fuel Gas constituent une donnée essentielle à la définition des zones de détection et des aires à surveiller, en effet elles permettent de prédire les champs de couverture des détecteurs de gaz à implanter pour une future étude d'optimisation via mapping 3D.

Les deux cartographies à comparer ; à savoir celle de la détection et le zonage ATEX concordent et mettent approximativement en évidence le même type de géométrie en définissant un acabit commun de zone en termes de risque (probabilité de présence de gaz inflammable et gravité en cas d'ignition du nuage).

Tout en sachant que le zonage de détection a pour but de fiabiliser l'implantation de détecteurs anti-incendie et permet par une action proactive régie par une philosophie opératoire de détecter l'éventuelle dispersion accidentelle de gaz inflammable que ça soit du GPL, C4 ou GN dans la section de stockage 61.

Le zonage de détection que nous avons établie recouvre une surface équivalente à la zone ATEX 2 relative aux rejets accidentels à surveiller tel qu'illustrée dans les plans officiels du concepteur de l'unité GP2/Z.

## VII-1. INTRODUCTION

Dans la finalité de fiabiliser les systèmes de sécurité axés sur la logique de détection feu et gaz il est nécessaire de vérifier si les objectifs de couverture du détecteur ou les objectifs de disponibilité de sécurité ne sont pas atteints, le cas échéant le concepteur doit modifier la conception initiale du FGS après avoir étudié les cartes de couverture et les calculs de disponibilité de sécurité pour déterminer les points où la conception pourrait être améliorée.

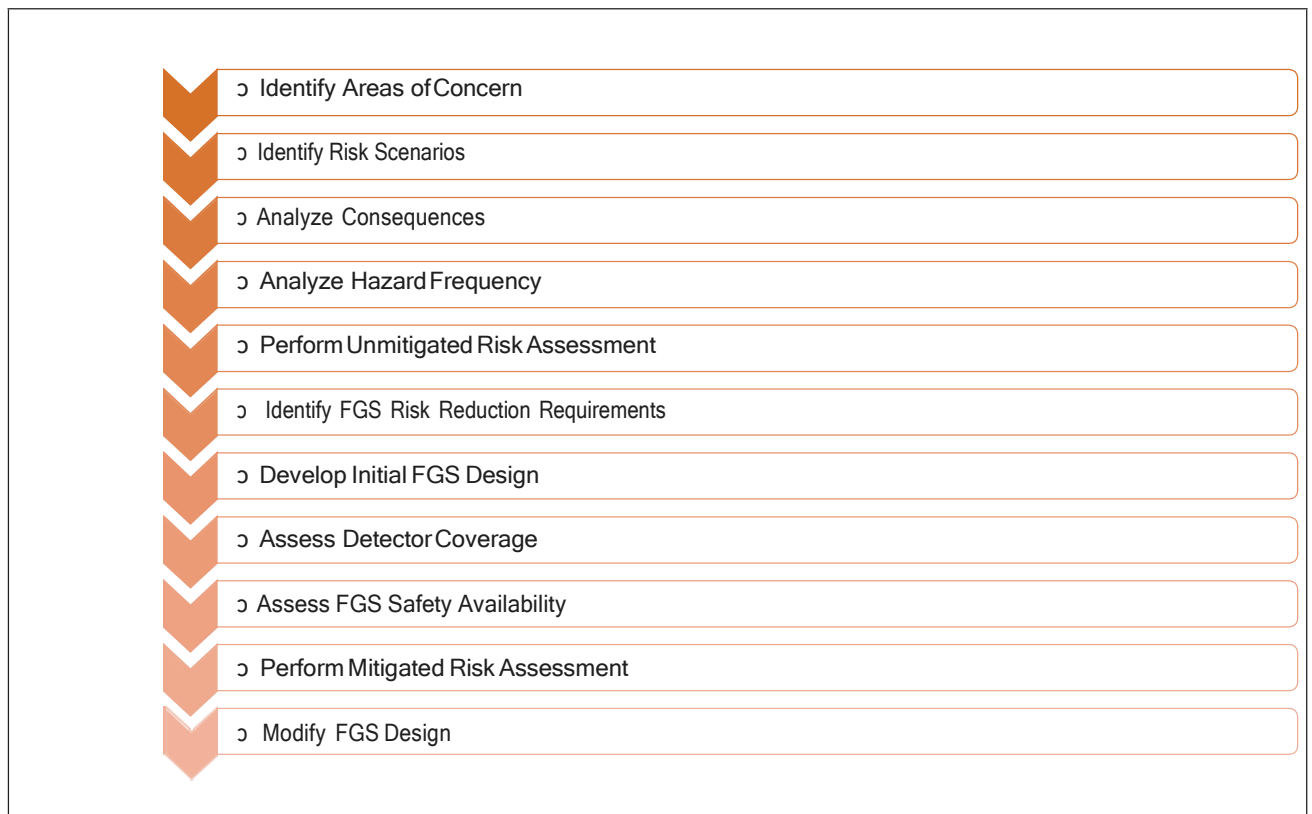
L'emplacement du détecteur est alors modifié ou d'autres attributs sont modifiés, tels que la redondance des composants, les intervalles de test et même le type d'équipement utilisé, dans le but d'améliorer la couverture et la disponibilité.

Les calculs de vérification doivent ensuite être réexécutés et ce processus doit être poursuivi de manière récursive jusqu'à ce que les objectifs de performance soient atteints.

Ce chapitre sera donc dédié à l'atteinte de résultats optimums en termes de performance du système feu et gaz ciblera l'optimisation d'éléments considérés comme le fer de lance de tout système de détection anti-incendie, nous citerons :

- Les facteurs de couverture de détection cités précédemment tel que la gestion des modifications.
- Le nombre et type de détecteurs.
- La philosophie de conception et d'implantation régissant la logique de vote.
- Ainsi que la stratégie de maintenance garantissant une probabilité minimale de défaillance acquise à la sollicitation.

*Tableau 25 : Procédure générale d'optimisation des systèmes F&G par ISA TR84.00.07.*



## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

Nous entamerons naturellement cette entreprise en nous appuyant sur des standards et références normatives, citerons-nous ; le guide de sûreté de fonctionnement « NTEF Safety and Reliability handbook, 7034 Trondheim Norway », le guide de fiabilité des systèmes instrumenté de sécurité SIS « 'FMcK Associates Ltd, Amphill reliability handbook, Bedford Mk45 2QP, England » et le « Kenexis Safety Instrumented Systems Engineering Handbook » guideline pour l'engineering des SIS. [28,45,25,141

### VII-2. OPTIMISATION DE LA COUVERTURE DE DETECTION

Nous soulignerons aussi avoir substitué le détecteur de flamme IR SIEMENS CERBERUS DF1191-Ex par le détecteur de flamme UV-IR HONEYWELL SATRONIC Fire Sentry FSL100 lors de la simulation de la couverture, ceci après que nous ayons jugés qu'il ne répondait pas aux critères de performances tel que mentionné dans le chapitre précédent.

**N.B :** Le choix du constructeur de l'équipement est une donnée prédéfinie fournie par le département technique en vue du projet de retrofitting prévu pour le premier trimestre de l'année 2020.

L'autre modification réside dans le nombre de détecteur augmenté à 5 pour couvrir un maximum de surface dans l'aire à surveiller telle que décrite par l'allure du panache de gaz inflammable décrit par la modélisation CFD de l'étude de dispersion. L'orientation des détecteurs a aussi été modifiée pour obtenir les paramètres suivants ; Azimut de  $-44^\circ$  avec inclinaison de  $112^\circ$  en direction du NordEst.

Ci-dessous quelques caractéristiques techniques du nouveau détecteur choisi :

#### UV, UV/IR, IR3 Flame Detectors

The FSL100 Series of flame detectors from Honeywell delivers robust, fast, and reliable detection of flaming fires in a wide range of applications.

The range consists of UV, UV/IR and IR3 flame detectors. All utilize sophisticated sensing and signal analysis to detect fires quickly while also rejecting false alarms.

The FSL100 may be small and lightweight for easy installation but it is designed to work in tough indoor/outdoor environments, as well as potentially explosive atmospheres.

With a large field of view it can detect a range of different types of fire including hydrocarbon and non-hydrocarbon sources. Available in UV, UV/IR and 3IR we have your application covered.

#### Suitable for Many Applications

- UV, UV/IR and IR3 available
- Hydrocarbon and non-hydrocarbon sources
- Use in potentially explosive atmospheres
- Indoor and outdoor operation
- High visibility red or discrete white models available

#### Great Performance

- Approved to EN54-10 and FM3260 flame detector standards
- Comprehensive automatic self test
- Remote manual self test option

#### Fast & Reliable

- High speed sensors and microprocessor
- Sophisticated analysis algorithms
- Continuous health monitoring
- False alarm rejection

#### Reduced Life Cost

- Long life elements
- Pressure compensation to avoid contamination
- 2 year warranty
- Buy with confidence

#### Ease of Installation and Use

- Relay and mA outputs as standard
- Lightweight GRP housing
- Pre-formed knockouts
- Optional swivel mounting bracket
- Long range test lamp available



Notre choix de ce modèle est justifié par :

-La double détection UV/IR permet de fiabiliser la détection de flamme.

-La haute résistance aux intempéries et rejet des fausses alarmes dues aux rayonnements solaires

-La durabilité des composants électroniques pour un coût minimum de maintenance.

-Une géométrie de l'extrémité du champ de vision en blending offrant un volume de détection plus important peut importer l'inclinaison et l'azimut choisis.

-Temps de réponse extrêmement réduit (estimé à 0.0019s) avec interrogateur d'alarme

intégré pour l'auto-  
vérification de la  
fiabilité de réponse à la  
solllicitation.

**N.B** : La proposition de ce modèle rentre dans le cadre d'un projet d'intégration des spécificitéstechniques y afférentes dans le volet technique du cahier de charge relatif à l'acquisition des organes de détections dans le cadre de la revue de conception au retrofitting du système de détection actuel à entamer prochainement au niveau du complexe GP2/Z.

### **VII-3. OPTIMISATION DE LA COUVERTURE DE DETECTION DE FLAMME**

En vue du projet de retrofitting du système de détection F&G du complexe GP2/Z incluant la section de stockage 61 C4 ambient et GPL tampon prévu pour le premier trimestre de l'année2020.

L'élément principal à prendre en considération est l'optimisation de la couverture des détecteurs sur la base de l'étude de dispersion des gaz combustibles de la section de stockage 61 à savoir lebutane, le GPL et le fuel gas, ceci en agissant sur les paramètres du type, du nombre et de l'implantation géographique des détecteurs dans la zone de détection allouée à une aire à surveiller. [141]

La présente optimisation s'est faite via le software INSIGHT DETECT3D v1.27 pour générer lanouvelle cartographie de détection. Nous avons scindé l'étude en deux parties :

- L'optimisation de la détection de flamme pour les deux zones de détection allouées aux aires à surveiller ;
- L'optimisation du coverage de détection de flamme de l'aire de monitoring C4 ambient par lemodèle DETECT3D v2.27 génère la cartographie suivante ;

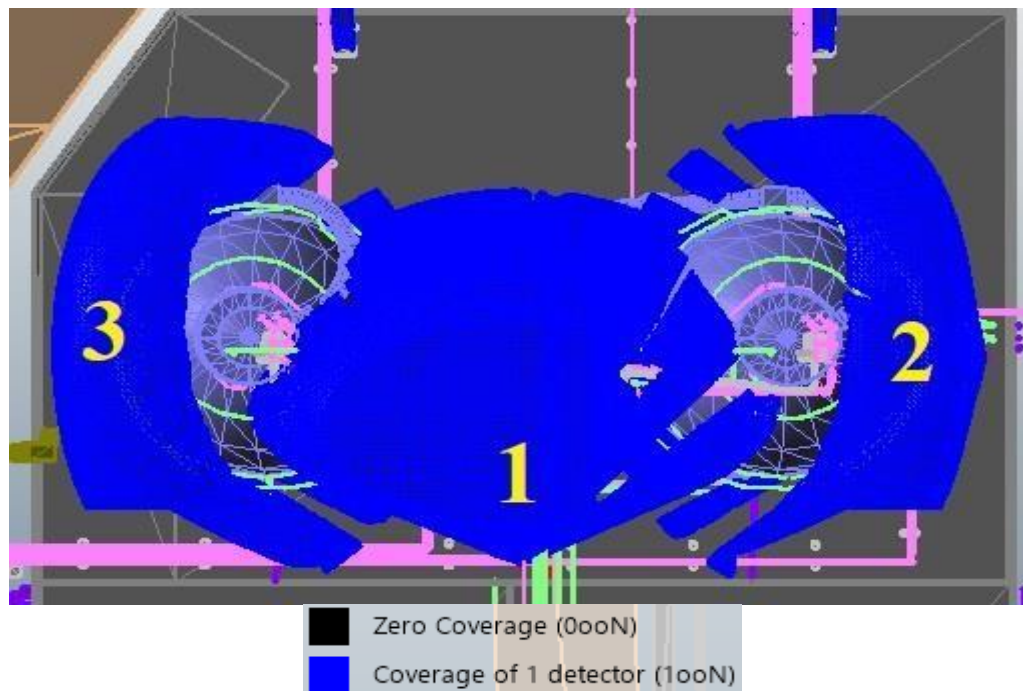


Figure 89 : Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection actualisée de la zone de monitoring C4 ambient

En adéquation avec le zonage de détection C4 ambient et de l'étude de dispersion du n-butane des deux sphères 420/6105 E/F établis dans les chapitres précédents, nous avons tenté d'optimiser la couverture de détection apportant des modifications au design du système F&Gactuel avec une revue de la logique de vote et de la philosophie opératoire. La cartographie bidimensionnelle ci-dessus est complétée par une modélisation en trois dimensions afin de démontrer le volume couvert par les organes de détection.

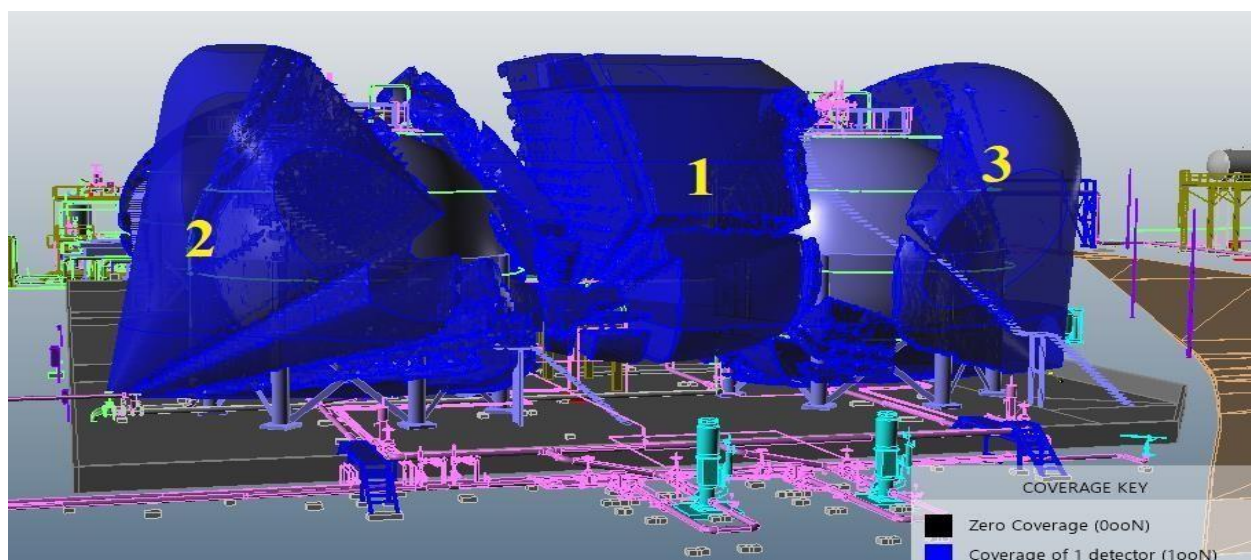


Figure 90 : Représentation tridimensionnelle de la couverture de détection actualisée de la zone de monitoring C4 ambient

Les modifications apportées au design dans le cadre de l'optimisation du coverage sont les suivantes :

- Substitution du détecteur SIEMENS CERBERUS par HONEYWELL FIRESENTRY.

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

- Changement de l'azimut transversal du détecteur 1 de 90° vers 78°
- Variation de l'inclinaison longitudinale du détecteur 1 de 0° vers -44°
- Modification de la portée du détecteur de flamme de 39m vers 46m avec modification de la géométrie de l'extrémité du champ de vision du bézier au blending.
- Ajout de deux détecteurs de flammes sur les flancs des sphères E/F suivant les coordonnées (798,495) pour le détecteur 2 et (753,412) pour le détecteur 3 et une élévation de 0,4m.

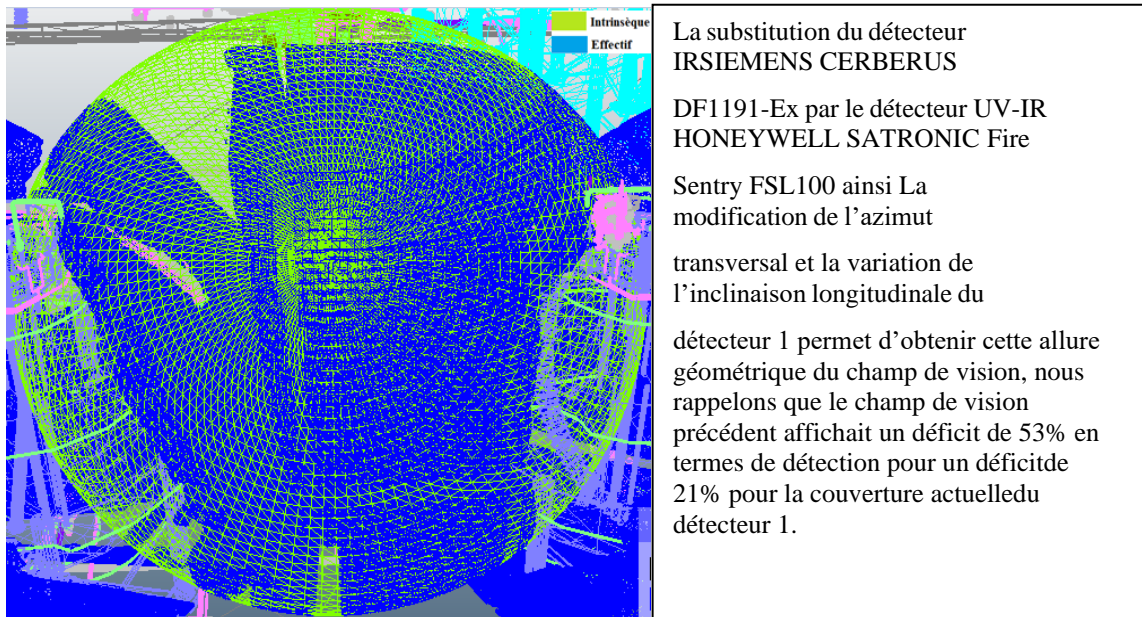


Figure 91 : Allure comparative actualisée du champ de vision effectif et intrinsèque du détecteur de flamme 1

L'optimisation du coverage de détection de l'aire de monitoring GPL tampon génère la cartographie suivante :

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

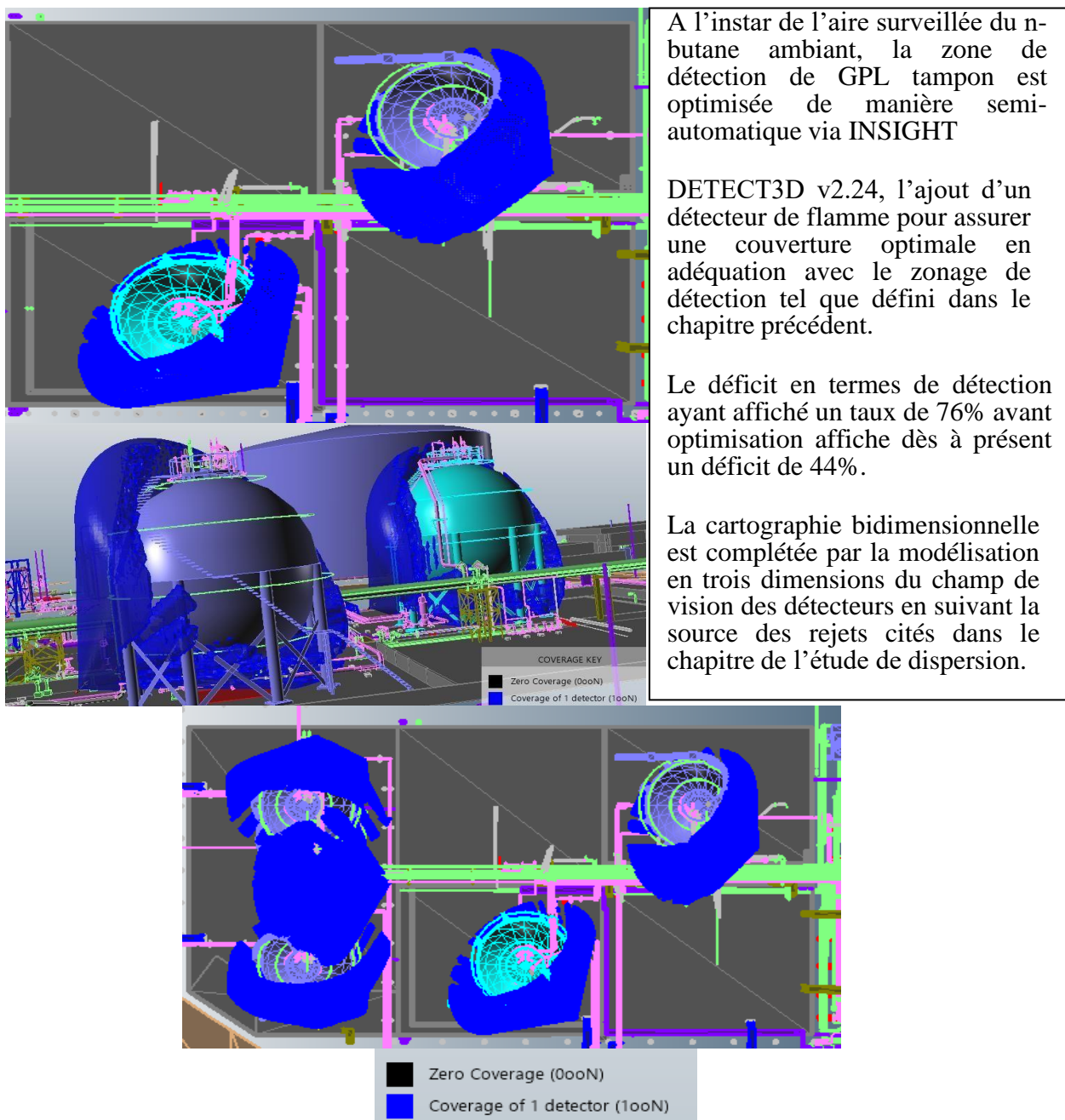


Figure 92 : Optimisation de la couverture de détection de flamme de la section de stockage 61

**N.B :** Pour des raisons techniques propres au logiciel de simulation DETECT3D v1.27, nous avons dû procéder par tâtonnement via une approche semi-automatique pour optimiser la couverture des détecteurs, la cartographie précédente a été donc générée manuellement en faisant en sorte de réduire au maximum la surface du « Zero Coverage » définissant une logique de vote de 0ooN. En effet nous avons jugés que les résultats fournis de manière automatique comme incohérents vis-à-vis de l'étude de dispersion déjà entamée et de la surface spécifique de détection. Nous citerons comme exemple la recommandation de 7 détecteurs de flamme pour une surface de 110m<sup>2</sup> inadéquate avec la norme ISATR 84.00.07. [113]

#### VII-4. OPTIMISATION DE LA COUVERTURE DE DETECTION DE GAZ

A l'instar de l'optimisation précédente inhérente à la détection de feu, cette présente sera scindée en deux parties traitant les deux zones de détection.

La couverture de détection de gaz optimisée relative à la zone de stockage n-butane ambiant est illustrée dans la cartographie ci-dessous :

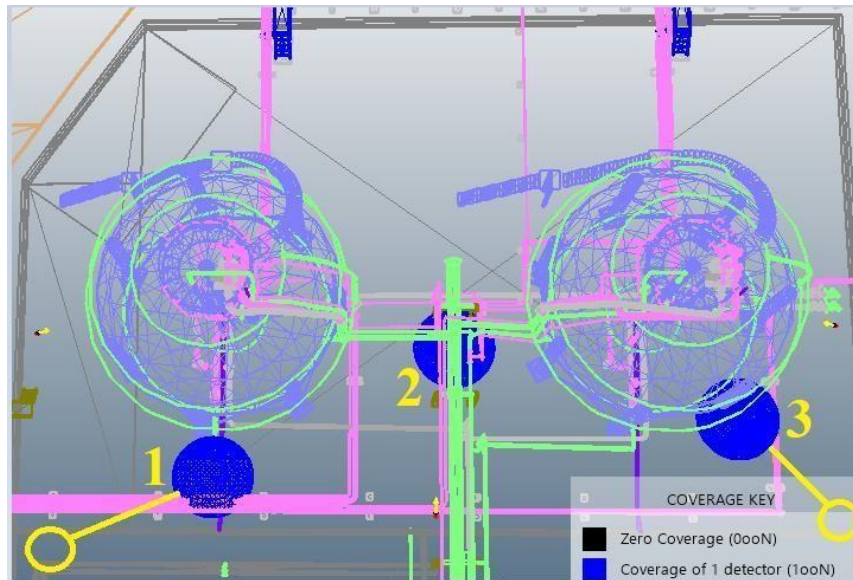


Figure 93 : Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection de gaz actualisée de la zone de monitoring C4 ambiant

Les modifications apportées à la zone de détection consistent en la relocalisation des détecteurs 1 et 3 des coordonnées (652,495) et (578,421) respectivement vers les nouvelles coordonnées (788,458) et (732,409) et une modification de l'élévation pour 0.35m par rapport au niveau du sol, et ajout d'un troisième de détecteur 2 sur les coordonnées (577,389) tel que démontré dans la figure. L'assignation de nouveaux points de consigne des alarmes de détection constitue par son importance dans le protocole d'amélioration des performances F&G édicté par le rapport technique ISA TR84.00.07 l'élément principal de la modification du design et de la philosophie opératoire dans le contexte de cette optimisation. Les points de consigne actualisés des détecteurs sont définis comme suit :

- |  |  |
|--|--|
| • <b>Détecteur 1</b> : High alarm : 55% LIE<br>Low alarm : 25% LIE | • <b>Détecteur 2</b> : High alarm : 50% LIE<br>Low alarm : 25% LIE |
| • Actualisé à : High alarm : 40% LIE<br>Low alarm : 20% LIE        | • Actualisé à : High alarm : 40% LIE<br>Low alarm : 20% LIE        |
| • <b>Détecteur 3</b> : High alarm : 40% LIE<br>Low alarm : 20% LIE |  |

**N.B** : Le choix des points de consigne s'est fait en se basant sur l'étude CFD de la dispersion et des données anémométriques inhérentes à l'aire de monitoring (rose des vents) permettant de mettre en évidence l'allure du panache, sa portée, ses dimensions et son comportement dans la zone de monitoring fire and gas dans la finalité de localiser les détecteurs de gaz en conséquence.



## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

La couverture de détection de gaz optimisée relative à la zone de stockage GPL tampon est illustrée dans la cartographie ci-dessous :

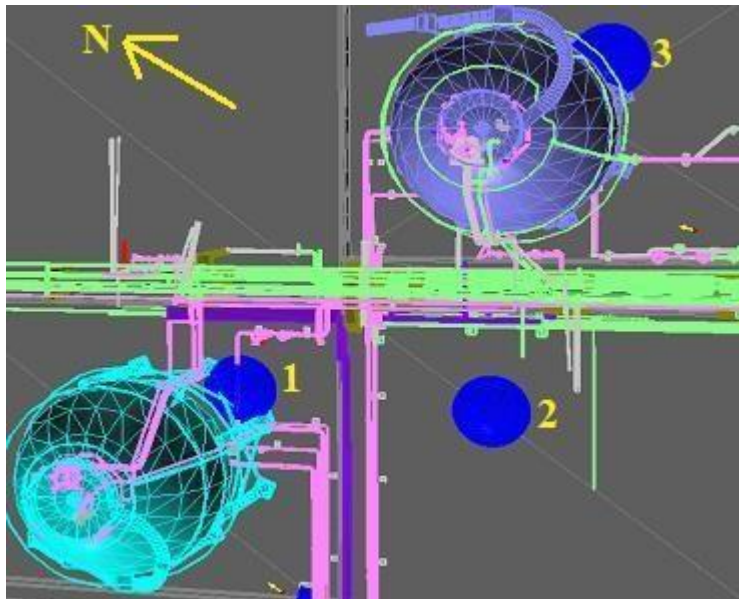


Figure 94. Cartographie bidimensionnelle de la couverture de détection de gaz actualisée de la zone de monitoring GPL tampon

Les modifications apportées à la zone de détection consistent en la relocalisation du détecteur 2 des coordonnées (652,495) vers les nouvelles coordonnées (906,352) et une modification de l'élévation pour 0.40m par rapport au niveau du sol, et ajout de deux détecteurs 1 et 3 dont les coordonnées sont (922,247) et (847,370) tel que démontré dans la figure.

L'assignation de nouveaux points de consigne des alarmes de détection constitue par son importance dans le protocole d'amélioration des performances F&G édicté par le rapport technique ISA TR84.00.07 l'élément principal de la modification du design et de la philosophie opératoire dans le contexte de cette optimisation. Les points de consigne actualisés des détecteurs sont définis comme suit :

- |  |  |
|--|--|
| • <b>Détecteur 1</b> : High alarm : 55% LIE<br>Low alarm : 25% LIE | • <b>Détecteur 2</b> : High alarm : 70% LIE<br>Low alarm : 50% LIE |
| • Actualisé à : High alarm : 40% LIE<br>Low alarm : 20% LIE        | • Actualisé à : High alarm : 60% LIE<br>Low alarm : 45% LIE        |
| • <b>Détecteur 3</b> : High alarm : 40% LIE<br>Low alarm : 20% LIE |  |

**N.B** : Les points de consigne d'alarmes du détecteur 2 sont désignées pour faire en sorte de couvrir la zone coïncidente de détection suivant la dynamique computationnelle des fluides des deux panaches issues des sphères 420/6105G et 420/6105A.

Nous rappellerons de même que le modèle de l'organe de détection n'a pas été modifié sachant que ce dernier dispose des caractéristiques techniques adéquates avec les critères de performance F&G cités dans la norme APSAD R7 dont s'inspire la philosophie opératoire de la détection de gaz du complexe GP2/Z.

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

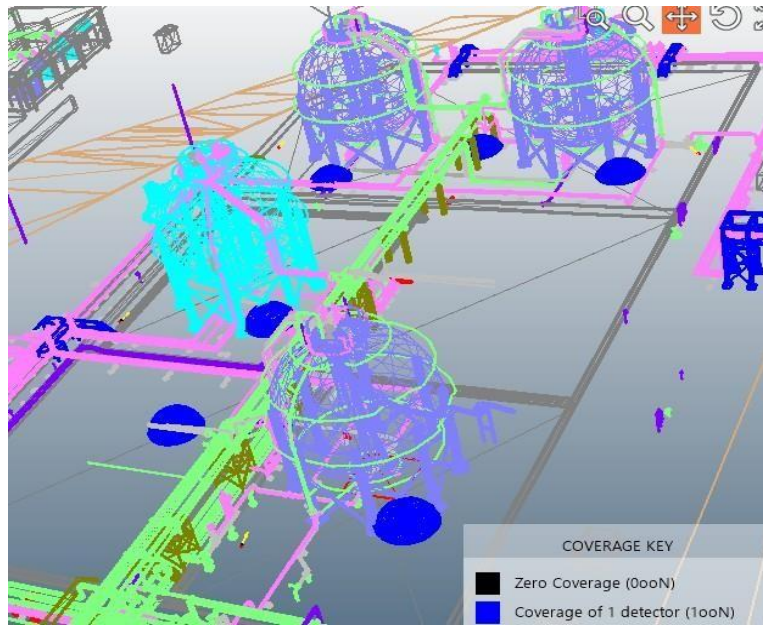


Figure 95. Représentation isométrique de l'implantation générale optimisée des détecteurs de gaz de la section de stockage 61

La compilation des différentes données issues de la simulation semi-automatique par tâtonnement de l'implantation des détecteurs de flamme de type UV-IR HONEYWELL SATRONIC Fire Sentry FSL100 et des détecteurs de gaz de type OPTIMA+ SEARCHPOINT nous a permis de générer cette cartographie générique optimisée de la couverture de détection affichant de manière exhaustive après les calculs effectués par la logique de traitement du software INSIGHT DETECT3D v2.27 les résultats suivants :

| Flame Detector Coverage <span>Show Descriptions</span> |             |                   |                   |                   |
|--|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Fire Zone  | Zero (0o0N) | 1 or more (≥1o0N) | 2 or more (≥2o0N) | 3 or more (≥3o0N) |
| Zone 01  | 81.7 %      | 18.3 %            | 0 %               | 0 %               |
| Zone 03  | 73.9 %      | 26.1 %            | 0 %               | 0 %               |
| Zone 04  | 76.1 %      | 23.9 %            | 0 %               | 0 %               |
| Zone 05  | 62.9 %      | 37.1 %            | 0 %               | 0 %               |
| Zone 06  | 86.6 %      | 13.4 %            | 0 %               | 0 %               |
| Zone 07  | 93 %        | 7 %               | 0 %               | 0 %               |

| Gas Detector Coverage <span>Show Descriptions</span> |             |                   |                   |                   |
|--|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Gas Zone   | Zero (0o0N) | 1 or more (≥1o0N) | 2 or more (≥2o0N) | 3 or more (≥3o0N) |
| Zone 01  | 99.1 %      | 0.9 %             | 0 %               | 0 %               |
| Zone 03  | 100 %       | 0 %               | 0 %               | 0 %               |
| Zone 04  | 100 %       | 0 %               | 0 %               | 0 %               |
| Zone 05  | 99.8 %      | 0.2 %             | 0 %               | 0 %               |
| Zone 06  | 99.8 %      | 0.2 %             | 0 %               | 0 %               |
| Zone 07  | 99.7 %      | 0.3 %             | 0 %               | 0 %               |

Les résultats de la simulation démontrent par conséquent un gain de 28.74% en termes de performances associées à la couverture de détection dans les aires de monitoring caractérisées par une logique de vote de détection de 1o0N ou plus.

## **VII-5. OPTIMISATION DE LA FIABILITE ET SURETE DE FONCTIONNEMENT DES DETECTEURS**

Les détecteurs de système de sécurité doivent être testés périodiquement pour vérifier qu'ils répondent positivement lors de la sollicitation. Un modèle détaillé de quantification de la fiabilité est ici donné pour les détecteurs d'incendie et de gaz.

L'objectif principal du modèle est de fournir un outil de quantification réaliste de la sécurité d'un détecteur, en utilisant des combinaisons d'essais périodiques (manuels et automatiques).

Le modèle peut être combiné avec un modèle de coût du cycle de vie (LCC) pour identifier une combinaison de détecteur de conception et de test pour l'optimisation de la sécurité et coûts d'acquisition / de maintenance.

La modélisation de la fiabilité est basée sur une analyse détaillée par classification des défaillances (semblable au FMECA ou AMDE) et compte pour tous les types de défaillances critiques pour la sécurité observé en fonctionnement.

Ainsi, les défaillances causées par des erreurs de conception (et déclenchés ultérieurement par des entrées spécifiques intempestives) sont gérés par le modèle que nous proposerons.

Aussi, des échecs introduits lors des tests sont modélisés. La modélisation comprend une approche permettant d'évaluer la couverture totale de toute combinaison de tests. un exemple quantitatif démontrant un schéma de test sera également présenté.

**N.B** : Cette optimisation est réalisée en se basant sur des bons pratiques édictés par le handbook « NTEF Safety and Reliability handbook, 7034 Trondheim Norway ».

Nous commencerons d'en premier lieu par l'identification des modes de défaillance communs relatifs aux détecteurs F&G, ci-dessous quelques catégories caractérisées par les probabilités d'occurrence les plus importantes d'après « Aven, T., Reliability and Risk Analysis. Elsevier Applied Science » et les recommandations du service instrumentation affilié au département maintenance :

### **VII-5-1. DEFAILLANCES STOCHASTIQUES**

Des défaillances de type aléatoire ayant lieu arbitrairement dans le temps, ce genre de défaillance est modélisé pour être caractérisé par un taux de constant, exemple : le modèle de Weibull pour

les modes d'endommagement mécaniques et le modèle exponentiel. Cette catégorie inclus les défaillances dues à la vétusté du matériel, aux endommagements dus au stress et à la fatigue du matériau et des défaillances liées aux interventions fallacieuses de maintenance.

**N.B** : les défaillances dues à la vétusté et au vieillissement naturel de l'équipement sont relatifs aux éléments appelés « inputs » tel que la chambre d'étalonnage, le carter de gazage, le boîtier de flux, la cellule de gazage à distance, les points de gazage ; intrinsèques à l'enveloppe design du détecteur de gaz Optima+ Searchpoint par exemple.

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

Si les facteurs de stress et de fatigue du matériau ne sont pas attribués à une rupture accidentelle de l'équipement, ces derniers sont considérés comme des catalyseurs et des éléments renforçateurs du vieillissement aboutissant à une vétusté puis de manière susceptible à une panne.

### VII-5-2. DEFAILLANCES GENEREES LORS DES TESTS

Cette taxinomie de défaillances est identifiable uniquement lors des essais ou tests des détecteurs (Ex : étalonnage). Ces tests sont menés à un intervalle spécifique à chaque type de détecteur en s'appuyant sur son caractère stratégique ainsi que sa vétusté, ceci dans la finalité d'assurer la sûreté de fonctionnement et la fiabilité de la détection.

Oublier de remettre en marche la fonction d'inhibition après un test quelconque constitue l'une des erreurs les plus typiques menant à ce type de défaillance.

Un mauvais calibrage du détecteur de gaz menant à son inefficacité constitue de même un des facteurs les plus prédominants régissant les défaillances générées par test, par un test à caractère manuel un opérateur peut de manière aisée introduire ce qu'on appelle communément une défaillance FTO (Fail to Operate, échec d'opérabilité) du système.

**Exemple :** Le défaut d'étalonnage de la plage de limite inférieure d'explosivité LIE à détecter par le Search-point Optima+ LEL1403 de l'aire à surveiller C4 ambiant peut mener à une détection tardive de l'événement dangereux, inadéquate à l'entreprise des mesures d'atténuation appropriées.

Cependant la probabilité que ces défaillances soient détectées par un système automatisé régie par des API et des interlocks d'instrumentation, nous citerons l'exemple de l'interlock SYGMASYS SIEMENS CERBERUS régissant les défaillances de calibrage ainsi que les défaillances du signal électrique du détecteur infrarouge de flamme DF1191-Ex implanté dans la section de stockage 61.

L'autre cas de figure est que la défaillance générée initialement lors d'un test soit détecté et pallié manuellement par un opérateur par un autre test successif.

### VII-5-3. DEFAILLANCES A CARACTERE INDEPENDANT

Ce type de défaillance est le plus courant, et constitue le point névralgique de l'échec d'un monitoring de sécurité dans un site industriel, cet acabit se produit quand un détecteur se trouve dans l'incapacité :

De répondre à un événement dangereux mettant en cause des rejets gazeux, ou un début d'incendie ceci pour des raisons de lacunes dans la philosophie de conception du système F&G induisant ; un choix fallacieux du type de détecteur à planter, une implantation géographique erronée induisant une perte de précision et un abaissement drastique de la sensibilité des détecteurs et du temps de réponse tel que prescrit par les critères normatifs cités précédemment.

**Exemple :** un défaut d'implantation géographique du détecteur de gaz Optima+ Search-point LEL1405 dans la zone de détection C4 ambiant par négligence du facteur de dispersion atmosphérique d'un potentiel panache de butane peut potentiellement mener à une passivité de la détection, cette passivité est due à la déviation du panache de l'aire surveillée par le détecteur par les vents dominants.

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

Les erreurs logicielles sont aussi incluses dans cette catégorie de défaillance à l'instar des bogues du software SIEMENS CERBERUS par expiration de session (nécessité de mise-à-niveau) menant à une passivité des alarmes vis-à-vis des détections de flammes du détecteur DF1191-Ex.

**N.B :** Ce type de défaillance est causé par des erreurs de conception et peuvent être générées dès le premier jour de fonctionnement du système de détection.

Notez bien que cet acabit ne peut en aucun cas être détecté par un quelconque test des suites de tests initiaux d'approbation du design lors de la phase de commissioning.

C'est pour cette raison qu'on dénote ces défaillances comme indépendantes et par subsiste une grande probabilité que le système soit défaillant à la sollicitation pour un motif de défaut de conception.

**Ex :** Défaut de transmission du signal électrique émis par le détecteur de flamme infrarouge SIEMENS CERBERUS DF1191-Ex de la zone de détection C4 ambiant à l'interface SYGMASYS pour activation de l'alarme visuelle sur moniteur DCS du poste de veille du complexe GP2/Z.

Ci-dessous un tableau résumant les défaillances menant à un échec d'opérabilité (FTO) des détecteurs F&G :

| Catégorie de la défaillance  | Mécanisme de défaillance   | Défaillance physique   | Défaillance fonctionnelle   |
|------------------------------|--|--|---|
| Défaillance stochastique     | Se produisant de manière aléatoire.  | Défaillance de la chambre de gazage ou des composants électroniques, échec de la transmission du signal vers le système central, obstruction accidentelle du champ de vision par un opérateur. | Détecteur inhibé après des travaux de maintenance incluant les différents types de tests en particulier les tests fonctionnels. Détecteur obstrué, masqué, occulté par des travaux de peinture, de sablage ou par implantation d'équipement au voisinage. |
| Défaillance générée par test | Se produisant lors des tests fonctionnels tels que l'omission des mécanismes d'inhibition des organes de détection, l'endommagement des organes de transmission, la modification et la rupture des mécanismes relatifs à l'étalonnage. | Comme cité ci-dessus   | Détecteur inhibé. Défaut d'assignation du point de consigne du détecteur. Défaut de localisation géographique des détecteurs.   |

## Chapitre VII : Optimisation des performances de la détection F&G de la section de stockage 61

|                          |   |     |  |
|--------------------------|---|-----|--|
| Défaillance indépendante | Générées par des erreurs de conceptions (amorçés par des facteurs spécifiques tels que, l'implantation, ou la définition du point de consigne). | N/A | Défaut de logique de vote et sélectivité du détecteur.<br>Erreurs logicielles. |
|--------------------------|---|-----|--|

Après identification des défaillances nous proposerons des recommandations visant à les pallier et ce en s'appuyant sur les normes API581 et API580 relative à l'inspection basée sur la criticité RBI (Risk Based Inspection) :

### VII-5.4. INSPECTION

L'examen visuel des détecteurs permet de vérifier que l'entourage des détecteurs est adéquat avec le champ de vision effectif alloué à l'équipement tel que décrit dans la phase de conception. Ceci inclus tous types de checks par exemple vérifier si le détecteur est occulté par une quelconque manière (peinture, bâche) ou si le champ de vision est obstrué. Le check peut être réalisé et considéré comme une partie intégrante du test fonctionnel, ceci correspond à une inspection périodique tel que défini dans l'OREDA (Onshore Reliability Data) données de fiabilité de l'industrie onshore, nous avons considéré les données fournies par l'OREDA vul'absence de field data ou fichiers historiques relatifs aux instruments de mesure [113, 140].

En particulier lors des travaux, des équipements, ou rebuts peuvent être l'objet de la réduction de l'efficacité de la détection par l'obstruction du champ de vision des détecteurs ou par inhibition par une quelconque substance tel que les solvants et peintures.

### VII-5-5. TEST FONCTIONNEL

Considéré comme le palliatif standard édicté par la stratégie de maintenance RBI, le test manuel de la disponibilité des fonctions instrumentées de sécurité (FIS) en utilisant des gaz de test et des simulations d'étincelles dans les aires à surveiller des détecteurs, ce type de test est réalisé dans un intervalle allant de trois à six mois selon l'API581, le terme « test périodique » est utilisé pour désigner ce type de test. [113, 140].

### VII-5-6. AUTO-VERIFICATION

Un test intégré au système via l'installation d'une mise-à-jour (Built 25478X) du software de commande SYGMASYS STEP7 jumelé à l'interlock de contrôle SIEMENS CERBERUS des détecteurs de flamme infrarouge DF1191-Ex, simulant à la demande une situation où le signal produit par la détection atteint le seuil prescrit pour une alarme, ce test inclus entre autres la simulation du transfert du signal électrique.

La fréquence de l'auto-vérification peut être programmée selon la criticité des scénarios envisagés et de l'importance de l'équipement dans la zone de détection. Cependant le détecteur se retrouve inhibé pendant toute la durée nécessaire au test ; cette durée est estimée à plusieurs secondes voire une minute.

**VII-5-7. AUTO-VERIFICATION DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES**

Le test présent est à réaliser de manière continue ou à des intervalles très courts. Ce check en question ne détecte que les défaillances liées aux composants électroniques, à l’instar de l’auto-vérification ce test est automatique, notez bien que la période de ce test en secondes doit être approximative à 0, le mécanisme se fait par l’ajout de capteurs de température et de résistimètres au circuit intégré du détecteur, ceci en adéquation avec les modes de défaillance spécifiques aux composants électroniques tel que mentionnés par l’API581.

Les capteurs sont ajoutés au carter de gazage et au boîtier de flux dans le cas du détecteur ponctuel de gaz infrarouge HONEYWELL Optima+ Search-point.

Une hausse de la température et de la résistance électrique peut être une prémices à l’endommagement des composants électroniques du détecteur à savoir la puce électronique responsable de la liaison du détecteur SIEMENS CERBERUS DF1191-Ex avec l’interlock de contrôle SYGMASYS SIEMENS.

Quelques tests tels que cités ne sont efficaces pour déceler une certaine catégorie de défaillances seulement, donc le plus judicieux serait de combiner les différentes stratégies pour un rendement optimal en termes de réduction de la probabilité de défaillance acquise à la sollicitation ; exemple la combinaison de l’auto-vérification avec le check visuel considérés comme complémentaires.

**N.B** : La définition d’une philosophie de maintenance n’est régie par aucun standard ou norme, ce qui confère à l’exploitant la liberté totale de composer un schéma de maintenance et de monitoring axé sur les taux de défaillances des équipements fournies par les fichiers historiques des détecteurs et des données usines du constructeur du pays d’origine.

Dans le cas de figure des détecteurs HONEYWELL Optima+ Searchpoint et SIEMENS CERBERUS DF1191-Ex, le complexe GP2/Z l’absence de fichiers historique de maintenance du service instrumentation nous oblige à se référer aux données fournies par les constructeurs pour l’élaboration du schéma d’inspection pour en collaboration avec le service d’instrumentation. Ci-

|   |                             | <b>TAUX D’EFFICACITE DU TEST</b> |                             |                        |                    |
|---|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Type de défaillance stochastique</b> | <b>Taux de défaillance</b>  | <b>I- Inspection visuelle</b>    | <b>II- Test fonctionnel</b> | <b>III- Auto-check</b> | <b>I &amp; III</b> |
| <b>Défaillance électronique</b>         | <b>3. 10<sup>E</sup> -6</b> | <b>0%</b>                        | <b>95%</b>                  | <b>98%</b>             | <b>99%</b>         |
| <b>Défaillance de transmission</b>      | <b>5. 10<sup>E</sup> -5</b> | <b>0%</b>                        | <b>98%</b>                  | <b>98%</b>             | <b>98%</b>         |
| <b>Défaillance de couverture</b>        | <b>2. 10<sup>E</sup> -3</b> | <b>90%</b>                       | <b>95%</b>                  | <b>0%</b>              | <b>95%</b>         |
| <b>Défaillance de connexion</b>         | <b>5. 10<sup>E</sup> -3</b> | <b>95%</b>                       | <b>85%</b>                  | <b>0%</b>              | <b>95%</b>         |
| <b>Inhibition</b>                       | <b>2. 10<sup>E</sup> -6</b> | <b>0%</b>                        | <b>98%</b>                  | <b>99%</b>             | <b>99%</b>         |
| <b>Blocage du champ</b>                 | <b>10<sup>E</sup> -2</b>    | <b>80%</b>                       | <b>50%</b>                  | <b>0%</b>              | <b>80%</b>         |

dessous le schéma de test de défaillances stochastiques des deux types de détecteurs F&G :

## **CONCLUSION**

Du fait que la catégorie des défaillances indépendantes liées à la phase de conception du système de détection F&G ne peut être détectée par un quelconque type de test, seules les défaillances stochastiques à caractère aléatoires sont traitées dans le schéma proposé précédemment.

Les taux d'efficacité associant chaque test à une catégorie de défaillance sont inspirés du

« NTEF Safety and Reliability handbook, 7034 Trondheim Norway v2016 » et approuvés par le service instrumentation affilié au département de maintenance et du service inspection affilié au département technique du complexe GP2/Z. [141].



### CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de nous rapprocher du milieu de travail et de l'entreprise, et de voir d'un point de vue pratique la réalité sur le terrain et de mettre en œuvre ce que nous avons appris au cours de notre formation au sein de l'université, elle nous a aussi permis d'apporter notre savoir pour une meilleure maîtrise des risques liés aux différentes activités existantes dans cette entreprise.

Nous avons étudié dans ce travail les risques qui peuvent être présents dans les industries de liquéfaction du gaz naturel, chaque zone dans ces industries (zone de traitement) est considérée comme une des zones à hauts risques qui contient plusieurs risques et occupe une place primordiale dans l'industrie.

Dans ce travail, nous avons procédé à une analyse par la méthode NÉUD PAPIILLON qui nous a permis d'avoir une vue plus détaillée en identifiant les causes principales des fuites dont ces dernières sont dues à des défauts de l'instrumentation / vannes, ou à des erreurs d'opération qui nous ont conduit à une vue globale sur les risques susceptibles de parvenir au niveau de la section de décarbonatation.

Le présent travail élaboré lors de notre stage de mise en situation professionnelle nous a permis de comprendre en détail le fonctionnement du système de détection F&G implanté dans la section de stockage 61 de manière spécifique ainsi que sa philosophie, après que nous ayons mené une étude incluant un diagnostic des performances sur la base de plusieurs références normatives, standards internationaux et bonnes pratiques, ce qui nous a permis d'émettre des recommandations de divers aspects nous citerons :

- La revue de l'approche de l'analyse des risques en substituant l'approche qualitative par l'approche semi-quantitative ou quantitative de type QRA (Quantitative Risk Assessment), incluant tel qu'entamé dans ce travail, un calcul des fréquences de fuite.
- La prise en compte de l'étude de dispersion au lieu du zonage ATEX dans le choix de l'implantation des détecteurs F&G en avantageant une modélisation par modèle Gaussien complété par une simulation par modèle Lagrangien ou Intégral (CFD).
- La nécessité d'établir en détails une cartographie tridimensionnelle des aires à surveiller ou monitored zone sur la base de divers critères avant de compiler les résultats pour générer une cartographie générique et commune.
- La nécessité d'élaborer le mapping 3D de la détection considéré comme un outil d'aide à la décision afin de mettre en évidence les déficits de couverture et faciliter l'optimisation et la modification de l'implantation.
- La nécessité d'évaluer les risques après chaque changement ciblant l'équipement et de prévoir une procédure de gestion des modifications regroupant entre autres la revue et la réactualisation du système de détection F&G en conséquence.
- La nécessité de veiller à la maintenance préventive des organes de détection en adoptant une approche d'inspection basée sur le risque visant à diminuer à un degré optimum les probabilités de défaillance à la sollicitation (PFD) du système en augmentant le facteur de réduction des risques (RRF).

Avec prise en connaissance des écarts d'ordre technique et managérial du F&G simplifié et de sa philosophie de conception et d'opérabilité par la prise en charge des problèmes posés au niveau du complexe GP2/Z.

Force-nous a été de constater de nombreux écarts dont le travail présent a pour but de proposer des palliatifs.

## **Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE**

Cette étude pourrait être une contribution dans le projet de revamping ciblant le système de détection pour le premier trimestre de l'année 2020, et est susceptible d'apporter une valeur ajoutée à la phase d'élaboration du volet technique et notamment de l'aspect HSE du futur cahier de charge fixant les exigences d'implantation, de type, de nombre et de logique d'opérabilité du F&Gs.

### **Perspectives et prévoyance**

Nous soulignerons que le présent travail pourrait bénéficier d'une complétion en incluant les perspectives et améliorations que nous envisageons dans ce contexte à savoir :

- Une évaluation des risques approfondie avec définition des scénarios dangereux (par Bow-Tie) dans le but de définir la PFD et le RRF intrinsèques aux détecteurs (considérés comme barrière de protection ou EIPS, cette donnée pourrait être incluse dans le volet technique du cahier de charge pour l'acquisition de l'équipement.
- Renforcer l'étude de dispersion des fluides inflammables en incluant une étude des turbulences générées par les « Congestionned areas » ou aires encombrées dans les zones de convergence, ceci dans le but de fiabiliser la simulation et de prédire le comportement d'un éventuel panache de gaz.
- Elaborer une matrice de cause à effet régissant la philosophie opératoire du système de détection dans la section 61 et de l'unité GP2/Z de manière générale, matrice ayant pour rôle de définir les actions ou fonction instrumentées de sécurité à prendre en compte en adéquation avec une logique de vote des détecteurs.
- Evaluer le niveau de SIL adéquat avec l'installation et les aires à surveiller en menant une analyse des risques basée sur les barrières de protection (Layer Of Protection Analysis) dans le but d'inclure cette donnée dans le volet technique du cahier de charge afférent au projet.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Manuel opératoire du complexe GP2/Z– département technique.
- [2] Complexe GP2/Z– rapport de stage "departement DRH" . 2021
- [3] MEGHERBI Walid. Rapport de fin de formation. « Maitrise des risques par l’approche MBR (application à la section BOG) ». 2016.
- [4] S. CHRAH, « Soft de formation process », 2007, Complexe GP2Z, SONATRACH.
- [5] Manuel « Instruction d’installation de fonctionnement et de maintenance », 2003, ABB S.P.A. - Révision2.
- [6] Manuel opératoire du complexe GP1Z– département sécurité.
- [7] Guide d’évaluation des risques professionnels dans le BTP, ce document est inspiré d’une réalisation de la CGSS de la réunion réalisée en collaboration avec la DDTEFP, la FRBTP, la CAPEB, ...
- [8] Guide d’évaluation des risques - INRS, ED 840, 2000.
- [9] Analyse des risques générés par l’industrie, B. DEBRAY, S. CHAUMETTE, S. DESCOURIERE, V. TROMMETER, 13 Octobre 2006.
- [10] Guide d’élaboration pour les établissements scolaires (2<sup>ème</sup> degré public) et les établissements administratifs, évaluation des risques professionnels et transcription des résultats sur le document unique, Septembre 2004.
- [11] Guide d’évaluation des risques, Caisse Régionale d'Assurance Maladie des Pays de la Loire et les Services de Santé au Travail du Maine-et-Loire, Septembre 2002.
- [12] Autodiagnostic toutes activités, Texte adopté par le Comité Technique Régional n° 1 lors de sa séance du 15 février 1994, révisé le 10 mars 2000 suite au rapport d’étude de l’INRS.
- [13] Manuel opératoire du complexe GP1Z– département technique.
- [14] Evaluation des risques professionnels - Questions-réponses sur le document unique- INRS, ED 887, 2004, réimpression janvier 2010.
- [15] Journal officiel de la République Algérienne, n°7.
- [16] Journal officiel de la République Algérienne, n° 4.
- [17] Journal officiel de la République Algérienne, n°16.
- [18] Journal officiel de la République Algérienne, n°35.
- [19] Journal officiel de la République Algérienne, n°75.
- [20] Journal officiel de la République Algérienne, n°82.
- [21] Evaluation des risques professionnels code du travail, circulaire n° 6 DRT, 18 Avril 2002.
- [22] M. Guetarni Islam Hadj Mohamed. Thèse de doctorat. « Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage ». 2019.
- [23] Villemeur A. Sureté de fonctionnement des systèmes industrielles, fiabilité – facteurs humains informatisation. Ed. Eyrolles 61, Bd Saint-Germain Paris (1988).
- [24] Cabarbaye A. Modalisation, évaluation et optimisation en Sureté de fonctionnement, Ed : cab innovation, Toulouse, France.
- [25] FOURAL Mohammed Amine, HALFAOUI Kada Mohamed. « Etude de danger d’une torche par la méthode arbre de défaillance AdD ». 2020.
- [26] L. Boucerredj, Sureté de fonctionnement ‘recherche des scénarios critiques dans les systèmes mécatronique’, Thèse de doctorat de l’Université Badai Mokhtar Annaba, 2015.
- [27] D.E.Fethallah, M.E.Benouis, L’évaluation de la disponibilité et de la fiabilité des composants réparables, Mémoire de Fin d’Etudes Master (LMD) de L’Université Dr. Tahar Moulay de Saida, 2018.

## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

- [28] H. Hadj Mabrouk, Introduction à la sécurité et à l'analyse des risques technologiques et humains, 3eme Symposium International sur la Maintenance et la Maitrise des Risques, Rabat, 2010.
- [29] Y. El attabi, La sûreté de fonctionnement (SDF), Cour, 2011.
- [30] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques / Électroniques / électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 1 à 7. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, 1998-2000.
- [31] <http://jackadit.com/index.php?page=inds3>, 15 Oct 2021.
- [32] L. Cauffriez, D. Rénaux, Modélisation des paramètres de la sûreté de fonctionnement par des fonctions de Transfert: Application à la disponibilité, Conférence Papier de L'Université Polytechnique Hauts-de-France, 2002.
- [33] [http://chohmann.free.fr/maintenance/mtbf\\_mttr.htm](http://chohmann.free.fr/maintenance/mtbf_mttr.htm), 14 Oct 2021.
- [34] Système de management de la santé et de la sécurité au travail- Spécification - BSI, Afnor.
- [35] H. Kahal, Réseaux Bayésiens Dynamiques: Application aux réseaux électriques, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magistère en électrotechnique de L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran
- [36] Cours fiabilité des Systèmes, [https://www.doyoubuzz.com/var/f/qk/ro/qkroqn1-pf5ti6bmHUScaBE94ly7YW2r8QZwNseROgV\\_master.pdf](https://www.doyoubuzz.com/var/f/qk/ro/qkroqn1-pf5ti6bmHUScaBE94ly7YW2r8QZwNseROgV_master.pdf), 31 Sep 2021.
- [37] A.G.Mihalache, Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué, Sciences de l'ingénieur de L'Université d'Angers, 2007.
- [38] K. Rhazali, Optimisation de la disponibilité des systèmes multi-Etats, Projet industriel de fin d'études, 2015.
- [39] C. Bouchikhi, Contribution à l'élaboration d'une Méthode d'estimation du paramètre D'origine de modèle Weibull, Mémoire pour l'obtenir de diplôme de Magister, Université d'Oran, 2013.
- [40] A. Cabarbaye, L'estimation en sureté de fonctionnement, Livre, Cab Innovation, 2017.
- [41] Pr. A. Bellaouar, S. Beleulmi, Fiabilité maintenabilité disponibilité, de L'Université Constantine 1, 2013.
- [42] N. Yvonnick, Qu'est-ce que la loi Gamma, Application a l'analyse de la série criminelle d'Andrej Tchikatilo, de L'Université Européenne de Bretagne, crpcc-lpe Modevaiaa, camaret, 2013.
- [43] P. Dusart, Cours de Statistiques inférentielles, Licence 2-S4, 2018.
- [44] P. Magain, Introduction aux méthodes quantitatives et éléments statistique, [http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat\\_Main\\_Fr/Chapitre5.htm](http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat_Main_Fr/Chapitre5.htm), 16 Oct 2021.
- [45] <http://tice.inpl-nancy.fr/modules/unit-stat/chapitre2/index.html>, 26 Oct 2021.
- [46] P.MILAN, Lois de probabilité à densité Loi normale, Cours, 2015.
- [47] F. Cotted-Emard, Probabilités et tests d'hypothèses, Boeck Supérieur Amazon France, Livre, 2014.
- [48] S. Amirouche, S. Ait hamou, Dimensionnement des collecteurs de la Station d'épuration de la ville d'Akbou.wilaya de Bejaia, Mémoire de fin d'études de L'Université Bejaia, 2017.
- [49] Mazouni M-H « Pour une Meilleure Approche du Management des Risques: De la modélisation Ontologique du Processus Accidentel au Système Interactif d'Aide à la Décision ». Thèse de doctorat, Université de Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2008.
- [50] Société pour l'avancement de la sécurité des systèmes en France. Terminologie cohérente dans le domaine de la sécurité moderne. Document non publié.
- [51] Villemeur A. « Sureté de fonctionnement des systèmes industriels ». Number 2. Eyrolles, 1998.

## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

- [52] Innal F., « Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances, Analyse critique de la norme CEI 61508 ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2008.
- [53] S. Amirouche, S. Ait hamou, Dimensionnement des collecteurs de la Station d'épuration de la ville d'Akbou.wilaya de Bejaia, Mémoire de fin d'études de L'Université Bejaia, 2017.
- [54] ISO/CEI Guide 51. Aspects liés à la sécurité : Principes directeurs pour les inclure dans les normes. Organisation internationale de normalisation (ISO), 1999.
- [55] C. Lievens « Sécurité des systèmes ». Cepadues éditions, Toulouse, France, 1976.
- [56] Ouddai Roukai « Étude des relations entre les coûts d'accidents et la performance en sécurité » Thèse de doctorat, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2013.
- [57] CEI IEC 61882, Norme internationale, études de danger et d'exploitation (étude HAZOP), guide d'exploitation, première édition, CEIIEC 61 882:2001.
- [58] Samia HADDA « Evaluation et Optimisation des Performances des Systèmes Instrumentés de Sécurité pour une Meilleure Maîtrise des Risques » Mémoire de magistère, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2013.
- [59] Mohamed SALLAK, « Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité ». Thèse de doctorat, Nancy University, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 2007.
- [60] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 4 : Définitions et abréviations - Edition 1.0. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, Décembre 1998-2002.
- [61] Walid MECHRI, « Evaluation de la performance des Systèmes Instrumentés de Sécurité à paramètres imprécis » Thèse de doctorat, université de Tunis ELMANAR, 2011
- [62] Innal F., « Contribution à la modélisation des systèmes instrumentés de sécurité et à l'évaluation de leurs performances, Analyse critique de la norme CEI 61508 ». Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2008.
- [63] Signoret J-P., Dutuit Y., & Rauzy A. « High integrity protection systems (hips): Methods and tools for efficient safety integrity levels (SIL) analysis and calculations». In Risk, Reliability and Societal Safety Aven and Vinnem (eds), 2007.
- [64] Norme CEI 61508. Sécurité fonctionnelle des systèmes électriques/électroniques/électroniques programmables relatifs à la sécurité – Parties 4: Définitions et abréviations - Edition 1.0. Commission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, Décembre 1998-2002.
- [65] Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector, 2000.
- [66] Exigences de sécurité des équipements de mesures et de contrôle « Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen », Berlin, Deutsches Institut für Normung, 1994.
- [67] Ouzraoui Noura « Application des Techniques de l'Intelligence Artificielle aux Problèmes de Gestion des Risques Industriels » Thèse de doctorat, Institut Hygiène et sécurité industrielle, Université de Batna, 2014.
- [68] Layer of protection analysis; simplified process assessment; center for chemical process safety of the American institute for chemical Engineers; New York; 2001.
- [69] Kalos, M. and Whitlock, P. « Monte Carlo methods» Volume I: Basics. John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [70] Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector, 2000.

## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

- [71] Utkin, L. & Coolen, F. « New metaheuristics, neural and fuzzy techniques in reliability, volume 2, chapter Imprecise reliability» An introductory overview, pages 261-306. Computational intelligence in reliability engineering, 2007.
- [72] Cédric BAUDRIT, « Représentation et propagation de connaissances imprécises et incertaines : application à l'évaluation des risques liés aux sites et aux sols pollués. Thèses de doctorat, Université de Toulouse, France, 2005.
- [73] Baudrit C., Guyonnet, D., and Dubois, D. (2007). Joint propagation of variability and imprecision in assessing the risk of groundwater contamination. Journal of Contaminant Hydrology, 93(1-4):72-84.
- [74] Sandra SANDRI, « La combinaison de l'information incertaine et ses aspects algorithmiques ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1991.
- [75] Tu Duong LE DUY. « Traitement des incertitudes dans les applications des Études Probabilistes de Sûreté Nucléaire » Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes. 2011.
- [76] Bouchon-Meunier BERNADETTE « La logique floue et ses applications, Vie artificielle », Addison-Wesley France, 1995.
- [77] Helton, J. C. & Oberkampf, W. L. « Alternative representations of epistemic uncertainty». Reliability Engineering and System Safety, 85 :110. 2004.
- [78] Dubois, D. and Prade., H. « La fusion d'information imprécis » Traitement Du Signal, chapitre La fusion d'informations imprécises, pages 447-458. France 1994.
- [79] Didier DUBOIS, Foulloy LAURENT, Mauris GILLES and Henri PRADE « Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities ». Journal of Reliable computing, 10:273-297. 2004.
- [80] Nonelectronic Parts Reliability. New York, Reliability Analysis Center, Griffiss AFB. 1995.
- [81] Nozer D Singpurwalla «Reliability and Risk: A Bayesian Perspective». Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons, 2006.
- [82] Enrico Zio. «Reliability engineering: Old problems and new challenges». Reliability Engineering & System Safety, 94(2):125–141, February 2009.
- [83] Terje Aven. « Some reflections on uncertainty analysis and management». Reliability Engineering & System Safety, 95(3):195–201, March 2010.
- [84] Elisabeth Paté-Cornell «Uncertainties in risk analysis: Six levels of treatment » Reliability Engineering and System Safety 54:95-111. 1996.
- [85] BP Amoco Exploration (In-Amenas) Ltd «Evaluation of In Amenas CPF Explosion Risks», Report no/DNV Reg No.: 1/ 12JEZRS-4, 2010.
- [86] Didier Dubois and Henri Prade. « Formal representations of uncertainty». In Decision-making Process: Concepts and Methods, chapter 3, pages 85–156. ISTE & Wiley, London, 2010.
- [87] Lev V. Utkin and Igor Kozine « On new cautious structural reliability models in the framework of imprecise probabilities». Structural Safety, 32(6):411–416, November 2010.
- [88] W. Schön and T. Denoeux. « Prise en compte des incertitudes dans les évaluations de risque à l'aide de fonctions de croyance ». In 14ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Bourges, France, 2004.
- [89] Mohamed SALLAK, Christopher SIMON, and J.-F AUBRY, «A fuzzy probabilistic approach for determining safety integrity level». IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 16(1):239-248. 2008.
- [90] Mohamed SALLAK, Walter SCHÖN, and Felipe AGUIRRE. «The Transferable Belief Model for reliability analysis of systems with data uncertainties and failure dependencies».

## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 40:266–278, 2010.

- [91] Mohamed Sallak, Walter Schön, and Felipe Aguirre. « Reliability assessment for multi-state systems under uncertainties based on the Dempster-Shafer theory». IIE Transactions, DOI: 10.1080/0740817X.2012.706378, 2012.
- [92] Roger M. Cooke, «The anatomy of the squizzel : The role of operational definitions in representing uncertainty». Reliability Engineering & System Safety, 85(1-3):313–319, July 2004.
- [93] Daniel Warner North. « Probability theory and consistent reasoning». Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis, 30(3):377–80, March 2010.
- [94] Seamus Bradley « Dutch Book Arguments and Imprecise Probabilities. In Dennis Dieks, Wenceslao J. Gonzalez, Stephan Hartmann, Michael Stöltzner, and Marcel Weber, editors, Probabilities, Laws, and Structures, volume 3 of The Philosophy of Science in a European Perspective», pages 3–17. Springer Netherlands, 2012.
- [95] Tu Duong LE DUY. « Traitement des incertitudes dans les applications des Études Probabilistes de Sûreté Nucléaire » Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes. 2011.
- [96] Winkler, R. «Uncertainty in probabilistic risk assessment». Reliability Engineering and System Safety 54:127 –132.1996.
- [97] Stamatelatos, M. «Probabilistic risk assessment procedures guide for NASA managers and practitioners». Note technique, NASA, 2002.
- [98] Hofer, E. «When to separate uncertainties and when not to separate». Reliability Engineering and System Safety 54:113–118. 1996.
- [99] Rabah Bilal « Etude de l’implémentation des Systèmes Instrumentés de Sécurité par des méthodes semi-quantitatives dans un environnement de connaissances imparfaites » Mémoire de magistère, Institut d’Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, soutenu le 26/12/2013.
- [100] Véronique Delcroix, Ali Ben M’rad & Sylvain Piechowiak « De l’information à l’observation dans un réseau bayésien » Actes IAF 2014.
- [101] Isabelle BLOCH, « Les méthodes de raisonnement dans les images » ENST, Département TSI, France, 2004.
- [102] Céline Baranger et Julien Mathiaud « Méthode de Monté Carlo pour les équations de transport » Springer, Spain 2013.
- [103] Christian Robert & George Casella «Monte Carlo Statistical Methods» Springer, 2010.
- [104] Smidts Olivier « Analyse probabiliste du Risque du stockage de Déchets radioactifs par la Méthode des arbres d’Événements continus ». Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 1997.
- [105] Kalos, M. and Whitlock, P. « Monte Carlo methods» Volume I: Basics. John Wiley and Sons, New York, 1986.
- [106] JCGM 101:2008 « Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”- Propagation of distributions using a Monte Carlo method»; 2008.
- [107] Désenfant M. « Evaluation de l’incertitude en utilisation de la simulation de Monté Carlo » Article non publié, laboratoire nationale de métrologie et d’essai LNE, France, 2007.
- [108] NASA «Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners». NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.
- [109] EPA «Guidance on the development, Evaluation, and application of Environmental models». U.S. Environmental Protection Agency, 2009.

## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

- [110] Lux I. and Koblinger L. « Monte Carlo Particle transport methods » Neutron and Photon calculations, CRC Press, 1991.
- [111] Salteli A. «The critique of modeling and sensitivity analysis in the scientific discourse». Institute for the Protection and Security of the Citizen, rapport EUR 22487 EN. 2006.
- [112] Saltelli A., Chan K., & Scott EM. «Sensitivity Analysis» John Wiley & Sons Publication, 2004.
- [113] Nishant PANDYA « Analyse de sensibilité paramétrique d'un outil de modélisation des conséquences de scénarios d'accidents. Application à la dispersion atmosphérique de rejets avec le logiciel Phast », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [114] Bettonvil B. & Kleijnen J. P.C «Searching for important factors in simulation models with many factors: Sequential bifurcation». European Journal of Operational Research, 96(1):180-194. 1997.
- [115] Campolongo F. & Braddock R «The use of graph theory in the sensitivity analysis of the model output: a second order screening method» Reliability Engineering & System Safety, 64(1):1 – 12. 1997.
- [116] Deana A. M. & Lewis S. M. «Comparison of group screening strategies for factorial experiments», Computational Statistics & Data Analysis, 39(3):287- 297. 2002.
- [117] Morris M. D. «Input screening: Finding the important model inputs on a budget», Reliability Engineering & System Safety, 91(10-11): 1252-1256. 2006.
- [118] Turányi T. & Rabitz, H. «Sensitivity Analysis» John Wiley & Sons Publication, pages 81 – 99. 2004.
- [119] Bubbico R. & Mazzarotta B. «Accidental release of toxic chemicals: Influence of the main input parameters on consequence calculation». Journal of Hazardous Materials, 151:394 – 406. 2008.
- [120] Nair S. K., Chambers D. B., Park S. H. & Hoffman, F. O. « Review of Models Used for Determining Consequences of UF6 Release: Model Evaluation Report, Vol.2», Prepared for the Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, District of Columbia 20555-0001, NUREG/CR-648, 1997.
- [121] Homma T., Saltelli A., «Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models». Reliability Engineering & System Safety, 52 (1):1 – 17, 1996.
- [122] Saltelli A., Ratto M., Tarantola S. & Campolongo F. «Sensitivity analysis for chemical models» Chemical Reviews, 105(7):2811 – 2826, 2005.
- [123] Xu C. & Gertner G. Z. «A general first-order global sensitivity analysis method» Reliability Engineering & System Safety, 93(7): 1060 – 1071, 2007.
- [124] Sobol I. M. «Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models». Mathematical Modeling & Computational Experiment, 1(4):407 – 414, 1993.
- [125] Cukier R.I., Fortuin C.M., Shuler K.E., Petschek A.G. & Schaibly J.H. «Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients theory» Journal Chemical Physics, 59:3873 – 3878, 1973.
- [126] Saltelli A., Tarantolac S. & Chan, K., «A Quantitative Model- Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output», Technometrics, 41(1): 39 – 56, 1999.
- [127] Zadah L.A., « Fuzzy Sets » Information and control, vol 8, pp 338-353, 1965.
- [128] Zadah L.A., «Probability measures of fuzzy events». Journal Mathematical Annals, 23:421-427, 1968.
- [129] Mouloud Bourarache « Apport des techniques floues et possibilistes à l'analyse semi quantitatives des risques industriels » Mémoire de Magistère, Institut d'Hygiène et sécurité Industrielle, Université de Batna, 2009.
- [130] Dubois D., & Prade H., « Possibility theory. An approach to computerized processing of uncertainty». Plenum Press, 1988.



## Chapitre VII : CONCLUSION GENERALE

- [131] Kaufman A., & Gupta M.M. «Introduction to Fuzzy Arithmetic Theory and Application». Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1991.
- [132] Dempster A.P. «Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping». *Annals of mathematical statistics. Reliability Engineering and System Safety*, 38(12):325-339, 1967.
- [133] Baudrit C., Guyonnet, D., and Dubois, D. (2007). Joint propagation of variability and imprecision in assessing the risk of groundwater contamination. *Journal of Contaminant Hydrology*, 93(1-4):72-84.
- [134] Shafer, Glenn «A Mathematical Theory of Evidence». Princeton University Press, 1976.
- [135] Zadeh L.A. «A Simple View of the Dempster-Shafer Theory of Evidence and its Implication for the Rule of Combination», *Computer Science Division, University of California, Berkeley, California 94720*, 1986.
- [136] INERIS-DRA « Outils d'analyse des risques générés par une installation industrielle ». INERIS, Direction des Risques Accidentels, France, 2003.
- [137] Joly C., & Vallee A. « Analyse des risques et prévention des accidents majeurs : Synthèse vis-à-vis de l'étude de danger ». INERIS-Direction des Risques Accidentels, France, 2004.
- [138] Birnbaum Z.W., «On the importance of different components in a multi- component system». In *Multivariable analysis II.*, P.R. Krishnaiah, Ed. New York: Academic Press, pp. 581–592, 1969.
- [139] Rauzy A., «New Algorithms for Fault Tree Analysis». *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 40, pp. 203–211, 1993.
- [140] Otway, H. & von Winterfield, D., Expert judgement in risk analysis and management: process, context and pitfalls. *Risk Analysis*, 12 (2011) 83-93.
- [141] API American Petroleum Institute, API 581 Risk-Based Inspection Base Resource Document, First Edition, Washington, USA 2011.
- [142] Support de cours Eléments Importants Pour la Sécurité EIPS M.SANDJAK 2018-2019.