



**Université du 20 Août 1955-SKIKDA**



**Institut des Sciences et Techniques  
Appliquées (ISTA-Skikda)**

**Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de  
Master.**

**Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle**

**Spécialité : Sécurité des Procédés Pétrolières et Gazières**

**TITRE DU MEMOIRE**

**Etude de SIL d'un bac de stockage d'Héxène à l'aide  
des méthodes HAZOP et LOPA**

**Présenté et soutenu publiquement le : 31/06/2024**

**Par :**

- Djouria Lamis
- Ghadjetti Lina

**Devant le jury composé de :**

**Président : Pr. Zennir Youcef**

U- 20 Août 1955. Skikda

**Examineur : Dr. Hamaidia Mohyidine**

U- 20 Août 1955. Skikda

**Rapporteur : Pr. Innal Fares**

U- 20 Août 1955. Skikda

**4ème Promotion**

**Juin 2025**

# Dédicace

*Grâce à Dieu qui m'a éclairé le chemin vers cette réussite.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père, Belkacem, pour son amour, ses prières silencieuses et ses sacrifices inestimables.*

*Ma chère mère, Houria, source d'affection et de tendresse infinies, qui m'a toujours soutenue avec tout son cœur.*

*Mes chers frères et sœurs : Bachir, Karim, Achraf, Mariem, Sofiane, Fawzi et Fayçal, pour leur présence, leur soutien, et leurs mots d'encouragement.*

*Une mention toute particulière à Bachir, mon frère aîné, dont la sagesse, l'écoute et le soutien moral ont toujours été un repère pour moi.*

*Mes anges, les enfants de mon frère : Rania, Mouayad, Aridj, Mirale et Rahaf, qui illuminent nos vies par leur innocence.*

*La belle femme de mon frère ahlem*

*Mon amie fidèle et binôme de cœur : Lina Ghadjati.(Je t'aime)*

*Toute ma famille.*

*Toutes mes amies.*

*Et toutes les personnes chères à mon cœur.*

*Lamis*

# Dédicace

*Al hamdoulilah, aujourd'hui et pour toujours, pour ses innombrables bienfaits  
et sa générosité infinie ,*

*Je dédie ce travail avec tout mon amour à mon père Lahlali , mon  
pilier, mon guide dans la vie.*

*À ma chère mère Dalila Boudis , patiente et combattante, qui m'a  
accompagnée tout au long de mes études, main dans la main, avec tant  
de tendresse et de sacrifices ; merci infiniment.*

*À mon frère Mohamed, loin des yeux mais si proche du cœur, je  
t'adresse tout mon amour et mes remerciements. Tu resteras toujours  
mon refuge et mon repère.*

*À mon petit frère seif el dinne , mon double, merci pour tes paroles  
réconfortantes, merci d'être la source de mes sourires au quotidien.*

*À mes chères tantes : Khatima, Khalissa et Bariza Boudis, je vous  
adresse tout mon respect et ma gratitude pour votre présence et votre  
affection; Je salue également ma courageuse grand-mère héroïne mechri  
yamina.*

*À Lamis Djoueria, ma précieuse amie, ma compagne de route et de  
mémoire, je te dédie tout mon amour et ma profonde reconnaissance.  
Merci pour ton soutien, ta patience et ta belle amitié.*

*À mes fidèles amies, qui m'ont toujours soutenue avec sincérité et  
loyauté, merci pour votre présence précieuse tout au long de ce chemin.*

*À tout la famille.*

*À tout les proches.*

*Lina*

## ***Remerciements***

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé et la patience qu'Il nous a accordées tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Ahmed Bougiout, chef incendie dans le complexe CP2K Sonatrach Skikda, pour sa précieuse aide, sa disponibilité et son soutien exemplaire.

Nous remercions également notre encadrant académique, Professeur Innal Farès, pour son accompagnement, ses conseils et le suivi rigoureux qu'il nous a assuré.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du service HSE Prévention du complexe CP2K Sonatrach Skikda, en particulier au chef du service environnement.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles, pour leur support, leur patience et leur amour inconditionnel.

**Merci...**

**Lamis...**

**Lina...**

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>II.1</b>	Comparatif des architectures courantes	17
<b>II.2</b>	Description des paramètres du graphe de risque pour les industries de transformation	26
<b>III.1</b>	La localisation géographique du complexe CP2K	40
<b>III.2</b>	Les aspects et les données de sécurité de l'héxène	45
<b>III.3</b>	Les effets Physiologiques et premiers secours	45
<b>IV.1</b>	Echelle de gravité	57
<b>IV.2</b>	Echelle de fréquence	57
<b>IV.3</b>	Tableau de HAZOP	58
<b>IV.4</b>	Les valeurs de fréquence retenues pour chaque événement initiateur	65
<b>IV.5</b>	Les valeurs de PFD des différentes couches de protection	66
<b>IV.6</b>	Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Implosion)	68
<b>IV.7</b>	Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Débordement du réservoir)	69
<b>IV.8</b>	Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Surpression au niveau du Bac)	70
<b>IV.8</b>	Le SIF LAL45001	71
<b>IV.9</b>	Le SIF LSH45054	75
<b>IV.10</b>	Les tests periodiques	78

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre de figure	page
I.1	Caractérisation du risque	4
I.2	Courbe de Farmer	4
I.3	Modèle ALARP	5
I.4	Le triangle de feu	7
I.5	Les conditions d'explosion	8
I.6	Flash fire	9
I.7	Feu de nappe	10
I.8	Phénomène d'UVCE	11
I.9	Les étapes du BLEVE	11
I.10	Processus de gestion des risques	12
I.11	Les étapes fondamentales de la prévention et de la maîtrise des risques	14
II.1	La structure d'un SIS	16
II.2	La norme CEI 61508 et ses normes filles	20
II.3	Cycle de vie de sécurité global proposé par la norme CEI 61508	22
II.4	Fonction instrumentée de sécurité (SIF)	22
II.5	Exemple d'un tableau pour l'analyse HAZOP	24
II.6	Schéma général du graphe des risques	26
II.7	Exemple de matrice de gravité	27
II.8	Différentes couches de protection suivant LOPA	29
II.9	Schéma d'un Arbre des Événements (AdE) avec des barrières de sécurité	32
II.10	Classification des défaillances selon leurs causes	33
II.11	Typologie des défaillances selon la norme CEI 61508	35
III.1	Schéma d'occupation du sol du complexe CP2K	41
III.2	Les zones principales du complexe CP2K	42
III.3	Les principales installations de l'unité CP2K	43
III.4	Le bac de stockage d'héxène au niveau de CP2K	48

## LISTE DES FIGURES

<b>IV.1</b>	Vue d'en haut du bac 950-461 et de ses sécurités	52
<b>IV.2</b>	présente le schéma P&ID réservoir de stockage d'hexène	53
<b>IV.3</b>	Sous -système de protection	54
<b>IV.4</b>	Sous -système de Surveillance	55
<b>IV.5</b>	Sous -système de contrôle de pression	56
<b>IV.6</b>	Sous -système d' alarme	57
<b>IV.7</b>	Matrice de criticité utilisée	71
<b>IV.8</b>	La discription de rapport 01	71
<b>IV.9</b>	Configuration de l'architecture de la SIF de sécurité de bas niveau	73
<b>IV.10</b>	Courbes présentent les PFD de la SIF de bas niveau	74
<b>IV.11</b>	les resultats de SIF 01	75
<b>IV.12</b>	Paramètres Techniques	75
<b>IV.13</b>	La discription de rapport 02	76
<b>IV.14</b>	Configuration de l'architecture de la SIF de sécurité de haut niveau	76
<b>IV.15</b>	Courbes présentent les PFD de la SIF de haut niveau	77
<b>IV.16</b>	les resultats de SIF 02	78
<b>IV.17</b>	Paramètres Techniques	78

## LISTE DES ABREVIATION

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
<b>ALARP</b>	As Low As Reasonably Practicable
<b>BLEVE</b>	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
<b>LIE</b>	Limite Inférieure d'Explosivité
<b>LSE</b>	Limite Supérieure d'Explosivité
<b>UVCE</b>	Unconfined Vapor Cloud Explosion
<b>OHSAS</b>	Occupational Health and Safety Assessment Series
<b>ISO/CEI</b>	Organisation Internationale de Normalisation / Commission Électrotechnique Internationale
<b>APR</b>	Analyse Préliminaire des Risques
<b>AMDEC</b>	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
<b>HAZOP</b>	Hazard and Operability Study
<b>AdD / FTA</b>	Arbre des Défaillances / Fault Tree Analysis
<b>AdE</b>	Arbre des Événements
<b>POI</b>	Plan d'Opération Interne
<b>PPI</b>	Plan Particulier d'Intervention
<b>REX</b>	Retour d'Expérience
<b>EPI</b>	Équipements de Protection Individuelle
<b>SIS</b>	Système Instrumenté de Sécurité
<b>SIF</b>	Fonction Instrumentée de Sécurité (Safety Instrumented Function)
<b>SIL</b>	Niveau d'Intégrité de Sécurité (Safety Integrity Level)
<b>LOPA</b>	Layer of Protection Analysis
<b>E/E/PE</b>	Électrique / Électronique / Électronique Programmable

## LISTE DES ABREVIATION

<b>BPCS</b>	Système de Commande de Procédé de Base (Basic Process Control System)
<b>IPL</b>	Couche de Protection Indépendante (Independent Protection Layer)
<b>CP2K</b>	Complexe de Production de Polyéthylène Haute Densité
<b>PEHD</b>	Polyéthylène Haute Densité
<b>ENIP</b>	Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques
<b>FDS</b>	Fiche de Données de Sécurité
<b>DCS</b>	Distributed Control System
<b>PI</b>	Pressure Indicator
<b>TI</b>	Temperature Indicator
<b>LI</b>	Level Indicator
<b>PSV</b>	Pressure Safety Valve

Dédicaces

Remerciements

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Table des matières

Résumé

Liste des annexes

<b>Introduction générale</b>		1
<b>Chapitre I</b>	<b>Gestion des risques industriels : principes, enjeux et phénomènes majeurs</b>	
<b>I.1</b>	Introduction	3
<b>I.2</b>	Concepts clés sur la sécurité industrielle	3
<b>I.2.1</b>	Notion de danger	3
<b>I.2.2</b>	Notion de risque	3
<b>I.2.3</b>	Notion de sécurité	4
<b>I.3</b>	Risque tolérable et principe ALARP	5
<b>I.4</b>	Le risque majeur	6
<b>I.4.1</b>	Les phénomènes majeurs	6
<b>I.4.1.1</b>	L'incendie	6
<b>I.4.1.2</b>	L'explosion	7
<b>I.4.1.3</b>	Le Flash Fire	8
<b>I.4.1.4</b>	Le Feu de Nappe	9
<b>I.4.1.5</b>	L'UVCE (Explosion d'un Nuage de Gaz en Atmosphère Libre)	10
<b>I.4.1.6</b>	Le BLEVE (Explosion de Vapeur en Expansion de Liquide en Ébullition)	11
<b>I.5</b>	Processus de gestion des risques dans les systèmes industriels	12
<b>I.6</b>	Prévention et maîtrise des risques	13
<b>I.7</b>	Conclusion	14
<b>Chapitre II</b>	<b>Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)</b>	
<b>II.1</b>	Introduction	15

## SOMMAIRE

<b>II.2</b>	Définition de la sécurité fonctionnelle	15
<b>II.3</b>	Le système instrumenté de sécurité (SIS)	15
<b>II.3.1</b>	Définition du Système Instrumenté de Sécurité (SIS)	15
<b>II.3.2</b>	Structure d'un Système Instrumenté de Sécurité	16
<b>II.3.2.1</b>	Composants d'un SIS	17
<b>II.4</b>	Architectures et logiques de redondance	18
<b>II.5</b>	Les modes de fonctionnement d'un SIS	19
<b>II.6</b>	Approche normative et cycle de vie de sécurité	19
<b>II.6.1</b>	Référentiel normatif des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)	19
<b>II.6.1.1</b>	CEI 61508 – Sécurité fonctionnelle des systèmes E/E/PE relatifs à la sécurité	19
<b>II.6.1.1.1</b>	Normes sectorielles dérivées	19
<b>II.6.1.2</b>	Norme IEC 61511 – Systèmes Instrumentés de Sécurité pour les Industries de Procédés	20
<b>II.6.1.3</b>	Positionnement par rapport à l'IEC 61508	21
<b>II.6.2</b>	Cycle de vie de sécurité (selon IEC 61508)	21
<b>II.7</b>	Définition de SIF (Safety Instrumented Function)	22
<b>II.8</b>	Définition de SIL (Safety Integrity Level)	23
<b>II.9</b>	Évaluation et Validation de l'Intégrité de Sécurité des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)	23
<b>II.9.1</b>	Analyse des risques et identification des événements dangereux	23
<b>II.9.1.1</b>	Méthode HAZOP (HAZard and OPerability Study)	23
<b>II.9.2</b>	Détermination du niveau d'intégrité de sécurité requis (SIL requis)	24
<b>II.9.2.1</b>	Le graphe de risque	25
<b>II.9.2.2</b>	Matrice de gravité (ou matrice de risque à couches de protection)	26

## SOMMAIRE

<b>II.9.2.3</b>	Méthode LOPA (Layers of Protection Analysis)	29
<b>II.9.2.4</b>	Méthode de l'Arbre de Défaillances (AdD – Fault Tree Analysis, FTA)	32
<b>II.9.2.4</b>	Arbre des Événements (AdE)	31
<b>II.9.3</b>	Classification et quantification des défaillances	32
<b>II.9.3.1</b>	Classification selon les causes des défaillances	33
<b>II.9.3.2</b>	Classification selon les effets sur la fonction de sécurité	34
<b>II.9.3</b>	Évaluation du SIL réalisé	35
<b>II.9.4</b>	Validation du SIS	35
<b>II.10</b>	Conclusion	35
<b>Chapitre III</b>	<b>Champ d'étude – Le complexe pétrochimique CP2K</b>	
<b>III.1</b>	Introduction	37
<b>III.2</b>	Contexte industriel	37
<b>III.2.1</b>	La Société Nationale SONATRACH	37
<b>III.2.2</b>	L'industrie pétrochimique en Algérie	38
<b>III.3</b>	Le complexe CP2K	39
<b>III.3.1</b>	Présentation générale de l'unité CP2K	39
<b>III.3.2</b>	Historique du complexe CP2K	39
<b>III.3.3</b>	Implantation géographique	40
<b>III.3.4</b>	Structure et découpage fonctionnel du complexe	41
<b>III.4</b>	Le produit principal : le Polyéthylène Haute Densité (PEHD)	43
<b>III.4.1</b>	Caractéristiques et propriétés du PEHD	43
<b>III.4.2</b>	Applications du PEHD	43
<b>III.5</b>	Le système étudié : le réservoir de stockage d'héxène	44
<b>III.5.1</b>	L'héxène : présentation générale	44
<b>III.5.2</b>	Propriétés physico-chimiques de l'héxène	44
<b>III.5.3</b>	Risques sanitaires et premiers secours	44
<b>III.5.4</b>	Utilisation de l'héxène au sein du complexe	46

## SOMMAIRE

	CP2K	
<b>III.5.5</b>	Description du réservoir de stockage d'héxène	47
<b>III.5.6</b>	Sécurité et instrumentation du réservoir	49
<b>III.6</b>	Conclusion	50
<b>Chapitre IV</b>	<b>Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461</b>	
<b>IV.1</b>	Introduction	51
<b>IV.2</b>	Critère de choix du système d'étude	51
<b>IV.3</b>	Description du système à étudier	51
<b>IV.4</b>	L'analyse des risques et l'identification des évènements dangereux	56
<b>IV.4.1</b>	Matrice de criticité utilisée	56
<b>IV.4.2</b>	l'étude HAZOP	57
<b>IV.5</b>	Allocation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL requis)	65
<b>IV.5.1</b>	Fréquences d'occurrence des événements initiateurs	65
<b>IV.5.2</b>	Probabilité de défaillance des couches de protection (PFD)	65
<b>IV.5.3</b>	Application de la méthode LOPA	65
<b>IV.6</b>	Réalisation et validation du SIS (SIL réel)	71
<b>IV.7</b>	Conclusion	78
<b>Conclusion</b>		80
<b>Références bibliographiques</b>		82
<b>Annexes</b>		85

### **Résumé**

Ce mémoire porte sur l'évaluation du niveau de sécurité instrumentée (SIL) d'un bac de stockage d'hexène au complexe CP2K de Sonatrach à Skikda. En raison du caractère inflammable de l'hexène, des analyses HAZOP et LOPA ont été menées pour identifier les scénarios accidentels et vérifier la conformité des fonctions instrumentées de sécurité (SIF) aux exigences de la norme IEC 61511. Les résultats montrent une sécurité globalement satisfaisante, mais recommandent un renforcement pour le scénario de surpression. L'étude met en avant l'importance d'une gestion des risques continue, évolutive et intégrée.

**Mots-clés :** Sécurité instrumentée ; SIL ; Bac de stockage ; Hexène ; Sonatrach CP2K ; HAZOP ; LOPA ; IEC 61511 ; Analyse de risque ; Systèmes instrumentés de sécurité (SIS) ; Scénarios accidentels ; Barrières de protection ; SIF ; Gestion des risques industriels.

### **Abstract**

This thesis focuses on the assessment of the Safety Integrity Level (SIL) of a hexene storage tank at the Sonatrach CP2K complex in Skikda. Due to the flammable nature of hexene, HAZOP and LOPA analyses were conducted to identify potential accident scenarios and verify the compliance of the Safety Instrumented Functions (SIF) with the IEC 61511 standard. The results indicate overall adequate safety, with a recommendation to strengthen the system in case of overpressure. The study highlights the need for continuous, adaptive, and integrated risk management.

**Keywords :** Safety Instrumented System ; SIL ; Storage tank ; Hexene ; Sonatrach CP2K ; HAZOP ; LOPA ; IEC 61511 ; Risk analysis ; SIS ; Accident scenarios ; Protection layers ; SIF ; Industrial risk management.

### **ملخص**

التابع لسوناطراك CP2K لخزان تخزين الهكسين في مجمع (SIL) يتناول هذا البحث تقييم مستوى السلامة المُبرمجة لتحليل السيناريوهات الخطرة LOPA وHAZOP ونظرًا لطبيعة الهكسين القابلة للاشتعال، تم اعتماد طريقتي بسكيدة

## **RESUME**

IEC 61511 مع متطلبات المعيار (SIF) والتحقق من مدى توافق وظائف السلامة المُبرمجة ويؤكد هذا العمل على. أظهرت النتائج أن نظام السلامة فعّال بشكل عام، مع توصية بتعزيزه في حالة خطر الضغط الزائد. أهمية إدارة المخاطر بشكل مستمر ومتكامل ومتطور.

### **الكلمات المفتاحية**

السلامة المُبرمجة ؛ SIL ؛ خزان التخزين ؛ الهكسين ؛ سوناطراك CP2K ؛ طريقة HAZOP ؛ طريقة LOPA ؛ المعيار IEC 61511 ؛ تحليل المخاطر ؛ أنظمة السلامة المُبرمجة (SIS) ؛ السيناريوهات الخطرة ؛ طبقات الحماية ؛ وظائف السلامة المُبرمجة (SIF) ؛ إدارة المخاطر الصناعية.

# **Introduction**

## **Introduction**

Dans un contexte industriel de plus en plus exigeant, la gestion des risques liés aux procédés devient un pilier fondamental de la performance et de la durabilité. Les industries pétrochimiques, en particulier, sont confrontées à des matières dangereuses dont le stockage et la manipulation nécessitent une vigilance accrue. Les conséquences d'un incident peuvent être catastrophiques, d'où la nécessité d'intégrer des dispositifs de sécurité robustes. C'est dans cette optique que s'inscrit notre mémoire, qui s'intéresse à l'étude du niveau de sécurité instrumentée (SIL) d'un bac de stockage d'hexène au complexe Sonatrach CP2K de Skikda.

Le thème a été choisi en raison de l'importance stratégique de ce complexe industriel dans le paysage énergétique national, mais aussi à cause de la nature hautement inflammable de l'hexène, ce qui en fait un élément critique dans le système global de sécurité du site. Pour mener cette étude, nous avons mobilisé deux méthodes d'analyse de risque reconnues : HAZOP, qui permet d'identifier systématiquement les scénarios de défaillance, et LOPA, qui évalue les barrières de protection existantes afin de déterminer le niveau de sécurité requis (SIL) selon les normes internationales.

Ce travail vise à évaluer si les dispositifs de sécurité en place sont suffisants pour répondre aux exigences normatives, à identifier les lacunes potentielles et à proposer des recommandations adaptées. Nous formulons pour cela l'hypothèse que certaines fonctions de sécurité instrumentées (SIF) pourraient nécessiter une révision ou un renforcement.

Notre approche repose sur une méthodologie combinant analyse qualitative (HAZOP) et quantitative (LOPA), en s'appuyant sur la documentation technique, les standards de sécurité tels que l'IEC 61511, ainsi que des données internes issues du site.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres : le premier explore les concepts généraux liés aux risques industriels et aux accidents majeurs ; le second présente les systèmes instrumentés de sécurité, les niveaux SIL et les méthodes d'analyse utilisées ; le troisième est consacré à la présentation du complexe CP2K ; le quatrième, enfin, met en œuvre les méthodes HAZOP et LOPA sur le bac étudié et analyse les résultats obtenus.

À la lumière de ce cadre, plusieurs questions se posent naturellement :

## INTRODUCTION

- ✚ Le niveau de SIL attribué au bac de stockage d'hexène est-il réellement suffisant pour couvrir les risques identifiés ?
- ✚ Les barrières de protection en place sont-elles conformes aux normes internationales ?
- ✚ Quels ajustements ou renforcements peuvent être envisagés pour améliorer la sécurité de cette installation critique ?

# **CHAPITRE I**

## **Gestion des risques industriels : principes, enjeux et phénomènes majeurs**

## **I.1. Introduction**

La sécurité industrielle repose sur l'identification, l'évaluation et la maîtrise des dangers susceptibles de menacer les personnes, les biens et l'environnement. Dans ce contexte, la compréhension des notions de danger, de risque et de sécurité est fondamentale. Ce chapitre explore également le principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable), qui guide la réduction des risques à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. Nous aborderons ensuite les différentes étapes de la gestion des risques, en mettant l'accent sur les risques majeurs et les phénomènes dangereux qui y sont associés, tels que les explosions de type BLEVE, les incendies, les détonations, ou encore les effets toxiques. L'objectif est de fournir une vision globale des méthodes et concepts clés permettant d'assurer une prévention efficace dans les installations à risque.

## **I.2. Concepts clés sur la sécurité industrielle**

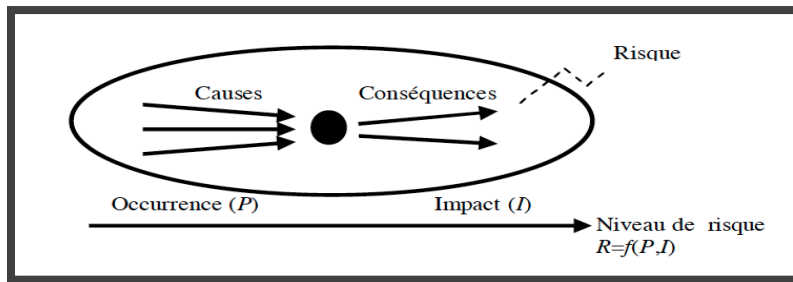
Afin de faciliter la lecture de ce document, les termes couramment employés dans ce mémoire seront définis ci-après.

### **I.2.1. Notion de danger**

Le danger désigne toute source ou situation susceptible de causer un préjudice aux personnes, aux biens ou à l'environnement. Il peut entraîner des conséquences directes (comme des blessures ou des atteintes à la santé) ou indirectes (dégâts matériels, nuisances environnementales). Selon Desroches [1], il s'agit d'une nuisance potentielle affectant la sécurité. Le référentiel OHSAS 18001[2] élargit cette notion en intégrant l'ensemble des risques pouvant impacter la santé, la sécurité, les biens ou l'environnement sur le lieu de travail.

### **I.2.2. Notion de risque**

Le risque correspond à la reconnaissance des dommages potentiels liés à une situation dangereuse. Il résulte de la combinaison d'événements causals (caractérisés par leur probabilité d'occurrence) et de leurs conséquences (évaluées par leur impact). Selon Gouriveau [3], le risque peut ainsi être représenté par un indicateur fonction de ces deux dimensions :  $R = f(\text{Occurrence}, \text{Impact})$ .

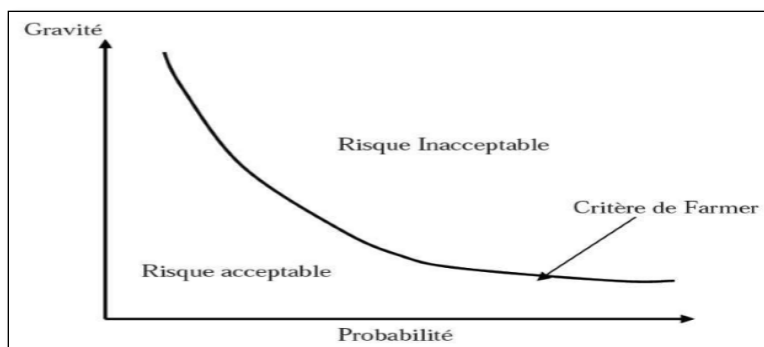


**Figure I.1 :** Caractérisation du risque [3].

Farmer a démontré que la gravité et la probabilité d'un événement sont liées de manière quasi linéaire [4]. En les représentant sur un graphique à deux axes (gravité G et probabilité P), une courbe de seuil se dessine :

- Les risques situés sous cette courbe sont considérés comme acceptables,
- Ceux au-dessus sont jugés inacceptables.

Cette approche permet de visualiser et de décider de l'acceptabilité d'un risque en fonction de sa position par rapport à la courbe.



**Figure I.2 :** Courbe de Farmer [4].

### I.2.3. Notion de sécurité

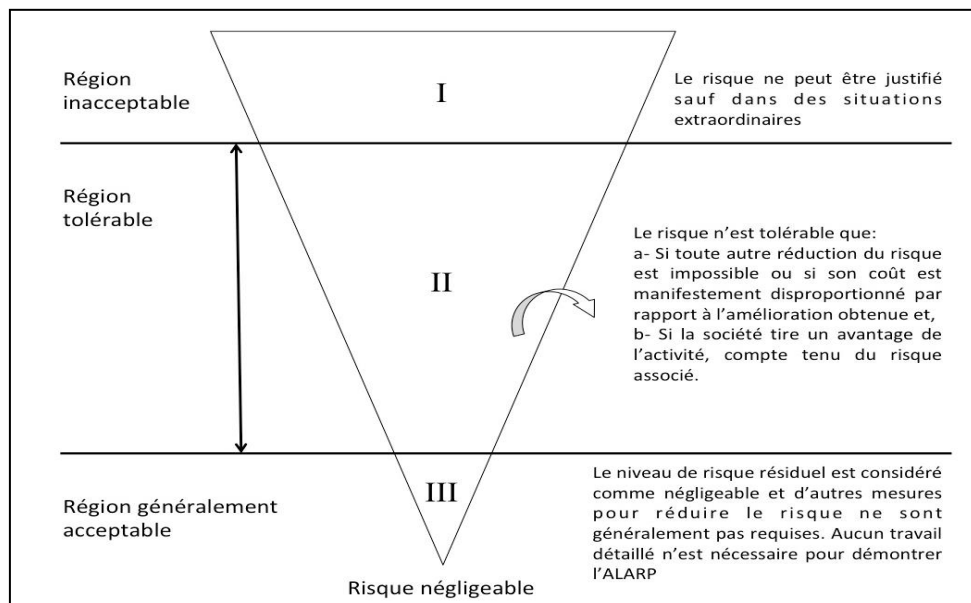
La sécurité est généralement définie comme l'absence de danger, d'accident ou de sinistre. Pour Desroches [1], elle correspond à la non-occurrence d'événements susceptibles de compromettre l'intégrité d'un système, tout au long de son cycle de vie, y compris en cas de fonctionnement dégradé ou défaillant.

Selon le guide ISO/CEI 73[5], la sécurité est l'absence de risques jugés inacceptables ainsi que l'absence de blessures ou de dommages à la santé, qu'ils soient directs ou liés à des dégâts matériels ou environnementaux.

### I.3. Risque tolérable et principe ALARP

Le concept de risque tolérable repose sur le principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable), développé par le Health and Safety Executive. Il implique que les risques doivent être réduits autant que raisonnablement possible, en tenant compte des coûts, de la faisabilité technique et des bénéfices attendus. Déterminer si un risque est tolérable reste une démarche complexe qui nécessite une évaluation équilibrée [6].

D'après le modèle figurant à la Figure I.3



**Figure I.3 : Modèle ALARP [7].**

La Figure 1.4 distingue trois zones de risque :

- **Zone I (intolérable) :** le risque est inacceptable, aucune justification n'est possible.
- **Zone II (ALARP) :** le risque peut être accepté si sa réduction supplémentaire est techniquement ou économiquement déraisonnable.
- **Zone III (négligeable) :** le risque est suffisamment bas pour ne nécessiter aucune action de réduction.

Pour appliquer le principe ALARP, il est nécessaire de définir une échelle de cotation du risque, où chaque classe correspond à une zone du modèle ALARP. Les tableaux de classification du risque (gravité et probabilité) doivent être adaptés à chaque secteur d'activité, en concertation avec les parties prenantes, sur la base de critères partagés, afin de refléter correctement les couples cause/conséquence des risques identifiés [8].

## **I.4. Le risque majeur**

Un risque majeur est un événement catastrophique, d'origine naturelle ou technologique, dont les conséquences peuvent être particulièrement graves : pertes humaines, destructions matérielles, perturbations sociales et atteintes durables à l'environnement. Il se manifeste lorsque un phénomène dangereux (aléa) entre en interaction avec des éléments exposés et vulnérables (enjeux), tels que la population, les infrastructures ou les activités économiques. Ce type de risque dépasse généralement les capacités de réponse des autorités locales et requiert des moyens de secours exceptionnels.

Les risques majeurs se répartissent en deux grandes catégories :

- **Les risques naturels**, liés à des phénomènes environnementaux comme les inondations, tempêtes, séismes, éruptions volcaniques, mouvements de terrain, avalanches, canicules et vagues de froid.
- **Les risques technologiques**, résultant de l'activité humaine, comprennent les accidents industriels, les transports de matières dangereuses, la rupture de barrage, la pollution accidentelle et les incendies majeurs.

### **I.4.1. Les phénomènes majeurs**

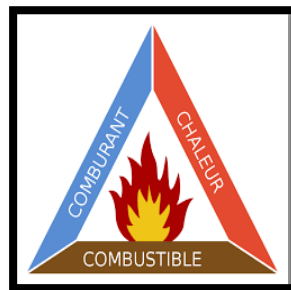
#### **I.4.1.1. L'incendie**

Un incendie est une combustion incontrôlée dans le temps et l'espace, susceptible de causer des dommages importants aux personnes, aux biens et à l'environnement. Contrairement à un feu contrôlé, utilisé à des fins domestiques ou industrielles, l'incendie est imprévu et dangereux [9].

D'un point de vue chimique, il résulte d'une réaction exothermique entre un combustible, un comburant (généralement l'oxygène de l'air) et une énergie d'activation (flamme, étincelle, frottement, etc.). Sans l'un de ces trois éléments, la combustion ne peut ni démarrer ni se poursuivre.

Cette réaction libère de la chaleur, des flammes, de la fumée et des gaz, dont certains peuvent être toxiques, comme le monoxyde de carbone. Le déclenchement et le maintien d'un incendie reposent donc sur ce que l'on appelle le triangle du feu, composé de ces trois éléments essentiels [10].

La compréhension de ce mécanisme est fondamentale pour la prévention et la lutte contre les incendies : il suffit de supprimer un seul de ces éléments pour stopper le processus. Ainsi, on peut étouffer le feu pour retirer le comburant (par exemple avec du  $\text{CO}_2$  ou un couvercle), évacuer le combustible ou encore refroidir la zone pour éliminer l'énergie d'activation (à l'aide d'eau ou d'un extincteur). C'est la perte de contrôle de cette réaction qui rend l'incendie particulièrement dangereux et en fait un risque majeur.



**Figure I.4 :** Le triangle de feu.

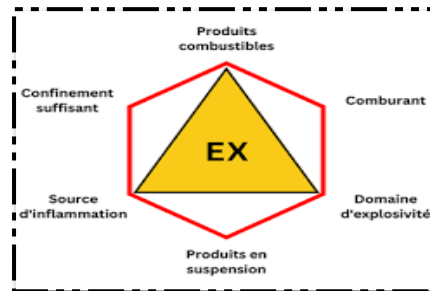
#### **I.4.1.2. L'explosion**

Une explosion est une réaction chimique ou physique extrêmement rapide, souvent de nature combustive, qui se traduit par une libération soudaine et massive d'énergie, accompagnée d'une élévation brutale de pression, de chaleur, de bruit et de projection de débris. Lorsqu'elle résulte d'une combustion, on distingue la déflagration (propagation à vitesse subsonique) de la détonation (vitesse supersonique).

Il peut survenir lorsque la concentration d'un combustible dans l'air se situe entre deux seuils : la limite inférieure d'explosivité (LIE), en dessous de laquelle le mélange est trop pauvre, et la limite supérieure d'explosivité (LSE), au-delà de laquelle il est trop riche en combustible. Ces seuils dépendent du type de combustible (gaz, vapeur, poussière) et des conditions ambiantes (température, pression, humidité).

Pour qu'une explosion se produise, six conditions doivent être réunies : la présence d'un comburant (généralement l'oxygène de l'air), d'un combustible (gaz, vapeur, aérosol ou poussière), d'une source d'inflammation (étincelle, flamme, choc, arc électrique, etc.), d'une forme physico-chimique propice (suspension du combustible sous forme gazeuse ou en fines particules), d'une concentration comprise entre la LIE et la LSE, et enfin d'un confinement suffisant permettant l'augmentation brutale de la pression [9].

L'absence de l'un de ces éléments empêche l'explosion, ce qui rend leur maîtrise essentielle pour la prévention : cela passe notamment par le contrôle des concentrations, la limitation des sources d'inflammation et une ventilation adaptée.



**Figure I.5 :** Les conditions d'explosion.

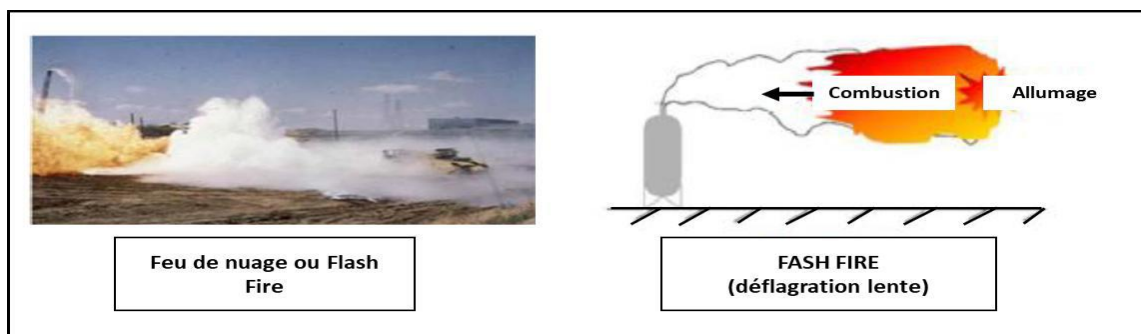
#### **I.4.1.3. Le Flash Fire**

Le flash fire, ou feu éclair, est une combustion extrêmement rapide et brève qui se produit lorsqu'un nuage de gaz ou de vapeur inflammable atteint une concentration explosive dans l'air et s'enflamme soudainement. Contrairement à une explosion, il ne provoque généralement pas de surpression, mais il peut provoquer de graves brûlures et propager instantanément les flammes sur une large zone [10].

Ce phénomène se déroule en deux phases très courtes : la phase pré-accidentelle, depuis la fuite ou l'émission du gaz jusqu'à son inflammation, souvent trop rapide pour permettre une intervention, et la phase post-accidentelle, qui correspond à la combustion du nuage et dure seulement quelques secondes.

Pour qu'un flash fire survienne, plusieurs conditions doivent être réunies : la présence d'un gaz ou d'une vapeur inflammable, une concentration située entre la limite inférieure et la limite supérieure d'explosivité, une absence de confinement, et une source d'inflammation proche.

Bien qu'il n'y ait pas de surpression destructrice, les conséquences humaines peuvent être graves, car la rapidité du phénomène laisse peu de chances aux personnes exposées de fuir, ce qui en fait un risque majeur dans les installations industrielles manipulant des hydrocarbures volatils comme les raffineries ou les usines chimiques.

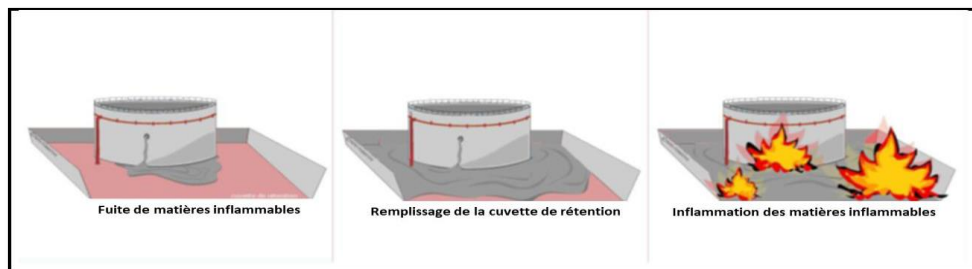


**Figure I.6 :** Flash fire [10].

#### **I.4.1.4. Le Feu de Nappe**

Le feu de nappe, ou feu de flaque, est un incendie provoqué par la combustion à la surface d'un liquide inflammable répandu sur une surface plane. Ce phénomène résulte de la vaporisation du liquide au contact de l'air et de l'ignition des vapeurs formées. Il se produit lorsque deux conditions sont réunies : la présence d'un liquide inflammable (comme les hydrocarbures ou solvants) à une température supérieure à son point éclair, et une source d'ignition (étincelle, flamme, point chaud, etc.). Ce type d'incendie peut survenir à la suite d'une fuite, d'un débordement ou d'un renversement accidentel, et la combustion se manifeste principalement à la surface exposée à l'air.

On distingue trois types principaux de feux de nappe : les feux de cuvette de rétention, qui se développent dans des zones confinées prévues pour recueillir les liquides et peuvent générer une grande flamme et une chaleur intense ; les feux de réservoirs, causés par la fuite ou la rupture d'un réservoir, avec risque d'embrassement étendu et d'effets domino sur les installations voisines ; et les feux de flaque, formes plus localisées, résultant du renversement accidentel d'un liquide inflammable, qui peuvent malgré leur petite taille se propager rapidement si les conditions le permettent.



**Figure I.7** : Feu de nappe [10].

#### **I.4.1.5. L'UVCE (Explosion d'un Nuage de Gaz en Atmosphère Libre)**

L'UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion) est une explosion redoutable qui survient en plein air lorsque, à la suite d'une fuite massive, un nuage de gaz ou de vapeur inflammable se mélange à l'air et atteint une concentration explosive, s'enflammant alors brutalement au contact d'une source d'ignition.

Bien que non confinée, cette explosion peut produire des effets thermiques et mécaniques très destructeurs, notamment une boule de feu intense, un rayonnement thermique capable de causer de graves brûlures et une onde de surpression susceptible d'endommager gravement les structures environnantes, en fonction de la quantité de gaz libéré, du type de produit, de la turbulence du mélange et de la configuration du site.

Les conséquences incluent la destruction d'installations, des projections de débris, l'effondrement de bâtiments et la mise en danger des personnes. En outre, l'UVCE présente des risques combinés d'incendie et d'explosion pouvant entraîner des effets domino, compliquer les opérations de secours et provoquer une pollution atmosphérique, ce qui en fait un scénario particulièrement redouté dans les environnements industriels.

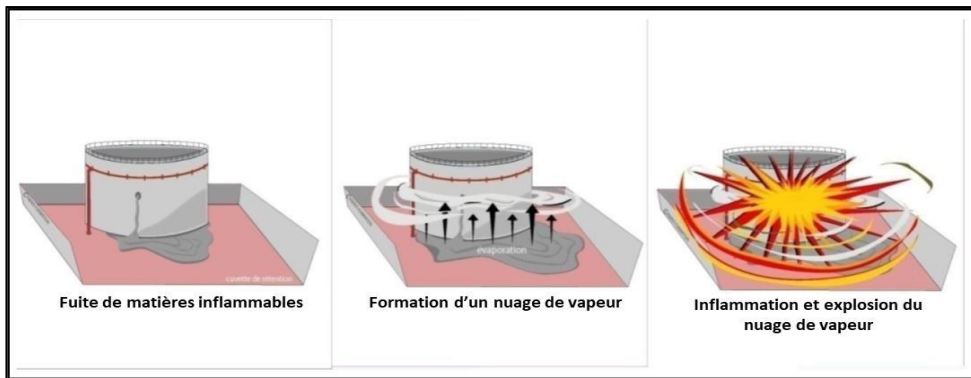


Figure I.8 : Phénomène d'UVCE [11].

#### I.4.1.6. Le BLEVE (Explosion de Vapeur en Expansion de Liquide en Ébullition)

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) est une explosion particulièrement violente de nature physique et thermique, qui se produit lorsqu'un réservoir sous pression contenant un liquide à haute température se rompt brutalement, généralement à la suite d'un incendie, d'un choc ou d'un sur-remplissage. Cette rupture entraîne une vaporisation instantanée du liquide, générant une onde de choc, des projections de débris et, si le produit est inflammable, une boule de feu spectaculaire.

Le processus suit quatre étapes : montée en pression, affaiblissement du réservoir, vaporisation explosive du liquide et inflammation de l'aérosol formé.

Les causes principales incluent l'exposition à une source de chaleur externe, un impact mécanique ou un sur-remplissage.

Les conséquences d'un BLEVE sont redoutables : onde de surpression destructrice, projections de fragments métalliques à grande distance, et boule de feu capable de causer de graves brûlures, d'allumer de nouveaux incendies et de déclencher des effets domino sur les installations environnantes.

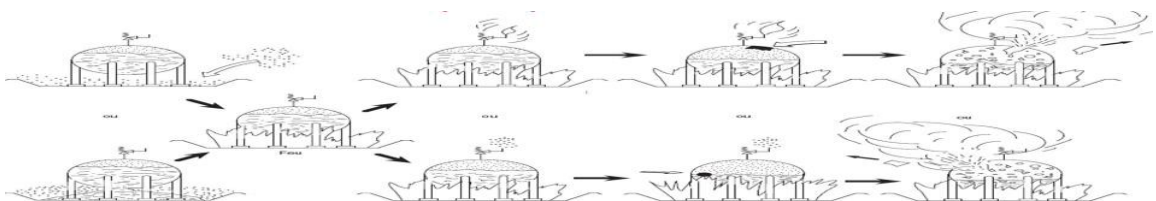


Figure I.9 : Les étapes du BLEVE [11].

## I.5. Processus de gestion des risques dans les systèmes industriels

La gestion des risques désigne l'ensemble des actions coordonnées visant à maîtriser les risques et à les ramener à un niveau jugé acceptable ou tolérable. Il s'agit d'un processus itératif et dynamique, composé de plusieurs étapes successives, dont l'enchaînement est illustré à la figure.

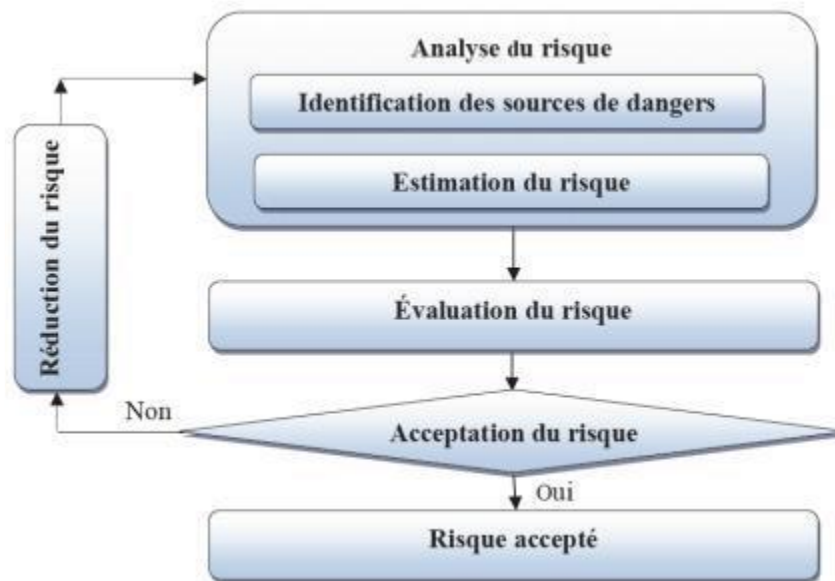


Figure I.10 : Processus de gestion des risques [12].

Ces différentes phases sont brièvement explicitées comme suit :

- **Analyse du risque** : Cette étape comprend deux sous-phases [13] :
  - **Identification des risques** : Recensement systématique des situations dangereuses en répondant aux questions : que peut-il arriver ? quand ? où ? comment ? pourquoi ?
  - **Estimation du risque** : Évaluation de la gravité et de la probabilité d'occurrence des événements identifiés, à l'aide de méthodes comme APR, AMDEC, HAZOP, AdD.

- **Évaluation du risque** : Comparaison des risques estimés avec les niveaux de risques acceptables, définis en collaboration avec les parties prenantes [14].
- **Acceptation du risque** : consiste à positionner les risques estimés sur une matrice d'évaluation afin d'en juger l'acceptabilité. Cette matrice permet de visualiser le niveau de risque en fonction de sa gravité et de sa probabilité. Si le risque évalué est conforme aux critères prédéfinis, il est considéré comme acceptable et le processus peut être clôturé. En revanche, si le niveau de risque dépasse les seuils tolérés, des actions supplémentaires doivent être envisagées, ce qui conduit à l'étape suivante de réduction du risque.
- **Réduction du risque** : intervient lorsque le niveau de risque est jugé inacceptable. Elle consiste à mettre en œuvre des mesures correctives visant soit à diminuer la probabilité d'occurrence d'un événement dangereux (prévention), soit à en limiter les conséquences en cas de survenue (protection). Ces actions doivent permettre d'atteindre un niveau de risque tolérable [15].

## **I.6. Prévention et maîtrise des risques**

La prévention et la maîtrise des risques sont essentielles pour assurer la sécurité dans les environnements industriels. Elles visent à anticiper les dangers, réduire leur probabilité d'occurrence, et limiter leurs conséquences [14].

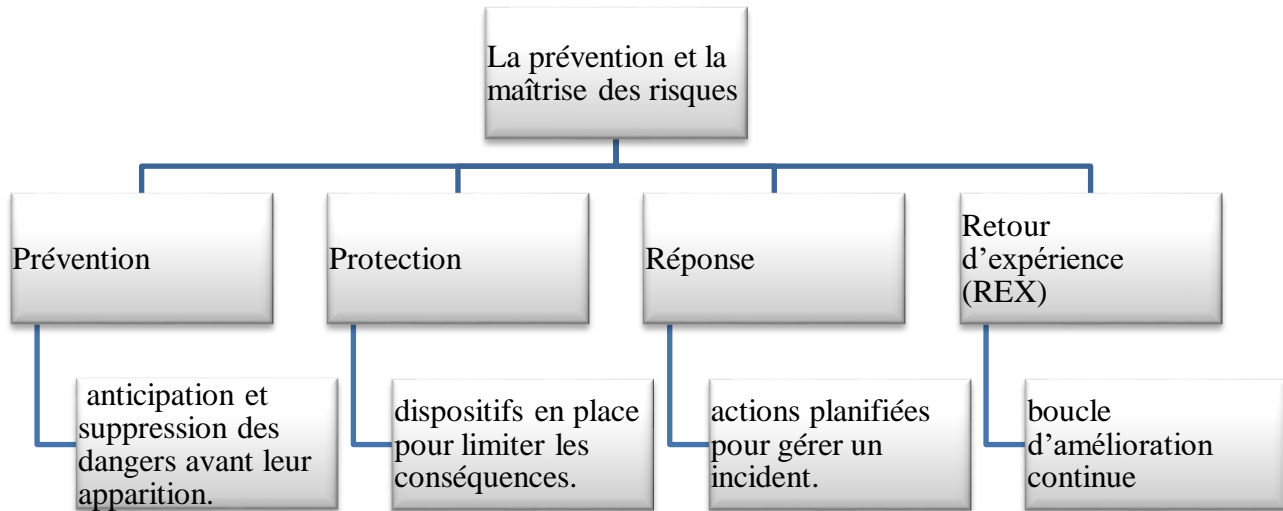
La prévention agit en amont à travers une conception sécurisée des installations, une maintenance rigoureuse, la formation du personnel, et l'application stricte de procédures.

Quand les risques persistent, des moyens de protection collectifs (barrières, alarmes, arrêts d'urgence, ventilation) et individuels (EPI) sont mis en œuvre pour protéger les personnes et l'environnement.

En cas d'accident, des plans d'urgence (POI et PPI) assurent une réponse rapide et coordonnée, renforcée par une gestion de crise structurée et des exercices réguliers [15].

Enfin, une démarche de retour d'expérience (REX) permet d'analyser les incidents, d'améliorer continuellement les pratiques, d'intégrer la culture sécurité dans l'organisation, et d'adapter les procédures aux évolutions du contexte industriel [16].

Le schéma ci-dessous illustre les quatre piliers essentiels de cette démarche : la prévention, la protection, la réponse et le retour d'expérience.



**Figure I.11 :** Les étapes fondamentales de la prévention et de la maîtrise des risques.

### **I.7 Conclusion**

La gestion des risques industriels nécessite une approche rigoureuse et structurée, fondée sur l'analyse des dangers et la mise en place de mesures de prévention adaptées. Le respect du principe ALARP permet d'assurer un équilibre entre sécurité et faisabilité technique ou économique. Face aux risques majeurs et aux phénomènes redoutables comme les BLEVE ou les incendies, il est essentiel de développer une culture de sécurité forte et proactive. Ce chapitre pose ainsi les bases indispensables à toute démarche de maîtrise des risques, pilier fondamental de la sécurité industrielle moderne.

**CHAPITRE II**  
**Les Systèmes Instrumentés de**  
**Sécurité (SIS)**

## **II.1. Introduction**

Dans les industries modernes, la sécurité est un enjeu majeur. Face aux risques liés aux procédés industriels, il est essentiel de mettre en place des systèmes capables de détecter les situations dangereuses et d'agir automatiquement pour éviter les accidents. C'est exactement le rôle des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS).

Ce chapitre vous permettra de découvrir les principes de fonctionnement des SIS, leur structure, leur importance, ainsi que les normes qui les encadrent. Nous aborderons également des notions clés comme le niveau SIL, les fonctions de sécurité (SIF), et les outils utilisés dans la conception et la maintenance de ces systèmes.

## **II.2. Définition de la sécurité fonctionnelle**

Selon la norme **IEC 61508** [7], la sécurité fonctionnelle représente une partie de la sécurité globale, définie comme étant celle qui dépend du bon fonctionnement d'un système ou d'un équipement en réponse à ses entrées. Cette approche met l'accent sur la fiabilité des systèmes pour assurer la sécurité. De son côté, la norme IEC 61511[17] qui s'applique plus spécifiquement aux industries de procédés, définit la sécurité fonctionnelle comme un sous-ensemble de la sécurité globale lié aux systèmes de commande des procédés (BPCS). Elle repose sur le bon fonctionnement du système instrumenté de sécurité (SIS) ainsi que sur d'autres couches de protection contribuant à la prévention des incidents [18].

## **II.3. Le système instrumenté de sécurité (SIS)**

### **II.3.1. Définition du Système Instrumenté de Sécurité (SIS)**

Le système instrumenté de sécurité (SIS), tel que défini par la norme CEI 61511 [17], regroupe des capteurs, une unité logique et des actionneurs pour assurer des fonctions de sécurité. Selon la norme CEI 61508 [7], ces systèmes font appel à des technologies électriques, électroniques ou programmables (E/E/EP). Utilisés comme dispositifs de prévention, les SIS visent à ramener un procédé à un état sûr en cas de danger. Leur complexité rend cependant l'identification des défaillances difficile par une simple analyse comportementale [19].

### II.3.2. Structure d'un Système Instrumenté de Sécurité

Un système instrumenté de sécurité (SIS) se compose d'éléments reliés entre eux, incluant au minimum un capteur, une unité de traitement et un actionneur connectés en série [20]. Ce sont :

➤ Capteur :

Un capteur convertit une grandeur physique (température, pression, gaz, etc.) en un signal électrique mesurable, utilisé pour surveiller ou contrôler un processus. Par exemple, un capteur de gaz détecte un gaz dangereux et transmet l'information à l'unité de traitement.

➤ Unité de traitement :

L'unité de traitement est un élément central du SIS : elle interprète les données des capteurs et déclenche les actions appropriées. Elle peut utiliser des technologies **câblées** (relais, composants logiques physiques) ou **programmées** (automates, systèmes numériques, microprocesseurs).

➤ Actionneurs :

Les actionneurs convertissent un signal en action physique, permettant de contrôler des équipements comme des vannes, moteurs ou pompes. Ils se distinguent selon leur source d'énergie : **pneumatiques** (air comprimé), **hydrauliques** (fluide sous pression) et **électriques** (énergie électrique).

La figure montre la structure type d'un SIS, avec ses trois composants clés ( capteur, unité de traitement et actionneur ) agissant en série pour garantir la sécurité.

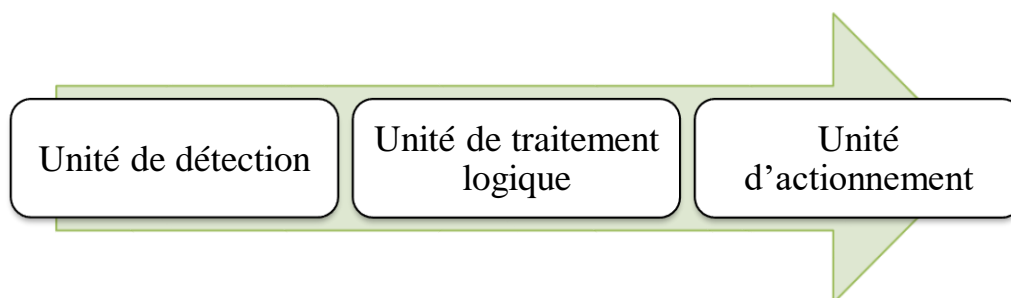


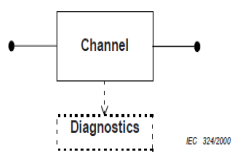
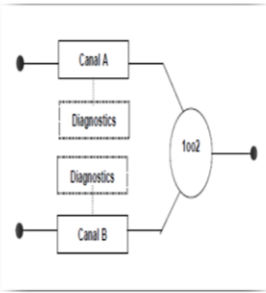
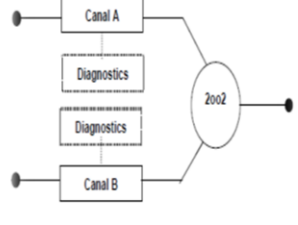
Figure II.1: La structure d'un SIS.

II.4. Architectures et logiques de redondance

La norme CEI 61508 considère que chaque sous-système est constitué d'un ensemble de canaux identiques suivant une logique majoritaire KooN : le sous-système fonctionne si au moins K composants fonctionnent parmi les N disponibles [7].

Le tableau présente les architectures les plus fréquentes ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Tableau II.1 : Comparatif des architectures courantes.

Architecture	Description	Schéma	Avantages	Inconvénients
<b>1oo1</b>	1 seul canal, il doit fonctionner pour assurer la fonction de sécurité.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicité</li> <li>- Coût faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de redondance</li> <li>- Faible tolérance aux pannes</li> </ul>
<b>1oo2</b>	2 canaux disponibles, 1 seul doit fonctionner pour la sécurité.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meilleure disponibilité</li> <li>- Fonctionne même si un canal est défaillant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risque de fausse alarme si un canal dysfonctionne</li> </ul>
<b>2oo2</b>	2 canaux disponibles, les 2 doivent fonctionner pour la sécurité.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très faible probabilité de fausse action</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Moins de disponibilité (si un seul canal tombe en panne, le système ne peut plus fonctionner)</li> </ul>

				fonctionner)
<b>2oo3</b>	3 canaux disponibles, 2 doivent fonctionner pour la sécurité.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bonne fiabilité</li> <li>- Bonne tolérance aux pannes</li> <li>- Réduit les fausses alarmes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plus coûteux</li> <li>- Système plus complexe</li> </ul>
<b>1oo3</b>	3 canaux disponibles, 1 seul doit fonctionner pour la sécurité.		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellente disponibilité</li> <li>- Très forte tolérance aux pannes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risque plus élevé de fausse activation</li> </ul>

## II.5. Les modes de fonctionnement d'un SIS

Le mode de fonctionnement d'une fonction de sécurité se définit en fonction de la fréquence à laquelle elle est sollicitée. On distingue généralement trois types :

- Fonctionnement à faible sollicitation : la fonction de sécurité n'intervient qu'en cas de besoin, dans le but de placer l'EUC dans un état sécurisé préétabli. Ce mode est caractérisé par une fréquence d'activation ne dépassant pas une fois par.
- Fonctionnement à sollicitation fréquente : similaire au mode précédent en termes d'activation sur demande, mais avec une fréquence supérieure à une fois par an.
- Fonctionnement en continu : ici, la fonction de sécurité agit en permanence afin de maintenir l'EUC dans un état de sécurité constant, même en conditions normales de fonctionnement [7].

## II.6. Approche normative et cycle de vie de sécurité

### II.6.1. Référentiel normatif des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)

Les normes CEI 61508 et CEI 61511 encadrent l'ensemble du cycle de vie des Fonctions de Sécurité Instrumentées (SIF), en définissant les exigences d'intégrité (SIL), d'architecture et de performance des SIS, en fonction des risques associés.

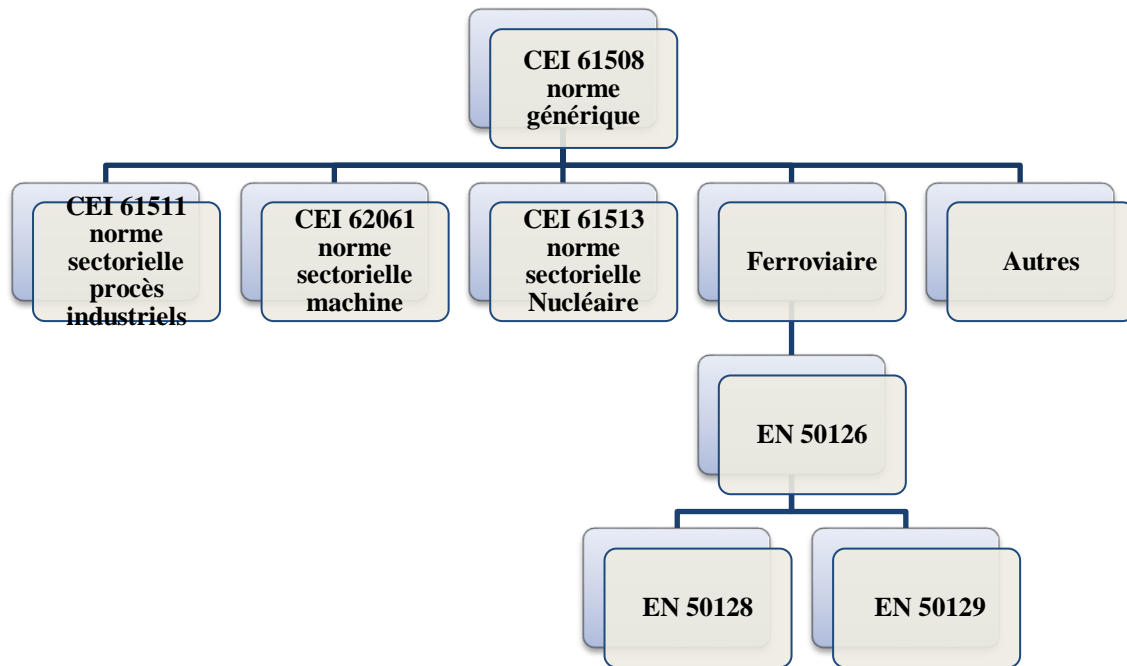
#### **II.6.1.1. CEI 61508 – Sécurité fonctionnelle des systèmes E/E/PE relatifs à la sécurité**

La norme CEI 61508 constitue la référence de base pour la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables (E/E/PE). Elle sert de fondement à de nombreuses normes sectorielles (industries de procédés, ferroviaire, nucléaire, machines, etc.). Son objectif principal est de réduire les risques de défaillances dangereuses des systèmes E/E/PE, tout en intégrant les avancées technologiques. Elle propose une approche flexible, fondée sur l'analyse des risques, permettant de définir les niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) requis. La norme couvre l'ensemble du cycle de vie des systèmes, de l'étude des risques à leur mise hors service, et prend en compte tous les sous-systèmes matériels et logiciels. Elle impose également des exigences précises en matière de conception, de gestion des défaillances et de performance. Structurée en sept parties, la CEI 61508 définit les principes généraux (partie 0), les exigences pour le matériel (partie 2) et les logiciels (partie 3), les méthodes d'évaluation des SIL (partie 5), ainsi que les lignes directrices d'application (parties 6 et 7).

##### **II.6.1.1.1. Normes sectorielles dérivées :**

Plusieurs normes sectorielles dérivent de la CEI 61508 pour répondre aux exigences spécifiques de différents domaines industriels. La CEI 61511 s'applique aux industries de procédés, en adaptant les principes de la CEI 61508 à la gestion des SIS sur les sites industriels. La CEI 62061 est dédiée à la sécurité des machines, en traitant des systèmes de commande électroniques. Pour le secteur nucléaire, la CEI 61513 adapte la norme de base aux exigences de sûreté propres aux centrales. Enfin, dans le domaine ferroviaire, les normes CEI 50126 et EN 50128 couvrent respectivement la sûreté de fonctionnement globale et les aspects logiciels des systèmes de signalisation.

La figure montre la norme CEI 61508 générique et ses normes filles par secteur d'activité :



**Figure II.2 :** La norme CEI 61508 et ses normes filles [21].

### II.6.1.2. Norme IEC 61511 – Systèmes Instrumentés de Sécurité pour les industries de Procédés

La norme IEC 61511 est spécifiquement destinée aux industries de transformation telles que la chimie, la pétrochimie ou la pharmaceutique. Elle adapte les principes de la norme mère IEC 61508 aux particularités des procédés industriels, qu'ils soient continus ou discontinus. Son objectif principal est de structurer la mise en œuvre des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) à travers le cycle de vie de sécurité, en définissant les exigences de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) et en intégrant les SIS dans une stratégie de protection globale. La norme repose sur une analyse rigoureuse des dangers, l'attribution des exigences de sécurité aux fonctions critiques, et une approche technologique ouverte. Elle couvre l'ensemble du cycle de vie, de la conception initiale jusqu'au déclassement du système, tout en assurant la gestion de la sécurité fonctionnelle via une documentation complète, la traçabilité et le suivi des modifications. Structurée en trois parties, l'IEC 61511 fournit un cadre général (partie 1), des lignes directrices d'application (partie 2), et des outils pour déterminer les SIL requis (partie 3) [21].

### II.6.1.3. Positionnement par rapport à l'IEC 61508

IEC 61511 est sectorielle : elle traduit les exigences génériques de la CEI 61508 pour les industries de transformation. Elle constitue une mise en œuvre opérationnelle des concepts de sécurité fonctionnelle, adaptée aux réalités industrielles du terrain.

Tandis que la CEI 61508 cible les fabricants de composants et systèmes, l'IEC 61511 s'adresse aux exploitants et intégrateurs de procédés industriels.

**II.6.2. Cycle de vie de sécurité (selon IEC 61508)**

Le cycle de vie de sécurité proposé par la norme CEI 61508 décrit les étapes clés pour garantir la sécurité fonctionnelle d'un système E/E/PE (électrique/électronique/électronique programmable). Ce cycle couvre l'ensemble du cycle de vie d'un système de sécurité, depuis sa conception jusqu'à sa mise hors service, et il est structuré en plusieurs phases [6].

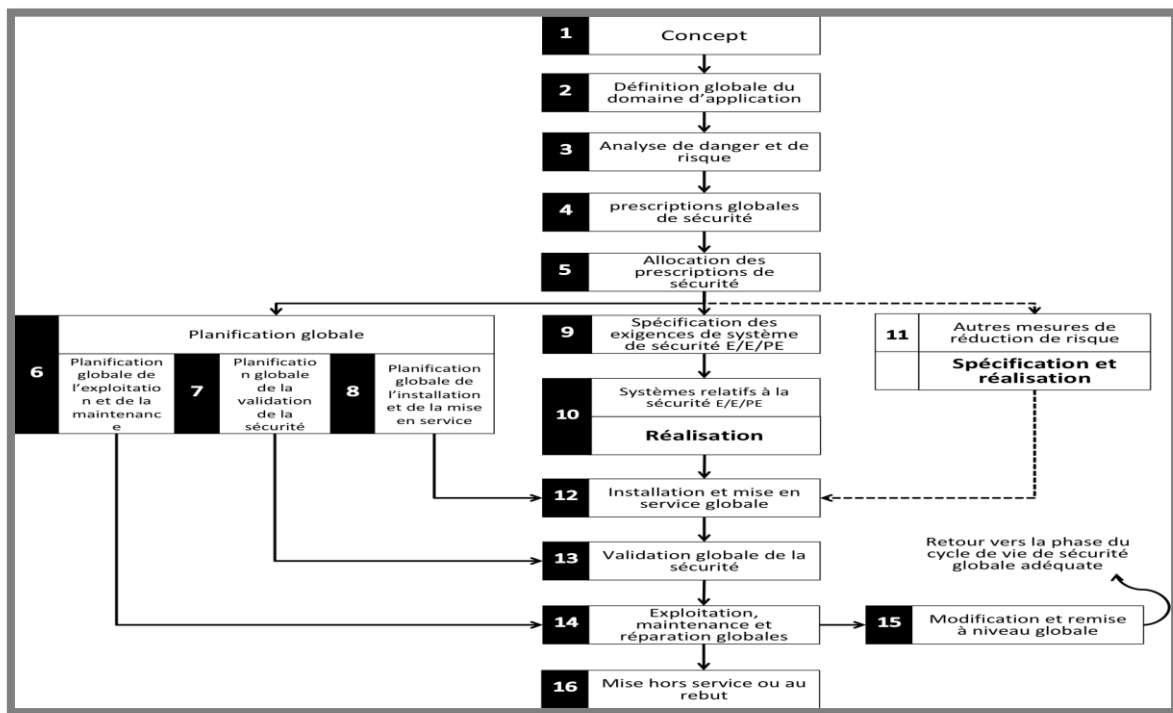
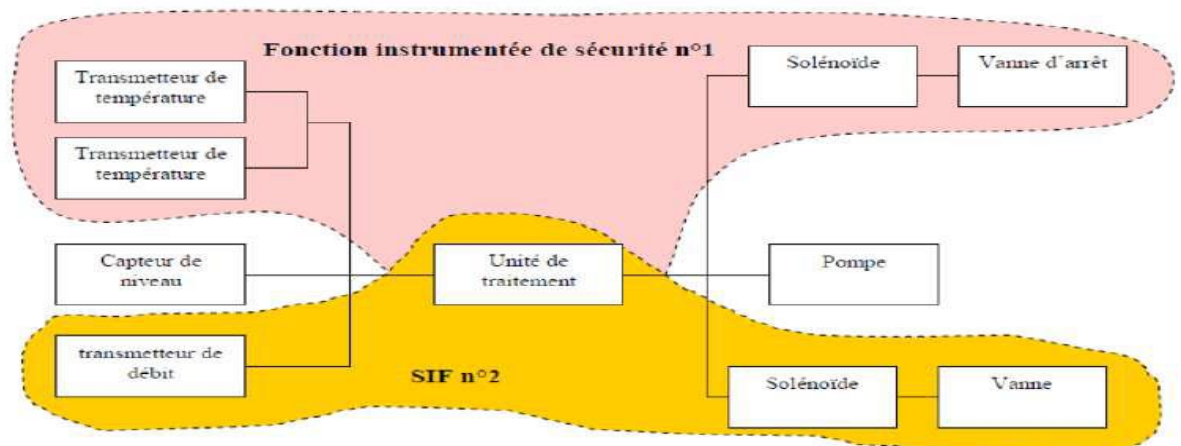


Figure II.3 : Cycle de vie de sécurité global proposé par la norme CEI 61508 [7].

**II.7. Définition de SIF (Safety Instrumented Function)**

Une fonction instrumentée de sécurité (SIF - Safety Instrumented Function) est une fonction de sécurité mise en œuvre au sein d'un système instrumenté de sécurité (SIS). Elle vise à atténuer ou à prévenir un danger dans un processus industriel.

Chaque SIF a pour objectif de déclencher automatiquement des mesures correctives lorsqu'une situation dangereuse est détectée, comme l'arrêt d'un processus, la fermeture d'une vanne ou l'isolement d'un équipement, afin d'éviter un accident.



**Figure II.4 :** Fonction instrumenté de sécurité [22].

## II.8. Définition de SIL (Safety Integrity Level)

Les performances d'une SIF sont généralement mesurées en termes de SIL (Safety Integrity Level), qui représente le niveau de fiabilité et de sécurité requis pour le système.

Il existe quatre niveaux de SIL, allant de SIL 1 (le moins strict) à SIL 4 (le plus strict). Chaque SIF doit être conçue pour atteindre un SIL approprié, en fonction de la gravité du danger qu'elle est destinée à prévenir.

Les SIL sont utilisés pour spécifier les exigences de sécurité des fonctions de sécurité mises en œuvre par des systèmes électriques, électroniques ou électroniques programmables (E/E/EP), conformément à la norme IEC 61508 [7].

Le SIL 4 correspond au niveau de sécurité le plus élevé, exigé dans des situations où les risques sont critiques, tandis que le SIL 1 correspond à l'exigence la plus faible [23].

## **II.9. Évaluation et Validation de l'Intégrité de Sécurité des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)**

### **II.9.1. Analyse des risques et identification des événements dangereux**

L'analyse des risques constitue la première étape essentielle dans la conception d'un système de sécurité. Elle repose sur une évaluation méthodique des informations disponibles afin d'identifier les scénarios d'accident potentiels, d'en estimer les risques en fonction de leur gravité et de leur probabilité, puis de les comparer aux objectifs de sécurité fixés. Si les risques identifiés dépassent les seuils acceptables, des mesures de réduction doivent être mises en place, notamment des barrières techniques comme les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS). Cette analyse s'appuie sur des méthodes structurées telles que l'étude HAZOP (Hazard and Operability Study).

#### **II.9.1.1. Méthode HAZOP (HAZard and OPerability Study)**

La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) est une approche qualitative, systématique et inductive utilisée pour identifier les risques et les dysfonctionnements potentiels d'un système industriel, qu'il soit en phase de conception ou déjà existant.

Son objectif principal est de détecter les déviations possibles par rapport au fonctionnement attendu, en vue de renforcer la sécurité et l'efficacité opérationnelle. Fondée sur l'utilisation de mots-guides appliqués à des paramètres clés (comme la pression, le débit ou la température), elle permet d'identifier les déviations, leurs causes, leurs conséquences et les mesures de maîtrise correspondantes [24].

La méthodologie HAZOP repose sur un découpage du procédé en « nœuds d'étude », à partir des schémas P&ID, et sur l'analyse rigoureuse de chaque nœud. Pour chaque paramètre, un mot-guide est appliqué afin de formuler une déviation, en identifier les causes, analyser les effets potentiels et examiner les dispositifs de sécurité existants. Cette démarche aboutit à des recommandations concrètes visant à corriger les faiblesses détectées. Les résultats sont ensuite formalisés dans un rapport structuré servant de référence pour les actions de sécurité [25].

La présentation des résultats de l'analyse HAZOP se fait à l'aide d'un tableau structuré appelé **feuille HAZOP**

Date :								
Ligne ou équipement :								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Observations

**Figure II.5** : Exemple d'un tableau pour l'HAZOP.

### II.9.2. Détermination du niveau d'intégrité de sécurité requis (SIL requis)

Une fois les scénarios de risques identifiés, il est nécessaire de déterminer le niveau de performance que doivent atteindre les fonctions de sécurité instrumentées (SIF) pour ramener chaque risque à un niveau acceptable. Ce niveau de performance est appelé SIL (Safety Integrity Level).

Le SIL requis dépend directement du niveau de risque initial et des objectifs de sécurité définis. Pour déterminer ce niveau, on utilise des méthodes d'évaluation du risque résiduel, telles que :

- **Graphe de risque** : outil graphique reliant fréquence et gravité des événements.
- **Matrice de gravité** : croisement des conséquences et de la probabilité d'occurrence.
- **Analyse des couches de protection (LOPA)** : identification des barrières indépendantes entre le danger et la conséquence.
- **Méthodes avancées** : utilisation d'arbres de défaillances (AdD) et/ou d'arbres d'événements (AdE) pour modéliser les scénarios d'accident

#### II.9.2.1. Le graphe de risque

Cette méthode a été introduite par la norme allemande DIN V 19250 [26], 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 :  $R = f \cdot C$ , où f et C sont respectivement la fréquence et la conséquence de l'événement dangereux en l'absence de SIS. La fréquence de l'événement dangereux f est généralement composée de trois facteurs :

F : fréquence et durée d'exposition au danger,

P : possibilité pour les personnes d'éviter ou de limiter l'événement,

W: probabilité intrinsèque de survenue de l'événement sans protection.

Ces paramètres (C, F, P, W), une fois pondérés et calibrés selon le contexte spécifique de l'installation (secteur d'activité, réglementation, politiques internes de sécurité), permettent d'attribuer un SIL requis au scénario étudié [26].

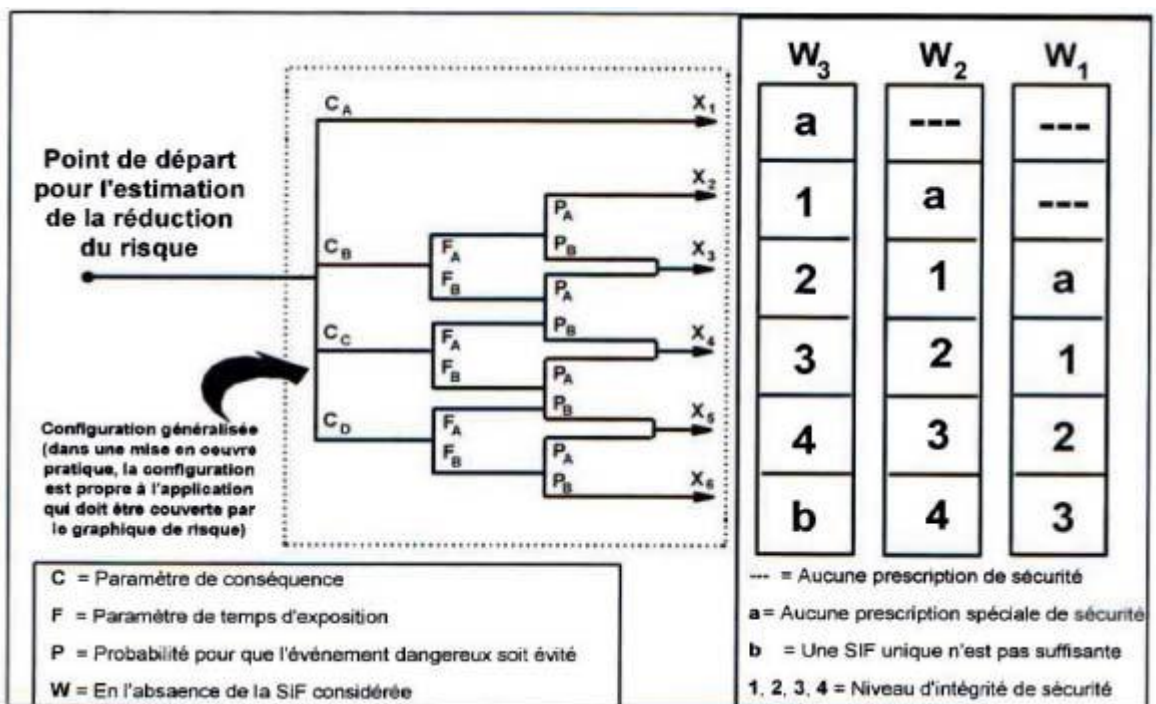


Figure II.6 : schéma général du graphe des risques.

Tableau II.3 : Description des paramètres du graphe de risque pour les industries de transformation.

Paramètre		Description
Conséquence	C	Nombre d'accidents mortels et/ou de lésions graves susceptibles de se produire suite à l'occurrence de l'événement dangereux. Ce paramètre est déterminé en calculant les nombres dans la zone exposée lorsque la zone est occupée en tenant compte de la vulnérabilité à l'événement dangereux.
Occupation	F	Probabilité que la zone exposée soit occupée au moment où l'événement dangereux se produit. Ce paramètre est déterminé en calculant la fraction de temps durant laquelle la zone est occupée au moment où se produit l'événement dangereux. Cela peut tenir compte de la possibilité d'avoir une augmentation de la probabilité que des personnes soient présentes dans la zone exposée, afin de déterminer les situations anormales qui peuvent exister au moment de l'apparition de l'événement dangereux (vérifier aussi si cela modifie le paramètre C).
Probabilité que le danger soit évité	P	Probabilité que des personnes exposées puissent éviter la situation dangereuse qui existe en cas de défaillance de la fonction instrumentée de sécurité (SIF) sur sollicitation. Cela dépend de la présence de méthodes indépendantes utilisées pour avertir les personnes exposées au danger avant que le danger ne se produise, ainsi que de la présence de méthodes d'évacuation.
Taux de sollicitation	W	Nombre de fois par an où l'événement dangereux se produirait en l'absence de la SIF à l'étude. Ce paramètre peut être déterminé en tenant compte de toutes les défaillances pouvant provoquer l'événement dangereux et en évaluant le taux global d'occurrence. Il convient d'inclure d'autres couches de protection à l'étude.

### II.9.2.2. Matrice de gravité (ou matrice de risque à couches de protection)

Cette méthode est similaire au graphe de risque, mais s'applique dans les cas où la fréquence d'occurrence ne peut pas être estimée de manière précise.

La démarche adoptée pour l'évaluation du risque et la détermination des besoins en sécurité instrumentée repose sur plusieurs étapes clés :

- Identifier les scénarios dangereux (type d'événement et conséquences),
- Estimer la gravité des conséquences et la fréquence plausible de survenue,
- Identifier les couches de protection indépendantes (IPL) déjà en place,
- Comparer le risque résiduel au niveau de risque tolérable.

Chaque couche de protection doit assurer une réduction du risque d'un facteur 10, soit un niveau SIL. Si les couches existantes ne permettent pas d'atteindre le niveau de sécurité cible, une fonction de sécurité instrumentée devra être mise en œuvre avec un SIL adapté [8].

La méthode suppose l'indépendance stricte entre les couches de protection, conformément à la CEI 61511.

Un exemple de matrice tridimensionnelle (gravité × fréquence × nombre d'IPL) peut être utilisé pour visualiser les besoins en réduction du risque, avec des cas-types :

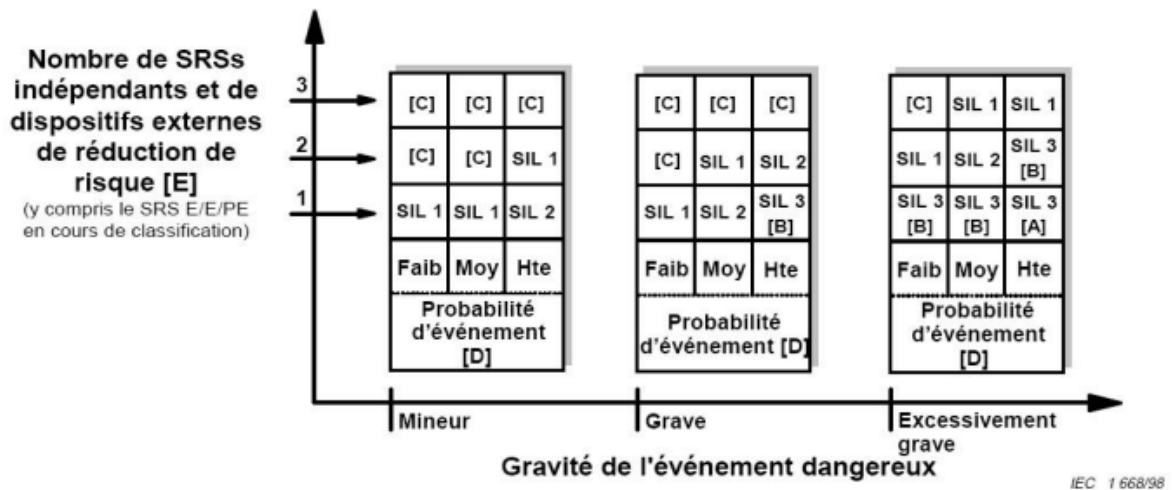


Figure II.7 : Exemple de matrice de gravité.

[A] : Un SRS SIL3 ne suffit pas à lui seul, des mesures supplémentaires sont nécessaires.

[B] : Le SRS SIL3 pourrait être insuffisant, une analyse complémentaire est requise.

[C] : Un SRS peut ne pas être requis.

[D] : Évalue la probabilité d'événement sans mesure de sécurité.

[E] : Intègre le nombre de couches indépendantes en lien avec le contexte applicatif.

### II.9.2.3. Méthode LOPA (Layers of Protection Analysis)

La méthode LOPA (Layer of Protection Analysis) est une approche semi-quantitative d'analyse des risques. Elle permet d'évaluer si les barrières de sécurité mises en place sont suffisantes pour maîtriser un scénario d'accident, en s'assurant que la fréquence d'une conséquence redoutée reste en dessous du seuil de risque tolérable. L'objectif principal de LOPA est de quantifier la fréquence d'un scénario dangereux, d'évaluer l'efficacité des couches de protection indépendantes (IPL) et de vérifier si le risque résiduel est acceptable. Elle repose sur le principe de superposition de différentes couches de protection, telles que les mesures de conception sûres, les systèmes de contrôle automatique, les systèmes instrumentés de sécurité (SIS), les dispositifs mécaniques ou passifs, les actions humaines et les mesures d'urgence. Recommandée par la norme CEI 61511, LOPA est également utilisée pour déterminer le niveau de SIL requis pour une fonction de sécurité instrumentée [27].

L'élaboration d'une analyse LOPA suit une séquence rigoureuse en **sept étapes principales** :

- **Définition des critères d'acceptabilité du risque** (ex. : fréquence maximale tolérée pour une conséquence donnée).
- **Développement et sélection d'un scénario d'accident représentatif.**
- **Identification de l'événement initiateur** (cause primaire) et **estimation de sa fréquence.**
- **Identification des couches de protection indépendantes (IPLs)** et **estimation de leur probabilité de défaillance à la demande (PFD).**
- **Calcul de la fréquence de la conséquence finale**, après prise en compte des IPLs.
- **Évaluation du risque résiduel** par comparaison à la tolérance définie.
- **Prise de décision** : maintien de l'état actuel, renforcement des IPLs ou mise en œuvre de mesures supplémentaires.



**Figure II.8** : Différentes couches de protection suivant LOPA.

LOPA présente de nombreux avantages qui expliquent son adoption croissante dans l'industrie de procédé [29]:

- **Méthode structurée et rationnelle** pour l'évaluation des risques et la prise de décision.
- **Simplicité et flexibilité** dans l'analyse, tout en intégrant des éléments quantitatifs (via les PFD par exemple).
- **Capacité à quantifier l'efficacité de chaque barrière de sécurité**, et à démontrer leur contribution à la réduction du risque.

- **Identification et justification du niveau de SIL requis** pour chaque SIF.
- **Gain de temps et de coût** par rapport à d'autres méthodes plus complexes comme l'arbre de défaillance.
- **Adaptabilité** à un grand nombre de scénarios, notamment ceux difficiles à évaluer de manière purement quantitative [28].

#### **II.9.2.4. Méthode de l'Arbre de Défaillances (AdD – Fault Tree Analysis : FTA)**

L'arbre de défaillances est une méthode déductive d'analyse des risques qui permet d'identifier les combinaisons d'événements ou de défaillances pouvant conduire à un événement redouté, appelé événement sommet [30]. Elle s'appuie sur une représentation graphique utilisant des symboles normalisés (comme les portes logiques) pour modéliser les scénarios de défaillance d'un système [31]. Son objectif principal est d'analyser les causes possibles d'un événement non souhaité, d'identifier les enchaînements de défaillances qui y mènent, d'évaluer la probabilité de son occurrence, et de déterminer où placer les barrières de sécurité pour empêcher que ces scénarios ne se réalisent [32].

Cette méthode permet donc à la fois une **compréhension approfondie du mécanisme de défaillance** et une **aide à la décision** pour le renforcement de la sécurité.

L'approche AdD part de l'événement final indésirable (événement sommet) pour remonter, étape par étape, vers les causes racines [33]. Cette analyse hiérarchique se fait à l'aide de **portes logiques** telles que :

- ET (AND) : l'événement ne se produit que si toutes les causes en entrée se produisent.
- OU (OR) : l'événement se produit si au moins une des causes en entrée se produit.
- M parmi N (k-out-of-n), inhibiteurs, etc. : utilisés selon la complexité du système

La construction d'un arbre de défaillances suit les étapes suivantes :

- Définir l'événement sommet, c'est-à-dire le scénario de défaillance principal à analyser (ex. : explosion, perte de confinement, arrêt de production).
- Identifier les causes immédiates ou événements intermédiaires susceptibles de provoquer cet événement.
- Analyser chaque événement intermédiaire en recherchant ses causes propres.

- Classer et structurer les causes identifiées en poursuivant l'arborescence.
- Répéter ces étapes jusqu'à atteindre les événements élémentaires, appelés événements de base (composants défaillants, erreurs humaines, conditions environnementales, etc.).
- Tracer l'arbre complet à l'aide de portes logiques appropriées, en veillant à la cohérence logique de l'ensemble.

L'arbre une fois construit peut être utilisé pour :

- **Analyser qualitativement** les causes dominantes de l'événement sommet,
- **Évaluer quantitativement** la **probabilité de l'événement redouté**, si les données de fiabilité des composants sont disponibles,
- **Simuler des scénarios de défaillance**,
- **Tester l'efficacité des barrières de sécurité** existantes ou envisagées,
- Identifier les points faibles du système à renforcer [34].

La méthode de l'arbre de défaillances offre une vision structurée et hiérarchique des mécanismes de défaillance, permettant une bonne traçabilité des causes et une transparence du raisonnement. Elle permet également de quantifier le risque en s'appuyant sur des données probabilistes. Cette méthode est particulièrement utile pour comparer différentes options de conception ou de stratégies de sécurité. Elle est reconnue et encadrée par des normes telles que l'IEC 61025 ou la MIL-STD-882.

#### **II.9.2.4. Arbre des Événements (AdE)**

L'Arbre des Événements (AdE) est une méthode déductive d'analyse des risques qui consiste à explorer les différentes conséquences possibles d'un événement initiateur, en fonction du bon fonctionnement ou non des barrières de sécurité en place (détection, alarme, protection, intervention, etc.). Contrairement à l'arbre de défaillances qui remonte des effets vers les causes, l'AdE part d'un événement initial pour analyser toutes les évolutions possibles en aval. Chaque branche de l'arbre représente une séquence d'événements selon l'activation ou l'échec des fonctions de sécurité. Lorsque les probabilités de fonctionnement des barrières sont connues, la méthode permet également de quantifier la probabilité de chaque scénario final.

« L'arbre d'événements part d'un événement et décrit les différentes conséquences qu'il peut avoir en fonction des conditions dans lesquelles il s'est produit et des événements avec lesquels il se combine. » [13]

La construction d'un Arbre des Événements commence par la définition de l'événement initiateur, tel qu'un incident, une défaillance ou une perturbation. Ensuite, il faut identifier les barrières de sécurité existantes, qu'elles soient préventives, de détection, d'alarme ou d'action corrective. L'arbre est ensuite construit en représentant toutes les combinaisons possibles de succès ou d'échec de ces barrières. Chaque branche correspond à un scénario de sortie, dont les conséquences doivent être analysées. Enfin, si les données sont disponibles, il est possible d'attribuer une probabilité à chaque scénario final pour en évaluer le niveau de risque.

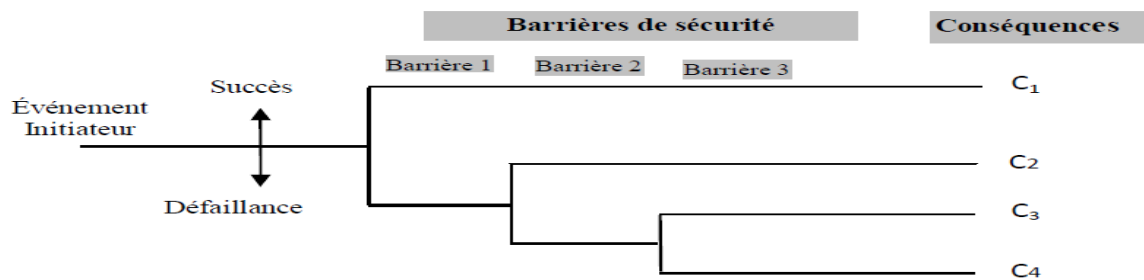


Figure II.9 : Schéma d'un AdE avec des barrières de sécurité.

### II.9.3. Classification et quantification des défaillances

La norme CEI 61508 propose une classification des défaillances dans les systèmes instrumentés de sécurité (SIS) selon deux critères principaux : les causes des défaillances et leurs effets sur la fonction de sécurité. Ces classifications permettent de mieux évaluer les risques et de mettre en œuvre des stratégies appropriées de prévention, de détection et de correction.

#### II.9.3.1. Classification selon les causes des défaillances

Selon la CEI 61508, on distingue principalement **deux grandes classes** de défaillances en fonction de leurs causes :

**✓ Défaillances aléatoires du matériel (physiques)**

Ces défaillances résultent de mécanismes de **dégradation physique** imprévisibles du matériel. Elles surviennent de manière aléatoire et rendent le SIS incapable d'assurer sa fonction de sécurité.

**Exemple :** une vanne bloquée en position fermée à cause de l'usure.

Les principales causes de ce type de défaillances sont :

- ✓ **Le vieillissement du matériel** (défaillances naturelles ou primaires),
- ✓ **L'exposition à des contraintes excessives** (défaillances secondaires), pouvant être dues à :
  - Des facteurs environnementaux (température, humidité, vibrations, etc.),
  - Des erreurs humaines (mauvaise manipulation, installation incorrecte, etc.).

**➤ Défaillances systématiques (fonctionnelles)**

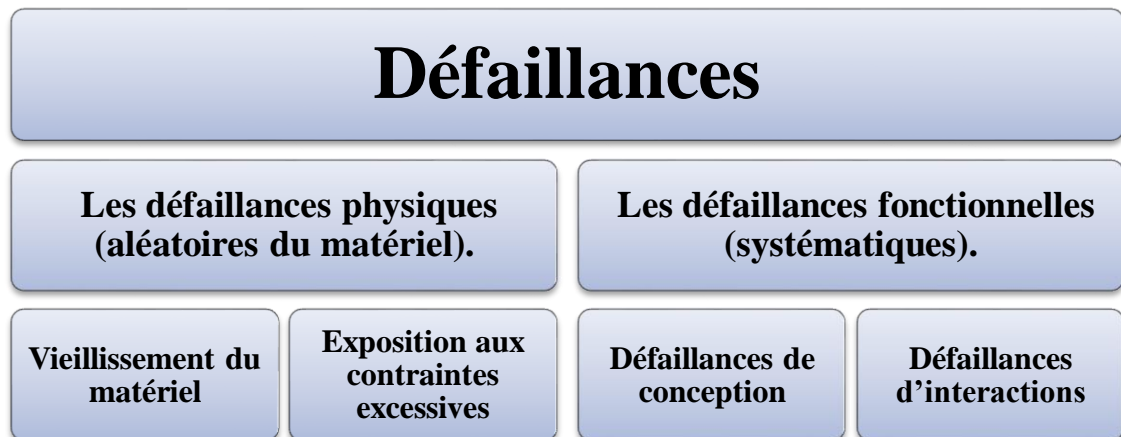
Il s'agit de défaillances **non aléatoires**, liées de manière déterministe à des erreurs dans la conception, la fabrication, l'exploitation ou la documentation du système.

**Exemple :** une erreur humaine conduisant à la fermeture incorrecte d'une vanne.

Ces défaillances n'entraînent pas de dégradation physique mais peuvent compromettre la fonction de sécurité du SIS. Elles se subdivisent en deux catégories :

- ✓ **Défaillances de conception** : introduites dès les phases initiales du cycle de vie du SIS, elles peuvent rester latentes et se manifester uniquement en phase opérationnelle.
- ✓ **Défaillances d'interaction** : causées par des erreurs humaines lors des phases d'exploitation, de maintenance ou de test.

Cette classification de défaillances est résumée à la figure :



**Figure II.10 :** Classification des défaillances selon leur causes.

### II.9.3.2 Classification selon les effets sur la fonction de sécurité

Toutes les défaillances (aléatoires ou systématiques) peuvent également être classées selon leur **impact sur la capacité du SIS à remplir sa fonction de sécurité**.

Alors peuvent être classées selon leurs effets sur la fonction de sécurité en deux grandes catégories :

- Défaillances en sécurité (safe failures)
- Défaillances dangereuses (dangerous failures)

Cependant, dans le contexte de la norme CEI 61508

- **Défaillance dangereuse :**

Une défaillance susceptible de placer le système lié à la sécurité dans un état dangereux ou de l'empêcher de remplir sa fonction de sécurité.

- **Défaillance en sécurité :**

Une défaillance qui ne compromet pas l'intégrité du système de sécurité, c'est-à-dire qu'elle ne le place pas dans un état dangereux ni ne l'empêche d'assurer sa fonction.

Compte tenu de cette décomposition, le taux de défaillance aléatoire du matériel de chaque canal ( $\lambda$ ) comporte deux composantes :

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_d$$

Avec :

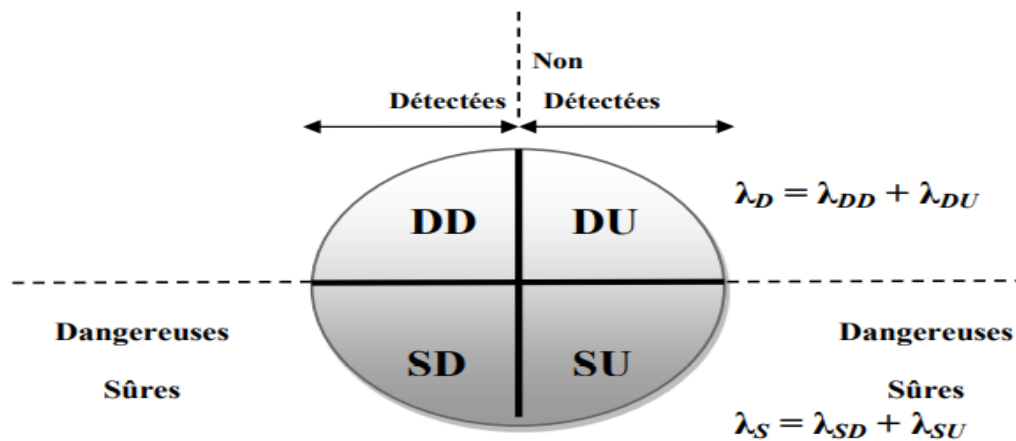
$\lambda_s$ : taux de défaillance aléatoire en sécurité du matériel,

$\lambda_d$ : taux de défaillance aléatoire dangereuse du matériel.

Une seconde classification repose sur la détectabilité des défaillances :

- ✓ Défaillances détectées (detected failures) : détectées automatiquement grâce aux tests de diagnostic en ligne.
- ✓ Défaillances non détectées (undetected failures) : ne sont identifiées que lors des tests périodiques hors ligne, ou lors d'une sollicitation réelle du système de sécurité (SIS) par l'EUC.

Un schéma récapitulatif est souvent utilisé pour illustrer cette double classification : selon l'effet sur la fonction de sécurité (sécurité ou dangerosité) et selon la détectabilité (détectée ou non détectée).



**Figure II.11** : Typologie des défaillances selon la norme CEI 61508 [7].

### II.9.3. Évaluation du SIL réalisé

L'évaluation du SIL réel, c'est-à-dire celui effectivement atteint par le SIS, repose sur :

- **Prescriptions de la CEI 61508**, à la fois qualitatives (exigences organisationnelles et de conception) et quantitatives (mesures chiffrées des performances).
- **Prescriptions qualitatives** : visant à garantir une intégrité systématique (maîtrise des erreurs humaines, qualité du développement, etc.).
- **Contraintes architecturales** :
  - Route 1H : tolérance aux fautes et proportion de défaillances sûres (SFF)
  - Route 2H : prise en compte des incertitudes dans les données
- **Calcul de la probabilité de défaillance dangereuse** :
  - PFD<sub>avg</sub> : probabilité moyenne de défaillance à la demande
  - PFH : fréquence moyenne de défaillance dangereuse (en fonctionnement continu ou forte demande)

## **II.10. Conclusion**

Les Systèmes Instrumentés de Sécurité sont essentiels pour réduire les risques dans les installations industrielles. Leur bonne conception, leur test régulier et leur maintenance assurent la protection des personnes et des équipements. Grâce à ce chapitre, vous avez acquis les bases nécessaires pour comprendre comment ces systèmes fonctionnent, comment ils sont évalués, et pourquoi ils sont cruciaux dans tout processus industriel. Cette compréhension est une étape fondamentale dans la formation de tout futur ingénieur en automatisation, sécurité ou maintenance industrielle.



# **CHAPITRE III**

## **Champ d'étude – Le complexe pétrochimique CP2K**

### **III.1. Introduction**

Ce chapitre a pour objectif de fournir un aperçu général du cadre dans lequel s'inscrit l'étude technique. Il présente d'abord le contexte industriel et institutionnel à travers une introduction à SONATRACH, acteur majeur du secteur des hydrocarbures en Algérie, ainsi qu'un rappel des fondements de l'industrie pétrochimique. L'étude se focalise ensuite sur l'unité CP2K, spécialisée dans la production de polyéthylène haute densité (PEHD), en détaillant son historique, son implantation géographique, son organisation et ses principaux équipements.

Une attention particulière est portée au système de stockage de l'héxène, co-monomère essentiel dans la synthèse du PEHD. Sont ainsi abordés les propriétés physico-chimiques de ce composé, les précautions liées à sa manipulation, les différentes étapes de traitement qu'il subit, ainsi que l'architecture technique du réservoir dans lequel il est stocké.

Cette présentation vise à offrir une compréhension complète du champ d'étude, préalable indispensable à l'analyse technique et à l'évaluation des systèmes de sécurité associés.

### **III.2. Contexte industriel**

#### **III.2.1. La Société Nationale SONATRACH**

Créée en 1963, SONATRACH (Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures) est l'entreprise publique algérienne chargée de la gestion du secteur des hydrocarbures. Depuis sa création, SONATRACH n'a cessé de se développer pour couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur du pétrole et du gaz.

Elle est aujourd'hui une société intégrée opérant sur toute la chaîne des hydrocarbures, de l'amont à l'aval, à savoir :

- Exploration et Production (E&P)
- Transport par canalisation (TRC)
- Liquéfaction du gaz (LQS)
- Raffinage et Pétrochimie (RPC)

- Commercialisation des produits pétroliers et gaziers (COM)

Grâce à cette intégration, SONATRACH s'est imposée comme un acteur majeur du secteur énergétique à l'échelle nationale et internationale, contribuant significativement à l'économie algérienne [35].

### **III.2.2. L'industrie pétrochimique en Algérie**

Au cours du siècle dernier, la chimie et le pétrole évoluaient séparément : la première produisait principalement des colorants, tandis que le second servait essentiellement à l'alimentation des lampes à huile. Pendant longtemps, ces deux secteurs se sont ignorés. Ce n'est qu'à la veille, puis surtout durant la Seconde Guerre mondiale, qu'un rapprochement s'est opéré entre les deux, donnant naissance à une nouvelle branche industrielle : la pétrochimie.

La pétrochimie désigne l'ensemble des procédés industriels visant à transformer les dérivés du pétrole en produits chimiques. À partir de cette matière première, on distingue généralement trois grandes catégories de produits pétrochimiques :

- Les produits de base : obtenus directement par reformage ou craquage des fractions pétrolières. Parmi eux, on retrouve l'ammoniac, l'éthylène, le propylène, le butadiène ainsi que les composés aromatiques (benzène, toluène, etc.).
- Les produits intermédiaires : ces substances servent de matières premières à la fabrication des polymères, bien qu'elles puissent également être utilisées telles quelles dans certaines applications finales.
- Les polymères : subdivisés en trois groupes principaux : les résines plastiques (ex. : polyéthylène, PVC), les fibres synthétiques (ex. : polyester, nylon), et les élastomères (ex. : caoutchouc synthétique) .

En Algérie, l'industrie pétrochimique repose principalement sur deux complexes industriels et une unité spécialisée dans la production de polyéthylène haute densité (PEHD) :

- Le Complexe Éthylène & Dérivés (CP1K) situé à Skikda : Il produit de l'éthylène, du polyéthylène basse densité, du polychlorure de vinyle (PVC), de la soude, de l'acide chlorhydrique (HCl), ainsi que du chlorure de vinyle monomère (VCM).

- L'Unité PEHD (POLYMED) : également située à Skikda , Elle est spécialisée dans la production de polyéthylène à haute densité.
- Le Complexe Méthanol & Dérivés (CP1Z) : situé à Arzew , Il produit du méthanol, du formaldéhyde, des formuées, ainsi que diverses résines [36].

**Remarque :** Le complexe CP1K a été mis à l'arrêt en 2013. Par conséquent, l'unité POLYMED est obligée d'importer l'éthylène, un gaz très coûteux, ce qui perturbe la régularité de sa production.

### **III.3. Le complexe CP2K**

#### **III.3.1. Présentation générale de l'unité CP2K**

Le complexe CP2K est une unité industrielle spécialisée dans la production de polyéthylène haute densité (PEHD), avec une capacité annuelle de 130 000 tonnes. Ce produit est destiné à la commercialisation tant sur le marché local qu'international.

Pour son fonctionnement, le complexe CP2K utilise plusieurs matières premières, dont :

- L'héxène, importé par conteneur, avec une capacité de stockage de 250 m<sup>3</sup> ;
- L'éthylène, également importé ;
- L'isobutane, L'Isobutane venant du GLIK située également à proximité, à une capacité de stockage Isobutane frais : 265 m<sup>3</sup> x 2 cigares, Isobutane recyclé : 170 m<sup>3</sup>[36].

#### **III.3.2. Historique du complexe CP2K**

L'histoire de l'unité CP2K remonte à la fin des années 1980, à travers une série d'étapes marquantes qui ont conduit à sa mise en service et à son intégration dans le tissu industriel algérien.

- 1988 : L'Entreprise Nationale des Industries Pétrochimiques (ENIP) initie, en partenariat avec le groupe espagnol REPSOL, un projet visant à produire du polyéthylène haute densité (PEHD).

- 1989 : Le projet est classé parmi les projets prioritaires du gouvernement algérien, ce qui lui confère un statut stratégique.
- Mars 1990 : Un protocole d'accord est signé entre ENIP et REPSOL, marquant le lancement officiel de la coopération. Cette entente aboutit à la création de la société mixte POLYMED en décembre 1990.
- 1991 : Le contrat de réalisation du projet est officiellement conclu.
- 1991–1995 : Le financement du projet est assuré par des fonds espagnols, ce qui permet de garantir la faisabilité financière de l'ensemble des phases prévues.
- 1995 : Reprise des études d'ingénierie en vue de la concrétisation du projet.
- 1996 : Lancement officiel des travaux de construction de l'usine.
- 1997 : Démarrage des travaux de génie civil ainsi que de la mise en place des infrastructures nécessaires.
- 1998 : Début du montage des installations industrielles.
- Mars 2002 : Achèvement de la construction de l'usine. La même année, une opération de restructuration financière de la société POLYMED est menée au niveau de la chefferie du gouvernement.
- 16 janvier 2004 : Mise en service effective de l'unité de production.
- 2011 : L'ENIP est totalement intégrée dans le groupe SONATRACH, devenant une division spécialisée dans la pétrochimie, sous l'appellation PEC (Pétrochimie ENIP/SONATRACH). À cette occasion, l'usine POLYMED est renommée CP2K [36].

### III.3.3. Implantation géographique

Le complexe CP2K est situé au sein de la zone industrielle de Skikda, sur une superficie totale de 166 800 m<sup>2</sup> (soit 16,68 hectares), dont environ 10 % sont occupés par des constructions. Il est implanté en bord de mer, à environ 6 km à l'est de la ville de Skikda, à une altitude moyenne de 6 mètres au-dessus du niveau de la mer [36].

La localisation géographique précise du site au sein de la zone industrielle est la suivante :

**Tableau III.1** : La localisation géographique du complexe CP2K.

Au nord

Bordé par la mer Méditerranée,

Au sud	Limité par la route principale de la zone industrielle EGZIK
À l'est	Voisin de l'unité de dessalement et des installations EGZIK
À l'ouest	Contigu au complexe CP1K

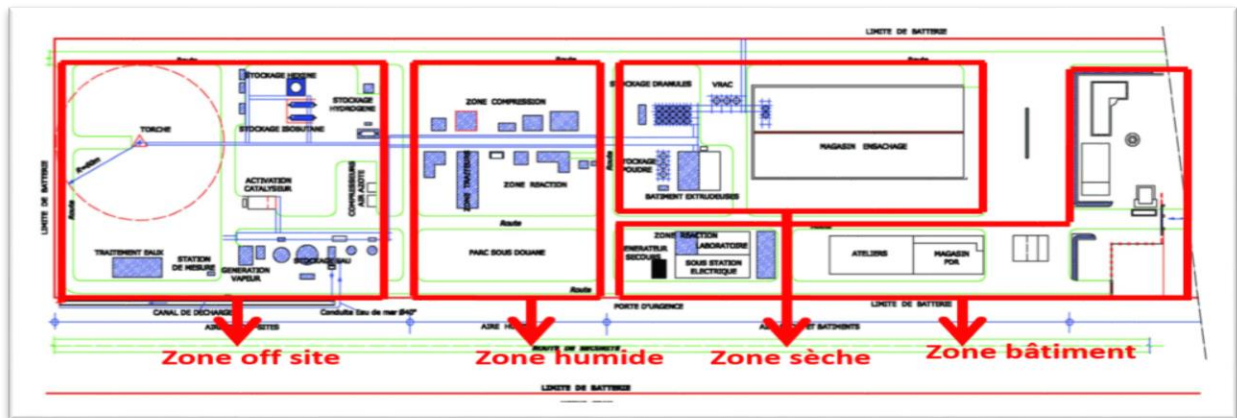


Figure III.1 : Schéma d'occupation du sol du complexe CP2K.

### III.3.4. Structure et découpage fonctionnel du complexe

Le complexe est composé de 04 principales zones définies comme suit:

- Zone off site : Les utilités (chaudière, air azote, eau dessalée, eau Anti-incendie, eau potable, et détente de gaz), Torche, Stockage isobutane et hexéne, Traitement des eaux usées, Activation catalyseur.
- Zone humide : Traiteurs, Réacteur, Compresseur, Capacité.
- Zone sèche : Extrudeuse, Soufflantes, Silos de stockage du produit finis ((poudre et granulé), Ensachage.
- Zone bâtiment : Bloc administration et direction, Cantine et vestiaires, Bloc sécurité et infirmerie, Magasin pièces de rechange, ateliers et bloc technique, Sous station haute et basse tentions, Salle de contrôle procès et laboratoire,



**Figure III.2 :** Les zones principales du complexe CP2K.

Et pour leur structure l'unité est composée de plusieurs installations, réparties en deux grandes catégories : les installations de production et les installations auxiliaires.

- Installations de Production : Ces installations assurent l'ensemble du processus de fabrication du polyéthylène haute densité (PEHD), depuis la matière première jusqu'au produit fini :
  - Unité de préparation et de traitement des matières premières : réception, pesée et préparation des composants nécessaires à la réaction.
  - Réacteur de polymérisation : lieu où s'effectue la réaction de polymérisation de l'éthylène, aboutissant à la formation du PEHD sous forme de poudre.
  - Extrudeuse : transforme la poudre obtenue en granulés homogènes grâce à un processus de fusion, malaxage et coupe.
  - Stockages intermédiaires : capacité totale de 3 500 tonnes, permettant de réguler les flux entre les étapes de production.
  - Unité de conditionnement: ensachage, étiquetage et préparation logistique du produit fini.
- Installations Auxiliaires : Ces équipements de soutien garantissent le bon fonctionnement de l'ensemble de l'unité :
  - Production des utilités : génération de vapeur, d'électricité, d'air comprimé, etc.
  - Station de traitement des effluents : pour le respect des normes environnementales.
  - Stockages spécifiques : installations dédiées aux matières premières, utilités et additifs (eau, hydrogène, hexène, isobutane).

- Magasin de stockage du produit fini : surface de 18 000 m<sup>2</sup>, avec une capacité de stockage de 10 000 tonnes de granulés de PEHD.



Figure III.3 : Les principales installations de l'unité CP2K.

### III.4. Le produit principal : le Polyéthylène Haute Densité (PEHD)

#### III.4.1. Caractéristiques et propriétés du PEHD

Le polyéthylène haute densité (PEHD), connu en anglais sous l'acronyme HDPE, est une polyoléfine obtenue par polymérisation de l'éthylène, sous des conditions spécifiques de température et de pression. Il présente une densité comprise entre 0,95 et 0,97 g/cm<sup>3</sup>, ce qui lui confère d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance chimique.

#### III.4.2. Applications du PEHD

Grâce à sa polyvalence, le PEHD est utilisé dans de nombreux domaines industriels, selon différents grades adaptés à chaque usage :

- Conduites (PIPE) : Grade TR 402 (tubes pour l'eau potable). Grade TR 418 (tubes pour le transport de gaz).
- Soufflage : Grade PEHD 5502 (fabrication de bouteilles de différentes tailles (petites et grandes)).
- Film plastique : Grades TR 140 & TR 144 (utilisés pour la production de sacs et sachets à usage général).

- Injection : Grade PEHD 6080 (utilisé dans la fabrication d'articles tels que palettes, caisses, bidons, bouchons, casiers et objets ménagers).
- Applications agricoles : Films agricoles, filets de pêche, conduites d'irrigation, cageots.
- Emballage : Pour l'alimentaire (bidons d'huile), les produits cosmétiques et d'entretien.
- Industrie : Conduites pour gaz naturel et eau, pièces techniques, pièces automobiles, conteneurs industriels.

### **III.5. Le système étudié : le réservoir de stockage d'héxène**

#### **III.5.1. L'héxène : présentation générale**

L'héxène-1 est un co-monomère utilisé en complément de l'éthylène dans le processus de polymérisation. Bien qu'ajouté en faibles quantités, il joue un rôle essentiel dans la modification de la structure moléculaire du polymère final.

L'incorporation d'héxène permet notamment de :

- Ajuster la densité du polyéthylène, en influençant l'arrangement des chaînes moléculaires.
- Améliorer certaines propriétés physiques telles que :
  - La flexibilité,
  - La facilité de transformation (aptitude au traitement),
  - Le comportement à la cristallisation,
  - La résistance mécanique du produit fini.

Ainsi, l'héxène-1 contribue de manière ciblée à l'optimisation des performances du PEHD selon les applications visées.

#### **III.5.2. Propriétés physico-chimiques de l'héxène**

Les principales propriétés physiques et chimiques de l'héxène-1 sont présentées dans le tableau ci-après. Il permet de mieux comprendre son comportement en tant que co-monomère dans la formulation du PEHD.

**Tableau III.2 :** Les aspects et les données de sécurité de l'héxène [37].

<b>Forme</b>	<b>Liquide</b>
<b>État physique</b>	Liquide
<b>Couleur</b>	Clair, incolore
<b>Point d'éclair</b>	- 26 °C (-26 °C)
<b>Limite d'explosivité, inférieure</b>	2 %(V)
<b>Limite d'explosivité, supérieure</b>	7 %(V)
<b>Propriétés comburantes</b>	Non
<b>Température d'auto inflammabilité</b>	272 °C
<b>Formule moléculaire</b>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
<b>Poids moléculaire</b>	84,18 g/mol
<b>PH</b>	Non applicable

### III.5.3. Risques sanitaires et premiers secours

L'héxène-1 présente certains risques pour la santé humaine en cas d'exposition. Il est donc essentiel de connaître les effets physiologiques potentiels ainsi que les mesures de premiers secours à appliquer :

**Tableau III.3 :** Les effets Physiologiques et premiers secours [37].

<b>Voie d'exposition</b>	<b>Effets physiologiques</b>	<b>Premiers secours</b>
<b>Inhalation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- À faible concentration (&lt; 1 000 ppm) : léger malaise</li> <li>- À forte concentration (&gt; 1 %) : effets anesthésiants, nausées, vomissements, confusion, perte de conscience</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amener la personne à l'air libre</li> <li>- Administrer de l'oxygène si nécessaire</li> <li>- Appliquer la respiration artificielle si arrêt</li> <li>- Contacter un médecin en urgence</li> </ul>
<b>Contact avec la peau</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irritation modérée, rougeurs, dessèchement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laver immédiatement à l'eau et au savon</li> </ul>

	- Risque de complications cutanées en cas d'exposition prolongée	- Retirer les vêtements contaminés - Laver les vêtements avant réutilisation
<b>Contact avec les yeux</b>	- Irritation modérée, démangeaisons conjonctivales	- Rincer abondamment à l'eau claire pendant au moins 15 minutes
<b>Ingestion</b>	- Troubles digestifs, vomissements, fatigue - Risque d'irritation pulmonaire si passage dans les voies respiratoires (pouvant entraîner asphyxie)	- Ne pas provoquer de vomissements - Consulter un médecin immédiatement - Si conscient : administrer quelques cuillères d'huile végétale (sous avis médical)

#### III.5.4. Utilisation de l'héxène au sein du complexe CP2K

L'héxène-1, utilisé comme co-monomère dans le processus de polymérisation, subit plusieurs opérations de réception, traitement et conditionnement avant son incorporation au réacteur. Ces étapes garantissent sa pureté et sa conformité aux exigences du procédé.

- Réception et stockage : l'héxène est livré à l'unité par camion-citerne, à température ambiante et pression atmosphérique. Le déchargement est effectué à l'aide de la pompe de décharge 670-462 (PB-B-1007) vers le réservoir de stockage d'héxène 950-461 (PB-B-1007).

Le remplissage du réservoir est contrôlé manuellement depuis le site, sous la supervision de l'opérateur.

- Prétraitement avant injection au procédé : avant d'être introduit dans la réaction, l'héxène subit un traitement visant à éliminer l'eau et les gaz dissous :
- Dégazage :
  - L'héxène est dirigé vers la colonne de dégazage 950-111 (PB-B-1007) via les pompes d'alimentation 670-463 A/B (PB-B-1007).
  - Le fluide dégazé est ensuite collecté dans le réservoir d'alimentation 950-112 (PB-B-1007), situé à la base de la colonne.
- Séchage :
  - Depuis ce réservoir, l'héxène est envoyé aux sécheurs 950-114 A/B (PB-B-1008) par les pompes 670-111 A/B (PB-B-1007).
  - Avant d'atteindre les sécheurs, le fluide traverse le refroidisseur 410-113 (PB-B-1008), qui élimine la chaleur générée par les pompes.
- Filtration finale :
  - Une fois séché, le courant d'héxène passe à travers le filtre 350-111 (PB-B-1008), assurant ainsi sa propreté avant l'introduction dans le réacteur.

### III.5.5. Description du réservoir de stockage d'héxène

L'héxène-1 est stocké dans un réservoir spécialement conçu à cet effet, répondant aux normes de sécurité et aux conditions d'exploitation du complexe **CP2K**. Ce réservoir, fabriqué en **acier inoxydable**, est muni d'un **toit fixe avec écran flottant interne**, ce qui limite l'évaporation et l'accumulation de vapeurs inflammables.

- **Dimensions :**
  - **Diamètre intérieur :** 8 000 mm
  - **Hauteur :** 7 600 mm
  - **Capacité nominale :** 305,7 m<sup>3</sup>
- **Conditions de conception :**
  - **Pression :** de -50 mm à 300 mm de colonne d'eau

- **Température maximale** : 65 °C

L'héxène-1 est stocké dans l'équipement **950-461 (PB-B-1007)** est un réservoir de **stockage vertical**, d'une dimension de **8 mètres de diamètre** et **7,6 mètres de hauteur**, offrant un **volume utile de 307,5 m<sup>3</sup>**. Il présente une **densité de flux de 10,2 L/min/m<sup>2</sup>** et un **débit théorique de 1 948 L/min**.



**Figure III.4** : Le bac de stockage d'héxène au niveau de CP2K.

### III.5.6. Sécurité et instrumentation du réservoir

#### III.5.6.1. Mesures de sécurité lors du remplissage depuis la citerne

- Détecteur de mise à la terre (grounding) : Cela évite les décharges électrostatiques.
- Vanne manuelle de sécurité + clapets anti-retour : Pour éviter le retour de fluide vers la citerne.
- Pompe avec moteur électrique (M) équipée de :
  - Interrupteur de proximité (LS) et Pressostat (PI) pour surveiller la pression à l'entrée.
  - Capteur de position vanne (YA) : confirme que la vanne est bien en position avant le démarrage.

#### III.5.6.2. Sécurité du bac de stockage (950-461)

- LI-45001 : indicateur de niveau local avec transmission DCS, alarmes de haut et bas niveau.
  - LSH-45054 : transmission DCS, alarme de haut niveau.
  - TI-49001 : suivi de la température interne du réservoir.
  - PIC-46003 : régulateur de pression avec split range.
- PV-46003A : injection d'azote si pression trop basse.
- PV-46003B : ventilation vers atmosphère si surpression.
- PSV-46002 : soupape de sécurité réglée à +300 mm H<sub>2</sub>O / -50 mm H<sub>2</sub>O.

### **III.5.6. 3. Sécurité pendant le transfert et le dégazage**

- Boucle de régulation de débit avec contrôle de sécurité :
  - FC, FO, FY, YV : indique présence de vannes de sécurité pilotées automatiquement.
- Détection de pression (PT) et de débit (FT) : Permet de couper en cas de dépassement de seuil.
- Vannes automatiques de coupure d'urgence (ex. YV 42002, YA ZLO ZLC) :
  - Fermeture automatique sur alarme ou défaut.
- Système de by-pass avec clapets anti-retour (entre pompes 670-463 A/B) : Garantit la continuité ou l'arrêt sécurisé du transfert.
- Sélecteur de pompe (A/B) pour redondance : Augmente la disponibilité et sécurité opérationnelle.

### **III.5.6.4. Instrumentation d'alarme & contrôle**

- Pressostats différentiels et manomètres (PI) tout au long du circuit.
- Capteurs de position des vannes (LS, YA) pour interverrouillage.
- Boucles de contrôle en mode automatique (IC, FC, ZLO) : Assurent que les conditions de transfert sont sûres avant démarrage.

### **III.5.6.5. Dispositifs de sécurité incendie et fuite**

- Détecteur de gaz : placé côté nord, au pied du réservoir.
- Détecteur de flamme : situé à 20 mètres au nord.
- Cuvette de rétention : 246 m<sup>3</sup> (≈80 % du volume du bac), hauteur de 1 mètre.
- Système de déluge à eau : refroidissement d'urgence du réservoir en cas d'incendie.

### **III.6. Conclusion**

Ce chapitre a permis d'ancrer notre étude dans un contexte industriel concret, en présentant le complexe pétrochimique CP2K, appartenant à la Société Nationale SONATRACH. Nous avons tout d'abord exposé le cadre global de l'industrie pétrochimique en Algérie, puis nous nous sommes focalisés sur le complexe CP2K, à travers sa structure, son implantation et son produit phare : le Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

L'accent a été mis sur le réservoir de stockage d'héxène, système critique dans le processus de production. L'héxène, en tant que substance inflammable et potentiellement dangereuse, implique une gestion rigoureuse des risques. Sa manipulation et son stockage exigent des mesures strictes de sécurité, notamment en termes de détection, de contrôle, et d'intervention rapide.

Cette analyse détaillée du système étudié constitue une étape essentielle en vue de l'évaluation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis pour les fonctions instrumentées de sécurité associées. La compréhension du fonctionnement, des risques et de l'organisation du complexe CP2K permettra, dans les chapitres suivants, de mener une étude rigoureuse de la sécurité fonctionnelle, en cohérence avec les exigences normatives définies notamment par la CEI 61508 et CEI 61511 .

# **CHAPITRE IV**

## **Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène**

**950-461**

## **CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le** **réservoir de stockage d'hexène 950-461**

### **IV.1. Introduction**

Ce chapitre est consacré, dans un premier temps, à l'étude des SIL requis des différents SIS associés à le réservoir de stockage d'hexène 950-461 à l'aide de les méthodes HAZOP et LOPA. Dans un second temps, la performance réelle des SIS (SIL réel), impliqués dans des scénarios d'accidents dont la fréquence d'occurrence dépasse la valeur tolérable, sera évaluée en utilisant le module SIL du logiciel GRIF.

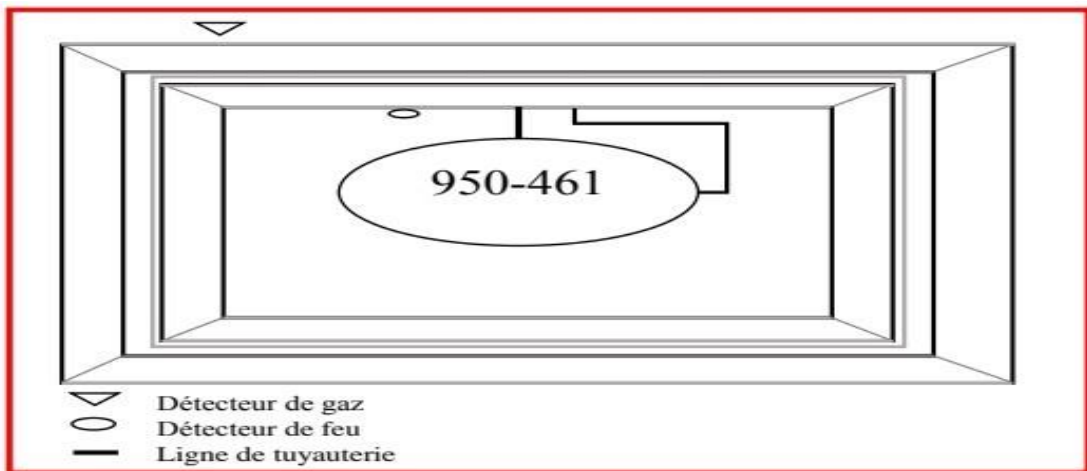
### **IV.2. Critère de choix du système d'étude**

Le choix du système étudié dans le cadre de cette analyse de SIL repose sur plusieurs critères techniques et méthodologiques. Le réservoir de stockage d'hexène 950-461 présente un potentiel de danger, notamment en cas de surpression, de débordement ou d'implosion. Ce système intègre plusieurs fonctions de sécurité instrumentées (SIF), ce qui en fait un candidat pertinent pour une évaluation selon la norme CEI 61511. De plus, la disponibilité des données techniques (P&ID, instrumentation, paramètres de fonctionnement) permet une application rigoureuse des méthodologies HAZOP et LOPA. Enfin, la criticité de ce système du point de vue de la sécurité des personnes, de l'environnement et de la continuité opérationnelle renforce la pertinence de son étude dans le cadre de ce mémoire.

### **IV.3. Description du système à étudier**

Le système retenu pour cette étude est le réservoir de stockage d'hexène codé 950-461, de configuration verticale à toit fixe avec écran flottant interne. Ce type de conception est couramment utilisé pour limiter l'évaporation des liquides volatils tout en réduisant les risques d'émission vers l'atmosphère. Le bac est intégré dans un circuit de remplissage, de stockage et de transfert vers une unité de dégazage. La figure IV.1 présente une vue simplifiée du réservoir vue en plan.

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le**  
**réservoir de stockage d'hexène 950-461**



**Figure IV.1:** Vue d'en haut du bac 950-461 et de ses sécurités.

Le réservoir de stockage d'hexène est sécurisé par plusieurs dispositifs visant à prévenir les risques d'incendie, d'explosion et de pollution. Il est équipé de soupapes de décharge pour la protection contre la surpression, de capteurs de niveau haut pour éviter les débordements, ainsi que de détecteurs de gaz et de flamme pour une détection rapide des fuites. Une cuvette de rétention entoure le réservoir pour contenir tout éventuel déversement, et un système de déluge est prévu pour l'extinction en cas d'urgence.

La figure IV.2 présente le schéma P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) du réservoir de stockage d'hexène permet de représenter de manière détaillée l'ensemble des équipements, instruments et connexions liés à l'installation.

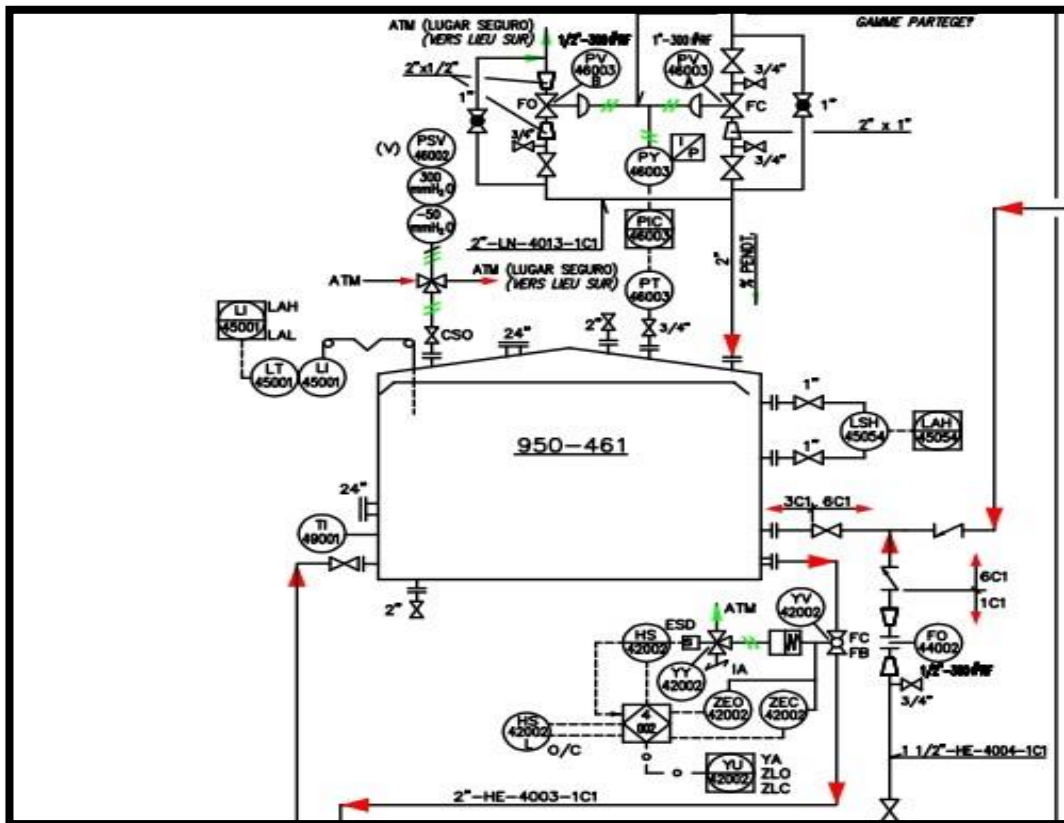


Figure IV.2 : présente le schéma P&ID réservoir de stockage d'hexène.

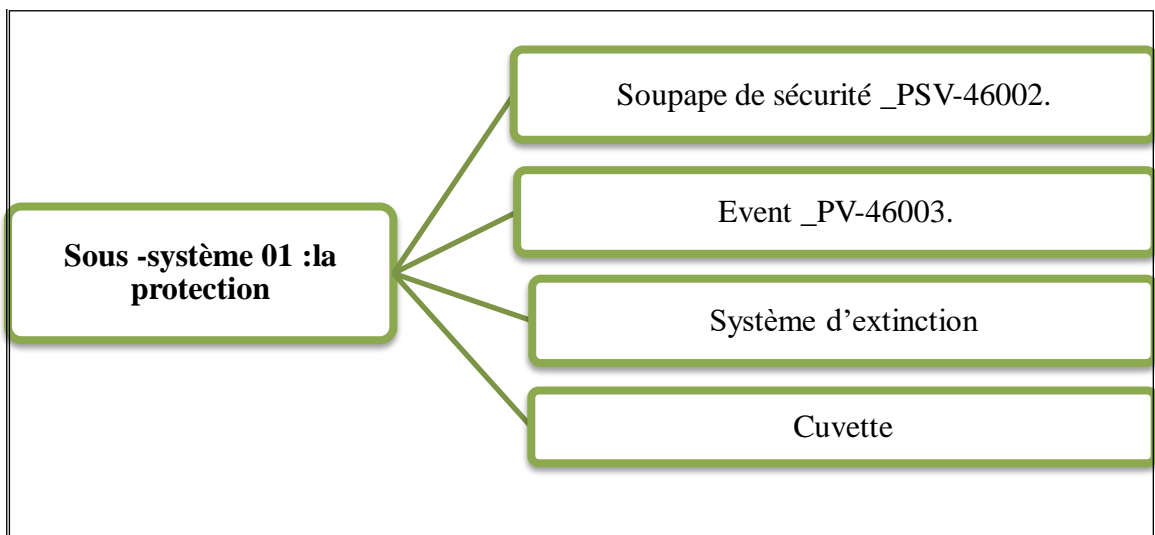
Afin d'assurer un stockage sûr et maîtrisé de l'hexène, le réservoir 950-461 est équipé de plusieurs sous-systèmes de sécurité, organisés selon quatre fonctions principales : la protection, la surveillance, le contrôle de la pression, et le système d'alarmes.

- Fonction de protection : Elle regroupe les dispositifs destinés à limiter les effets d'un incident, notamment en cas de déversement ou d'incendie. Parmi eux, on trouve la cuvette de rétention de 246 m<sup>3</sup> (≈80 % du volume du bac), qui permet de contenir tout éventuel écoulement de produit. Le système de déluge à eau constitue également une barrière active essentielle, permettant un refroidissement rapide du bac en cas de départ de feu. Enfin, la soupape de sécurité PSV-46002, tarée à +300 mm H<sub>2</sub>O et -50 mm H<sub>2</sub>O, intervient en cas d'échec du système de régulation.
- Fonction de surveillance : Elle assure le suivi en temps réel des grandeurs critiques du procédé grâce à une instrumentation dédiée. L'indicateur de niveau LI-45001, le thermomètre TI-49001 et les capteurs de pression PI-4600x fournissent des données

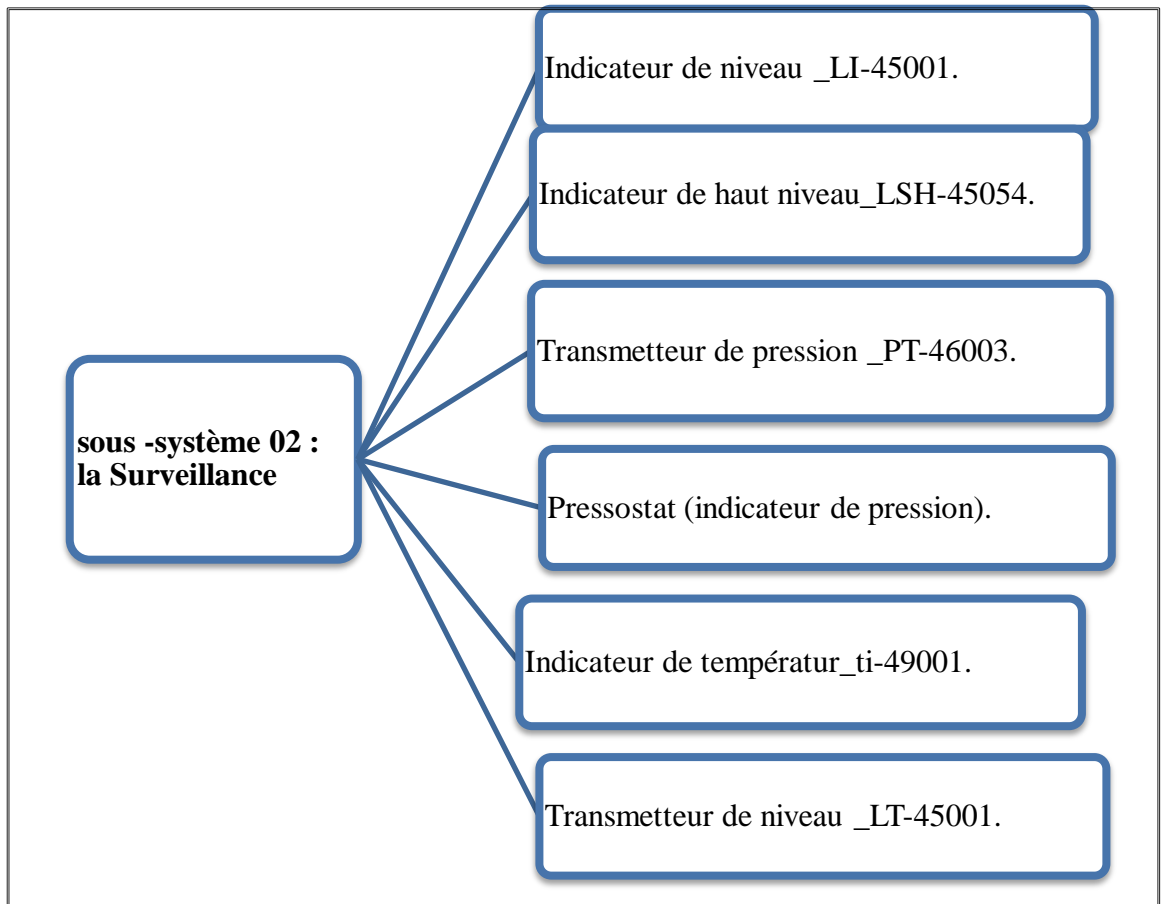
## **CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le** **réservoir de stockage d'hexène 950-461**

essentielles à l'opérateur via le DCS, permettant une anticipation efficace des dérives potentielles.

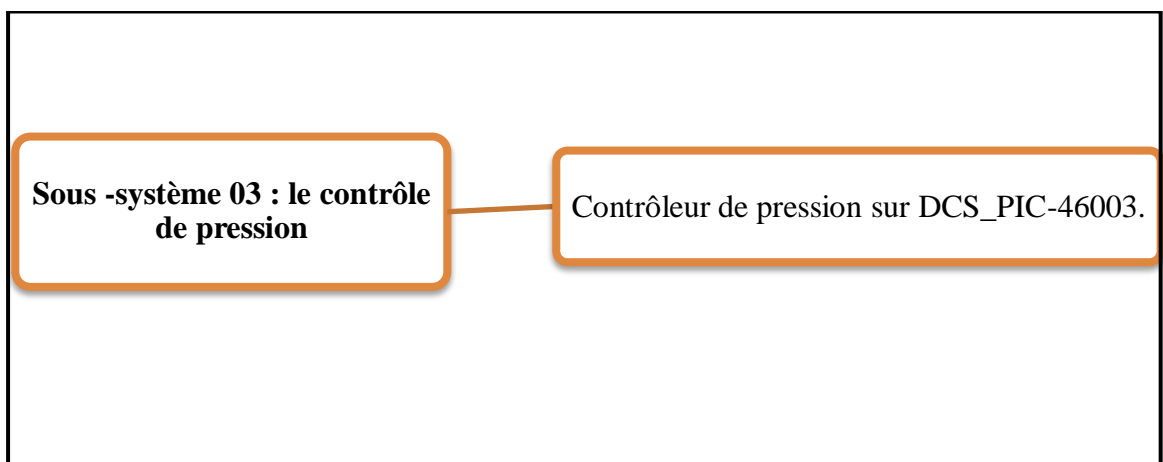
- Fonction de contrôle de la pression : Un système de régulation automatique assure la stabilité de la pression à l'intérieur du réservoir. Le contrôleur PIC-46003 pilote deux vannes en configuration split range : PV-46003A pour l'injection d'azote en cas de dépression, et PV-46003B pour la mise à l'atmosphère contrôlée en cas de surpression. Ce dispositif permet de maintenir une atmosphère inerte dans le bac, condition indispensable pour éviter les réactions dangereuses avec l'air.
- Fonction d'alarme : Le système comprend des alarmes visuelles et sonores déclenchées en cas de dépassement de seuils critiques. L'alarme de niveau haut LAH-45054 couplée au transmetteur LI-45001 signale un risque de débordement, tandis que les alarmes de pression sont associées aux sorties du contrôleur PIC-46003. Toutes ces alertes sont transmises au système de contrôle (DCS), permettant une intervention rapide des opérateurs ou le déclenchement automatique de certaines actions de sécurité.



**Figure IV.3 : Sous -système de protection.**

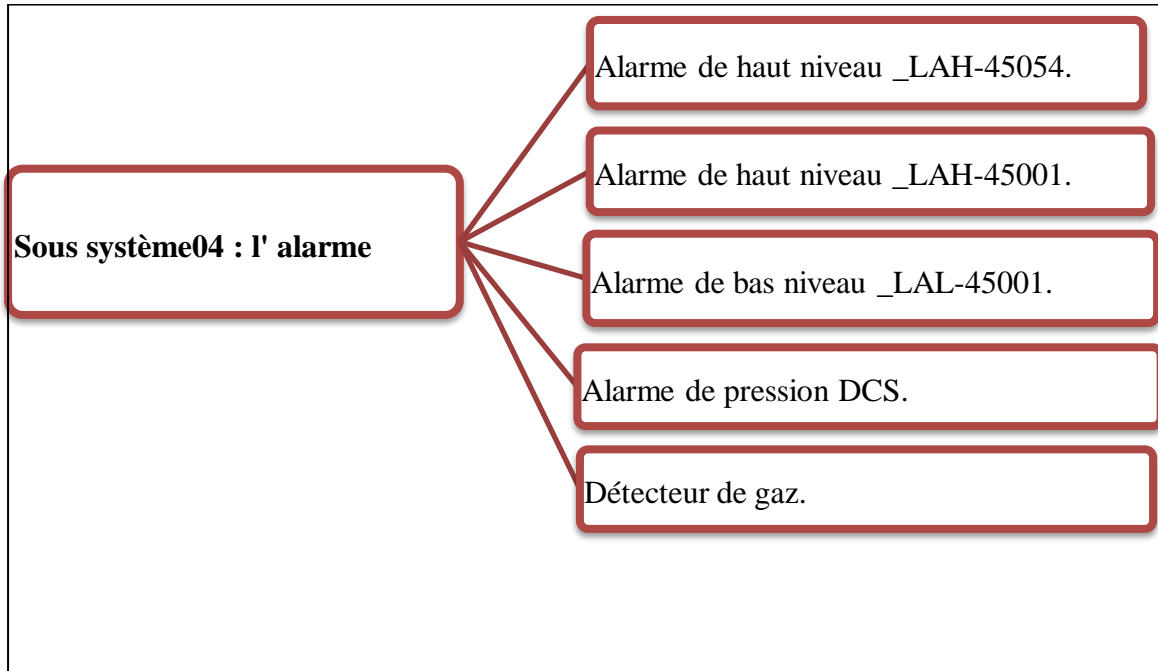


**Figure IV.4 :** Sous -système de Surveillance.



**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le  
réservoir de stockage d'hexène 950-461**

**Figure IV.5 : Sous -système de contrôle de pression.**



**Figure IV.6 : Sous -système d' alarme.**

#### **IV.4. L'analyse des risques et l'identification des évènements dangereux**

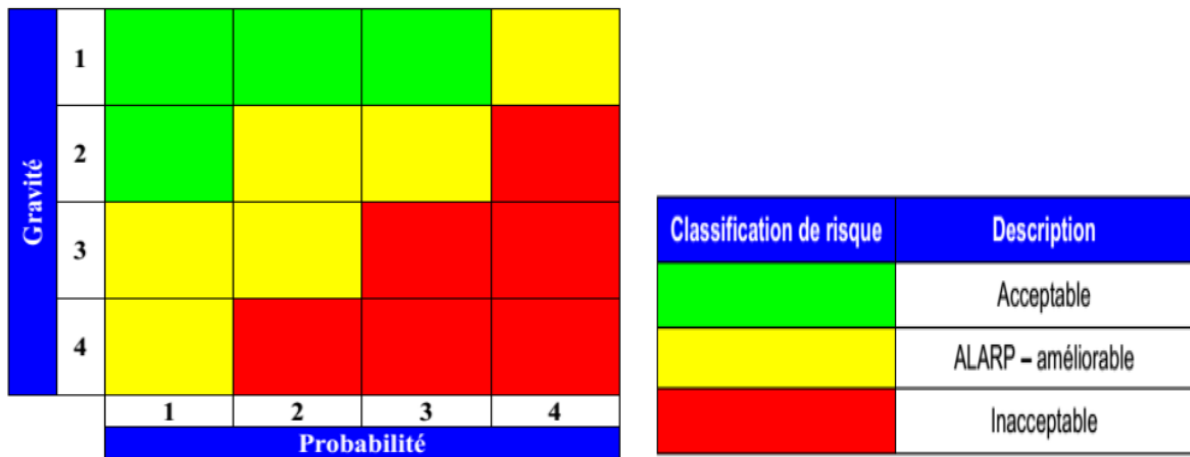
Cette étape consiste à l'utilisation des informations disponibles pour identifier les phénomènes dangereux (scénarios d'accident), estimer le risque (en termes de gravité et de probabilité) et le comparé avec l'objectif de sécurité (fréquence tolérable).

L'analyse des risques et l'identification des évènements dangereux être identifiées en utilisant une de méthode HAZOP.

##### **IV.4.1. Matrice de criticité utilisée**

La matrice de criticité utilisée pour l'évaluation des scénarios d'accidents est représentée à la figure suivante.

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le  
réservoir de stockage d'hexène 950-461**



**Figure IV.7 :** Matrice de criticité utilisée.

**Tableau IV.1:** Echelle de gravité.

<b>Gravité</b>	<b>Personnel</b>	<b>Environnement</b>	<b>Public</b>	<b>Production/biens</b>
G4	Plusieurs décès	Pollution hors limites de longue durée	Décès	Domage important et arrêt total de la production
G3	Incapacité permanente ou 1 décès	Pollution interne non maîtrisée ou pollution hors limite maîtrisée	Blessures significatives	Domage localisé et arrêt partiel d'unité
G2	Blessures significatives (AAA)	Pollution interne maîtrisée	Blessures mineures	Domages mineurs et arrêt bref de la production
G1	Blessure mineures (ASA)	Mineure	Pas d'incidence	Pas de dommage, pas d'arrêt de production

**Tableau IV.2 :** Echelle de fréquence.

<b>Probabilité</b>	<b>Description</b>	<b>Fréquence</b>
P4	Très probable S'est produit fréquemment au sein de Sonatrach.	1/ an
P3	Probable S'est produit (ou pourrait se produire) au sein de Sonatrach, pourrait se produire pendant la durée de vie de l'installation	10 <sup>-2</sup> à 10 <sup>-1</sup> /an
P2	Peu probable Déjà (ou pourrait se) rencontré dans une organisation similaire à Sonatrach	10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-2</sup> /an
P1	Improbable Jamais rencontré ou entendu parler mais physiquement possible (ou rarissime)	<10 <sup>-4</sup> /an

**IV.4.2. L'étude HAZOP**

L'étude HAZOP a pour objectif d'identifier les scénarios potentiellement dangereux associés au fonctionnement du bac de stockage d'hexène, en mettant en évidence les

## **CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le** **réservoir de stockage d'hexène 950-461**

déviations susceptibles de conduire à des situations accidentelles. Les scénarios jugés critiques font ensuite l'objet d'une évaluation approfondie à l'aide de la méthode LOPA. L'analyse a été menée en prenant en compte les principaux paramètres opérationnels du procédé, à savoir :

- la pression,
- la température,
- le niveau de liquide dans le réservoir.

Les différents tableaux issus de l'étude HAZOP sont présentés ci-après.

**Tableau IV.3** : tableaux de l'étude HAZOP

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

Paramètre	Mot-clé	Causes	Conséquences	Détections	Barrières de sécurité	Recommandations
Pression à l’intérieur du bac de stockage	Plus de	<ul style="list-style-type: none"> <li>-augmentation de la température.</li> <li>-défaillance de la vanne de ventilation_ PV-46003B (bloquée fermée).</li> <li>-défaillance de la vanne de remplissage (bloquée ouverte).</li> <li>-défaillance de la vanne de décharge (bloquée fermée).</li> <li>-coincement de l’écran flottant le plus bas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-perte de confinement (fuite).</li> <li>-feu de torche.</li> <li>-UVCE.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-pressostat (indicateur de pression).</li> <li>-thermomètre local_TI-49001.</li> <li>-détecteur de gaz.</li> <li>-détecteur de flamme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Event_ PV-46003B.</li> <li>-soupape de sécurité_ PSV-46002(case- vide).</li> <li>-système déluge à eau.</li> <li>-hydro-moniteur (Extinction fixe).</li> <li>-alarme de pression sur DCS_PIC-46003.</li> <li>-Skid à mousse.</li> <li>-Opérateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-remplacement des vannes manuelles de remplissage et de décharge par des vannes de régulation.</li> <li>-maintenance préventive des vannes.</li> <li>-mise en place d’un PHH (alarme de très haute pression).</li> </ul>

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

	Moins de	<ul style="list-style-type: none"> <li>-fuite.</li> <li>-défaillance de la vanne de décharge d’Héxène (bloquée ouverte).</li> <li>-défaillance de la vanne d’injection d’N2_ PV-46003A (bloquée fermée).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-perte de confinement.</li> <li>-feu de nappe.</li> <li>-UVCE.</li> <li>-feu de torche.</li> <li>-Implosion.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-pressostat (Indicateur de pression).</li> <li>-thermomètre local_TI-49001.</li> <li>Détecteur de gaz.</li> <li>-Détecteur de flamme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-alarme de pression sur DCS_PIC-46003.</li> <li>-vanne d’injection d’N2_ PV-46003A.</li> <li>-soupape de sécurité_ PSV-46002 (Case-vide).</li> <li>-système déluge à eau.</li> <li>-hydro-moniteur (Extinction fixe).</li> <li>-skid à mousse.</li> <li>-opérateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-installer un autre détecteur de gaz.</li> <li>-installer un autre détecteur de flamme (Être proche).</li> <li>-maintenance préventive des vannes.</li> <li>-mise en place d’un PLL (alarme de très basse pression).</li> </ul>
--	----------	---	--	---	---	--

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

Température à l’intérieur du bac de stockage	Plus de	<ul style="list-style-type: none"> <li>-feu à proximité du bac.</li> <li>-augmentation de la pression.</li> <li>-mise en équilibre avec la température extérieur (en été).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-augmentation de la pression.</li> <li>-évaporation du produit.</li> <li>-feu de torche.</li> <li>-UVCE.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-thermomètre local_TI-49001.</li> <li>-pressostat (Indicateur de pression).</li> <li>-détecteur de gaz.</li> <li>-détecteur de flamme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Event_PV-46003B.</li> <li>-alarme de pression sur DCS_PIC-46003.</li> <li>-soupape de sécurité_PSV-46002 (Case-vide).</li> <li>-opérateur.</li> <li>-système déluge à eau.</li> <li>-hydro-moniteur (Extinction fixe).</li> <li>-écran flottant.</li> <li>-Skid à mousse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-équiper la cuvette et le bac par un système d’extinction à mousse.</li> <li>-installer un autre détecteur de gaz.</li> <li>-installer un autre détecteur de flamme (Être proche).</li> <li>-nettoyage périodique de l’entourage du bac.</li> </ul>
--	---------	---	--	--	--	--

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

	Moins de	-mise en équilibre avec la température extérieur (en hiver).	-stabilisation du produit.	-thermomètre local_TI-49001.	-opérateur.	
--	----------	--	----------------------------	------------------------------	-------------	--

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

<p>Niveau à l’intérieur du bac de stockage</p>	<p>Plus de</p>	<p>-défaillance de la vanne de remplissage (bloquée ouverte). -erreur opérateur.</p>	<p>-perte de confinement. -augmentation de pression. -Feu de nappe. -feu de torche. -débordement</p>	<p>-indicateur de haut niveau de liquide _LI-45054. -indicateur de haut niveau de liquide _LI-45001. -détecteur de gaz. -détecteur de flamme.</p>	<p>-Event_ PV-46003B. -Soupape de sécurité_ PSV-46002 (Case-vide). -alarme de pression sur DCS_PIC-46003. -alarme de haut niveau du liquide sur DCS _LAH-45001 _LAH-45054 -cuvette. -système déluge à eau. -hydro-moniteur (Extinction fixe). -Skid à mousse. -Opérateur.</p>	<p>-mise en place d’un LHH (alarme de très haut niveau). -maintenance préventive des vannes. -installation d’une canalisation au niveau haut pour récupérer le produit vers autre citerne. -formation du personnel.</p>
--	----------------	--	--	---	---	---

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d’hexène 950-461**

	Moins de	-défaillance de la vanne de décharge (Bloquée ouverte). -fuite.	-chute de pression. -Feu de nappe. -implosion.	-indicateur de faible niveau de liquide_ LI-45001. -détecteur de gaz. -détecteur de flamme.	_soupape de sécurité_ PSV-46002 (Case-vide). -vanne d’injection d’N2_ PV-46003A. -cuvette. -système déluge à eau. -hydro- moniteur (Extinction fixe). -Skid à mousse. -Alarme de pression sur DCS. -alarme de faible niveau sur DCS _ LAL-45001.	-mise en place d’un LSSL (alarme de très faible niveau). -maintenance préventive des vannes.
--	----------	--	--	--	--	---

### **IV.5. Allocation du niveau d'intégrité de sécurité (SIL requis)**

La définition du SIL qui doit être atteint par la fonction de sécurité (SIF) afin de réaliser la réduction nécessaire du risque (SIL requis) et pour cela on utilise par la méthode LOPA.

#### **IV.5.1. Fréquences d'occurrence des événements initiateurs**

Dans le cadre de l'analyse LOPA, il est essentiel de déterminer la fréquence d'occurrence de chaque **événement initiateur**, également appelé **cause initiatrice**. Ces événements représentent les déviations initiales du procédé susceptibles de déclencher un scénario dangereux, notamment lorsqu'ils sont associés à la défaillance partielle ou totale des barrières de protection en place. La quantification de ces fréquences constitue une étape clé pour évaluer le niveau de risque résiduel et identifier les besoins en termes de réduction du risque. Les valeurs de fréquence retenues pour chaque événement initiateur ont été établies à partir de données de retour d'expérience, de bases de données de fiabilité ou de recommandations normatives. L'ensemble de ces valeurs est présenté dans le tableau suivant.

**Tableau IV.4 :** Les valeurs de fréquence retenues pour chaque événement initiateur.

Evénements	Fréquence annuelle
<b>Défaillance de la vanne de décharge YV42002 (bloquée ouverte)</b>	0.5/ans
<b>Défaillance de la vanne de remplissage (bloquée ouverte)</b>	0.5/ans
<b>Augmentation du niveau</b>	1/ans
<b>Feu externe</b>	0.01/ans
<b>Défaillance de la boucle PIC46003</b>	0.1/ans

#### **IV.5.2. Probabilité de défaillance des couches de protection (PFD)**

À l'instar des fréquences associées aux événements initiateurs, la connaissance des probabilités de défaillance à la demande (PFD) des différentes couches de protection indépendantes (IPL) est indispensable dans le cadre de l'analyse LOPA. Chaque couche de protection, qu'elle soit instrumentée, mécanique ou organisationnelle, possède une efficacité qui peut être quantifiée par sa probabilité de défaillance. Cette donnée permet d'évaluer la capacité réelle du système à atténuer ou à interrompre la

## CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

progression d'un scénario dangereux. Les valeurs de PFD utilisées dans cette étude sont issues de référentiels standards (CEI 61511, API 754) et de bases de données industrielles reconnues. Elles sont regroupées dans le tableau suivant, afin de permettre le calcul des fréquences résiduelles de chaque scénario.

**Tableau IV.5 :** Les valeurs de PFD des différentes couches de protection.

Barrières	Probabilités
Soupape de sécurité_PSV-46002	0.01
Vanne d'injection d'N2_PV-46003A	0.1
LAH 45001	0.1
Cuvette de rétention	0.01
PV46003B	0.01
Système d'extinction	0.05

### IV.5.3. Application de la méthode LOPA

L'analyse LOPA (Layer of Protection Analysis) a été appliquée afin d'évaluer quantitativement les risques résiduels associés aux scénarios d'accidents identifiés dans le cadre de l'étude HAZOP du réservoir de stockage d'hexène (950-461). Cette approche permet de calculer, pour chaque événement dangereux, la fréquence d'occurrence résiduelle en tenant compte à la fois de la fréquence de la cause initiatrice et de l'efficacité des différentes couches de protection indépendantes (IPL).

Chaque scénario est analysé en suivant une démarche structurée : identification de l'événement à impact, détermination de la fréquence annuelle de l'événement initiateur, identification des barrières de protection existantes, estimation de la fréquence intermédiaire, puis application éventuelle d'une fonction instrumentée de sécurité (SIF) en fonction de la fréquence tolérable cible.

La fréquence intermédiaire d'occurrence d'un événement redouté s'obtient en multipliant la fréquence de l'événement initiateur par les probabilités moyennes de défaillance sur demande ( $PFD_{avg}$ ) de chaque couche de protection indépendante agissant contre cet événement.

$$f^C = f^{IE} \times \prod_i PFD_{avg}^i$$

## CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

- $f^C$ : Fréquence de réalisation de la conséquence, c'est-à-dire la fréquence à laquelle l'événement dangereux peut survenir (toutes les barrières ayant échoué).
- $f^{IE}$ : Fréquence de l'événement initiateur.
- $PFD_{avg}^i$ : Probabilité moyenne de défaillance sur demande de la barrière de sécurité *iii*.

La réduction de risque exigée pour la fonction de sécurité assurée par le Système Instrumenté de Sécurité (SIS) est obtenue en comparant la fréquence de l'événement redouté à la fréquence cible tolérable  $f_t$  (par exemple, une conséquence grave ne doit pas se produire avec une fréquence supérieure à  $1 \times 10^{-4}$  par an) :

$$PFD_{avg}^{SIS} \leq \frac{f_t}{f^{IE} \times \prod_{i=SIS} PFD_{avg}^i}$$

Les résultats de cette démarche sont synthétisés dans les tableaux suivants, qui précisent pour chaque scénario :

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461**

**Tableau IV.6 :** Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Implosion) .

Evènement à impact	Cause initiatrice	Fréquence d'occurrence D'une cause initiatrice (/an)	Couches de protection		Fréquence intermédiaire D'occurrence d'évènement(/an)	Fréquence totale (/an)	SIF	PFD SIS	Fréquence tolérable (/an)
			Soupape de sécurité_	Vanne d'injection d'N2_P					
Implosion	Défaillance de la vanne de décharge YV42002 (bloquée ouverte)	0.5	0.01	0.1	5E-4	5E-4	LAL 45001	2E-1 (SIL req = SIL 0)	1E-4

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461**

**Tableau IV.7 :** Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Débordement du réservoir).

Evènement à impact	Cause initiatrice	Fréquence d'occurrence D'une cause initiatrice (/an)	Couches de protection		Fréquence intermédiaire D'occurrence d'évènement (/an)	Fréquence totale (/an)	SIF	PFD SIS	Fréquence tolérable (/an)
			LAH 45001	Cuvette de rétention					
Débordement du réservoir	Défaillance de la vanne de remplissage (bloquée ouverte)	0.5	0.1	0.01	5E-4	1E-3	LAH 45054	1 E – 1 (SIL req = SIL 1)	1E-4
	Défaillance de la vanne de décharge YV42002 (bloquée fermée)	0.5	0.1	0.01	5E-4				

## CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

**Tableau IV.8 :** Tableau LOPA relatif à l'évènement redouté (Surpression au niveau du Bac)

Evènement à impact	Cause initiatrice	Fréquence d'occurrence D'une cause initiatrice (/an)	Couches de protection				Fréquence intermédiaire D'occurrence d'évènement (/an)	Fréquence totale (/an)	SIF	PFD SIS	Fréquence tolérable (/an)
			LAH 45001	PV4600 3B	PSV460 02	Système d'extinction					
Surpression au niveau du Bac	Augmentation du niveau	1	0.1	0.1	0.01	1	1E-4	1E-4	LAH45054	1(SIL req = SIL 0)	1E-4
	Feu externe	0.01	1	1	0.01	0.05	5E-6	5E-6	PT46003	20(SIL req = SIL 0)	
	Défaillance de la boucle PIC46003	0.1	1	1	0.01	1	1E-3	1E-3	SIF proposé PAH	1E-1(SIL req = SIL 1)	

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le**  
**réservoir de stockage d'hexène 950-461**

**IV.6. Réalisation et validation du SIS (SIL réel)**

Dans cette étape on utilise le module SIL pour calculer les PFD<sub>moy</sub> des systèmes instrumenté de sécurité du réservoir de stockage d'hexène (950-461) et évaluer le niveau d'intégrité de sécurité SIL (SIL réel) par rapport aux résultats trouvés dans l'étape précédente (SIL requis).

❖ **Présentation de SIF 01** : Protection contre niveau bas dans le bac LAL45001.

**Tableau IV.8** : Le SIF LAL45001.

Nom de la fonction	<b>Protection contre niveau bas dans le bac.</b>		
Source de demande	Défaut de la vanne de décharge (bloquée ouverte) — YV42002.		
Configuration des composants	<b>Capteur</b>	LAL45001 (transmetteur de niveau).	
	<b>Calculateur</b>	DCS (Distributed Control System).	
	<b>Actionneur</b>	YV42002 (vanne d'arrêt).	

Ci-après, sous forme de copies écran de l'interface graphique du module SIL.

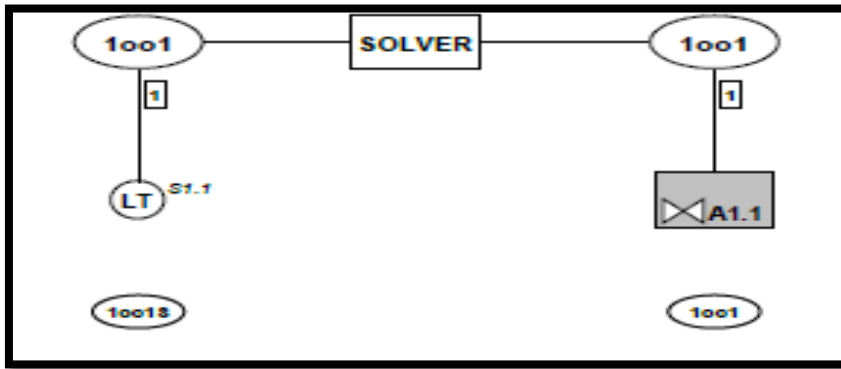
❖ **Discription pour le rapport** :

SIF identifier : SIF:LAL45001	<i>Revision</i>	<i>Date</i>	<i>Produced by</i>	<i>Checked by</i>	<i>Approved by</i>
		0	25/06/2025	DJOURIA Lamis & GHADJETTI Lina	INNAL Fares
Location	CP2K				
Process units	Bac de stockage d'hexene (950-461)				
SIF function	protection contre niveau bas dans le bac				
Sensor tag names	LAL45001				
Solver tag name	DCS				
Actuator tag names	YV42002				
PID	PB-B-1007				
Definition of safe state	Evitement du niveau bas				
Source of demand on SIF and demand rate	Défaillance de la vanne de décharge YV42002 (bloquée ouverte) Défaillance de la vanne de décharge YV42002 (bloquée ouverte)				

**Figure IV.7** : La discription de rapport 01.

## CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

### ❖ Configuration de l'architecture



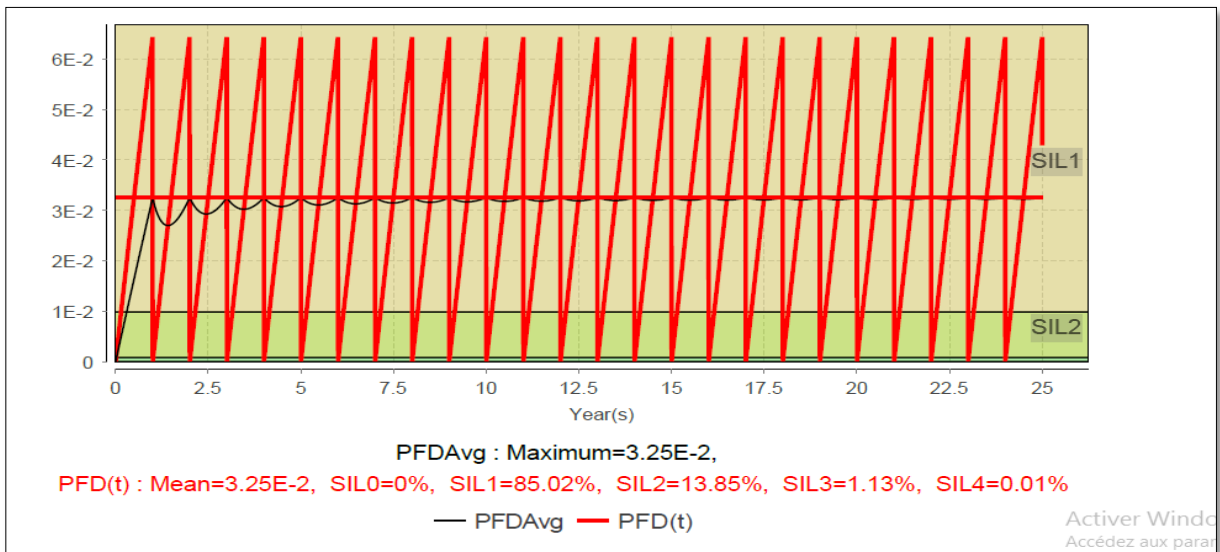
**Figure IV.8 :** Configuration de l'architecture de la SIF de sécurité de bas niveau.

### ❖ Calcul de PFD (Probability of Failure on Demand)

L'Avg PFD pour 25 ans est de 3.2541E-2. Ce résultat représente la probabilité qu'une défaillance se produise lorsque le système de sécurité est sollicité. Cette valeur est un critère de performance pour déterminer si le SIL requis est atteint.

- SIL Requis : Le système est conçu pour atteindre un SIL1, ce qui signifie qu'il doit répondre aux exigences minimales de sécurité pour ce type de fonction.
- SIL Calculé : Le calcul montre que le système atteint un SIL Compliant, avec une probabilité de défaillance par demande (PFD) calculée en dessous du seuil requis pour SIL1.

Les Courbes des PFD du système



**Figure IV.9:** Courbes présentent les PFD de la SIF de bas niveau.

❖ **Répartition du temps passé dans chaque SIL**

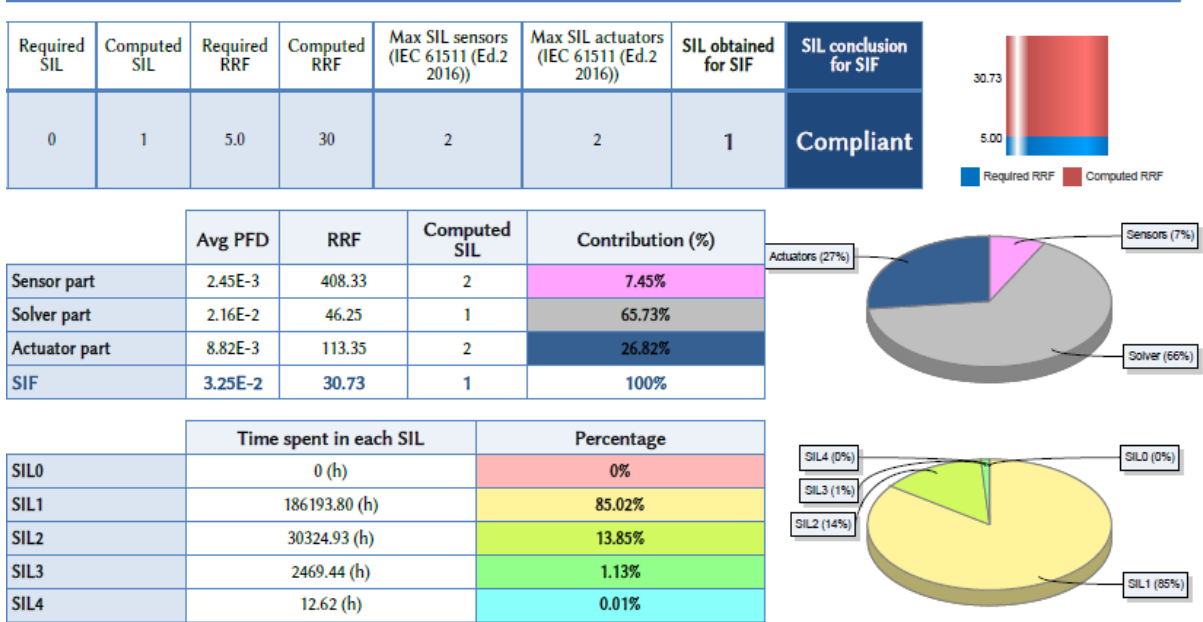
Cette section indique combien de temps chaque partie du système (capteur, calculateur, actionneur) passe dans chaque niveau de SIL.

- SIL1 (85.02%) : La majorité du temps de fonctionnement est dans le niveau SIL1, ce qui est conforme aux attentes pour une fonction de sécurité.
- SIL2 (13.85%) : Une petite portion du temps est dans SIL2, ce qui pourrait indiquer des ajustements ou des marges de sécurité supplémentaires.
- SIL3 (1.13%) : Très peu de temps dans SIL3, ce qui est acceptable car ce niveau de sécurité n'est pas requis pour cette application spécifique.
- SIL4 (0.01%) : Négligeable

Il resume ci après

# CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

Avg PFD over 25 years = 3.2541E-2



**Figure IV.10** : les resultats de SIF 01.

### ❖ Paramètres Techniques

Pour chaque composant, on évalue :

Lambda ( $\lambda$ ) : taux de défaillance par heure (exprimé en  $h^{-1}$ ).

MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

SFF (Safe Failure Fraction) : pourcentage de défaillances sûres ou détectables.

RRF (Risk Reduction Factor) : facteur de réduction du risque (inverse du PFD)

	Component		Parameters		Other parameters	Partial tests
Sensors	S1.1	LSH45054	Same configuration as component LAL45001 of loop SIF:LAL45001			
Solver	SOLVER	DCS <small>SIF:LAL45001</small>	DCS	Law=Advanced, Lambda=5.00E-6h <sup>-1</sup> , MTTR=8.00Hour(s), T1=1.00Year(s), T0=1.00Year(s), Gamma=0	Chi=1, Lambda=5.00E-6h <sup>-1</sup> , Pi=3.00Hour(s), Sigma=1.00, Omega1=0, Omega2=0	
Actuators	A1.1	P-670-462	Safety relay	Type A, Law=Tested when unit is stopped, T1=1.00y, T0=0y, Lambda DU=3.00E-7h <sup>-1</sup> , Lambda DD=0h <sup>-1</sup> , Lambda SU=0h <sup>-1</sup> , Lambda SD=0h <sup>-1</sup> , SFF=0%, Gamma=0	Chi=1, Sigma=1.00, Lambda=0h <sup>-1</sup> , Omega1=0, Omega2=0, Proof test coverage=100.00%, Safe repair=Yes	

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le**  
**réservoir de stockage d'hexène 950-461**

**Figure IV.11** : Paramètres Techniques.

❖ **Présentation de SIF 02** : Protection contre niveau haut dans le bac SIF LSH45054.

**Tableau IV.9** : Le SIF LSH45054.

Nom de la fonction	<b>Protection contre niveau haut dans le bac.</b>		
Source de demande	Défaillance de la vanne de remplissage (bloquée ouverte)		
Configuration des composants	<b>Capteur</b>	LSH45054 .	
	<b>Calculateur</b>	DCS (Distributed Control System).	
	<b>Actionneur</b>	la vanne de remplissage	

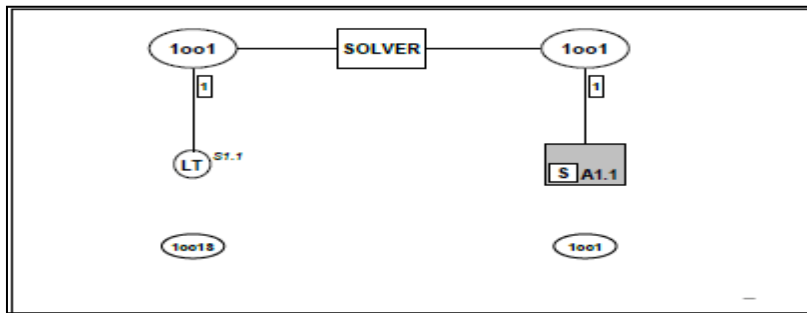
❖ **Discription pour le rapport** :

SIF identifier : SIF: LAH45054	<i>Revision</i>	<i>Date</i>	<i>Produced by</i>	<i>Checked by</i>	<i>Approved by</i>
			25/06/2025	INNAL Fares	INNAL Fares
Location	CP2K				
Process units	Bac de stockage d'hexene (950-461)				
SIF function	protection contre niveau bas dans le bac				
Sensor tag names	LSH45054				
Solver tag name	DCS				
Actuator tag names	P-670-462				

**Figure IV.12** : La discription de rapport 02.

❖ **Configuration de l'architecture**

**CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le  
réservoir de stockage d'hexène 950-461**



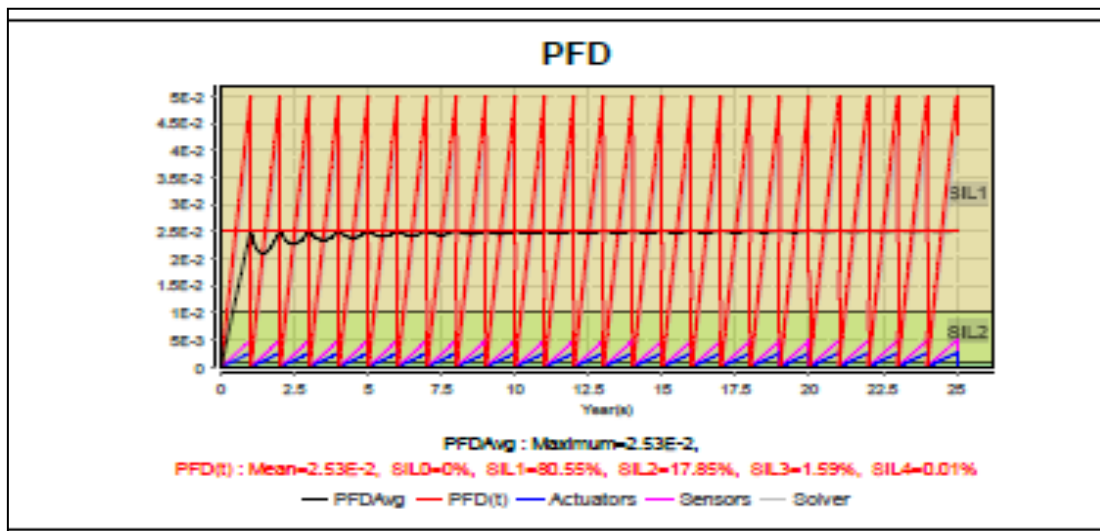
**Figure IV.13 :** Configuration de l'architecture de la SIF de sécurité de haut niveau.

❖ **Calcul de PFD (Probability of Failure on Demand)**

Le PFD moyen est la probabilité que le système échoue lorsqu'il est sollicité. Sur 25 ans :

PFD total = 2.527E-2 (soit environ 2,5 % de chances d'échec à la demande)

Cela correspond à un niveau SIL 1, qui accepte un PFD entre  $10^{-2}$  (0.01) et  $10^{-1}$  (0.1).



**Figure IV.14:** Courbes présentent les PFD de la SIF de haut niveau

❖ **Répartition du temps passé dans chaque SIL**

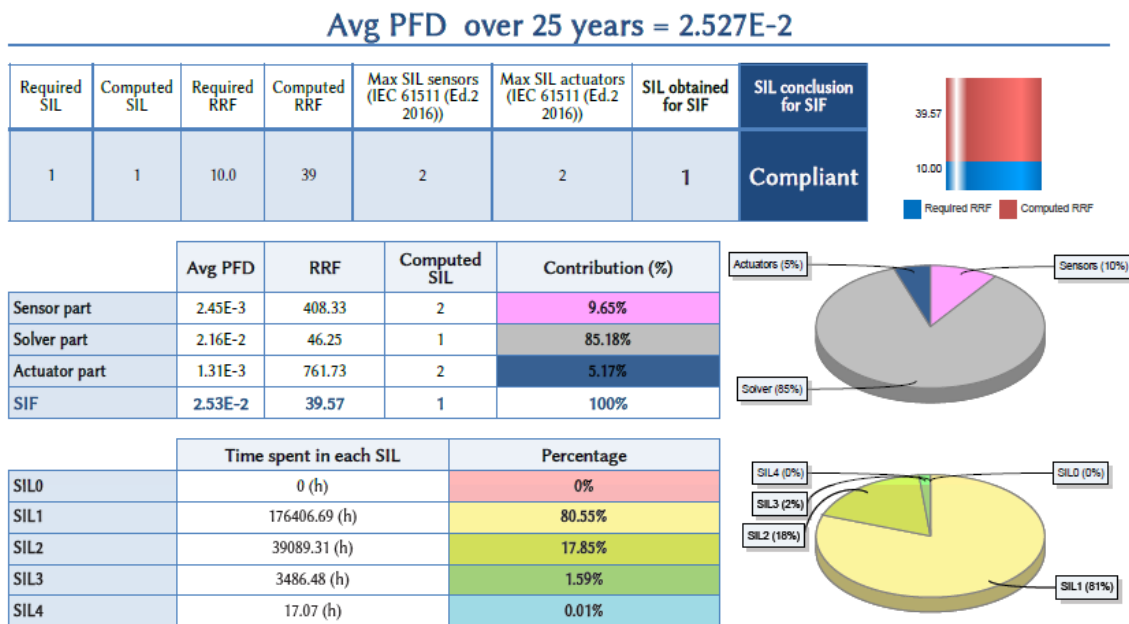
## CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

Cette analyse montre combien de temps (sur 25 ans) le système fonctionne à un niveau donné de sécurité :

SIL1 176 460.65 h 80.55 %

SIL2 39 089.31 h 17.85 %

SIL3 3 486.48 h 1.59 %



**Figure IV.15** : les resultats de SIF 02.

### ❖ Paramètres Techniques

Pour chaque composant, on évalue :

Lambda ( $\lambda$ ) : taux de défaillance par heure (exprimé en  $h^{-1}$ ).

MTTR (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

SFF (Safe Failure Fraction) : pourcentage de défaillances sûres ou détectables.

RRF (Risk Reduction Factor) : facteur de réduction du risque (inverse du PFD)

# CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le réservoir de stockage d'hexène 950-461

	Component		Parameters	Other parameters	Partial tests
Sensors	S1.1	LSH45054	Same configuration as component LAL45001 of loop SIF:LAL45001		
Solver	SOLVER	DCS SIF:LAL45001	DCS	Law=Advanced, Lambda=5.00E-6h <sup>-1</sup> , MTTR=8.00Hour(s), T1=1.00Year(s), T0=1.00Year(s), Gamma=0	Chi=1, Lambda*=5.00E-6h <sup>-1</sup> , Pi=3.00Hour(s), Sigma=1.00, Omega1=0, Omega2=0
Actuators	A1.1	P-670-462	Safety relay	Type A, Law=Tested when unit is stopped, T1=1.00y, T0=0y, Lambda DU=3.00E-7h <sup>-1</sup> , Lambda DD=0h <sup>-1</sup> , Lambda SU=0h <sup>-1</sup> , Lambda SD=0h <sup>-1</sup> , SFF=0%, Gamma=0	Chi=1, Sigma=1.00, Lambda*=0h <sup>-1</sup> , Omega1=0, Omega2=0, Proof test coverage=100.00%, Safe repair=Yes

**Figure IV.16** : Paramètres Techniques.

Le tableau suivant présente les composants d'un système de sécurité, leur type, leur utilisation dans les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIF) et la période de test associée. Les composants, tels que les transmetteurs de niveau, relais de sécurité et vannes électriques, sont utilisés dans différents SIF comme **LAL45001** et **LAH45054**. Chaque composant doit être testé annuellement pour garantir son bon fonctionnement et respecter les normes de sécurité. Cette approche assure la fiabilité du système et minimise les risques de défaillance, essentiel pour la sécurité industrielle.

**Tableau IV.10** : Les tests periodiques.

## Test period synthesis

Component tag name	Component type	Used in SIF:	Test period
DCS	DCS	SIF:LAL45001, SIF: LAH45054	1.00 Year(s)
LAL45001	Level transmitter	SIF:LAL45001	1.00 Year(s)
LSH45054	Level transmitter	SIF: LAH45054	1.00 Year(s)
P-670-462	Safety relay	SIF: LAH45054	1.00 Year(s)
YV42002	Electrical on/off valve	SIF:LAL45001	1.00 Year(s)

## IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué les méthodologies HAZOP et LOPA sur le bac de stockage d'hexène du complexe CP2K afin d'identifier les déviations potentielles et d'évaluer les niveaux de sécurité instrumentée associés. L'analyse HAZOP a permis de repérer les déviations critiques liées aux paramètres de fonctionnement (pression, température, niveau), ainsi que les causes et conséquences possibles en cas de défaillance.

## **CHAPITRE IV : Evaluation de la performance de SIS de le** **réservoir de stockage d'hexène 950-461**

L'étude LOPA, quant à elle, a permis de déterminer le SIL requis pour chaque scénario d'accident majeur et de le comparer au SIL atteint, en s'appuyant sur les calculs réalisés via le logiciel GRIF.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- ✚ Scénario d'implosion du bac
  - ❖ SIF 1 (LAL 45001)
  - ✓ SIL requis = SIL 0
  - ✓ SIL atteint = SIL 1
    - Le niveau de sécurité atteint dépasse les exigences minimales.
- ✚ Scénario de débordement du bac
  - ❖ SIF 2 (LAH 45054) : Scénario de débordement du bac
  - ✓ SIL requis = SIL 1
  - ✓ SIL atteint = SIL 1
    - Conformité parfaite entre les exigences et la performance réelle.
- ✚ Scénario de surpression
  - ❖ SIF (LAH 45054)
  - ✓ SIL requis = SIL 0
  - ❖ SIF (PT 46003)
  - ✓ SIL requis = SIL 0
  - ❖ SIF proposé (PAH )
  - ✓ SIL requis = SIL 1

En conclusion, les fonctions de sécurité mises en place sont globalement efficaces et adaptées aux niveaux de risques identifiés. Toutefois, l'ajoute d'une mesure complémentaire dans le cas de la surpression renforcerait d'avantage la robustesse du système.

# **CONCLUSION**

### **Conclusion**

L'objectif de ce mémoire était d'évaluer le niveau de sécurité instrumentée (SIL) associé au bac de stockage d'hexène du complexe CP2K de Sonatrach à Skikda, en s'appuyant sur deux approches reconnues dans le domaine de la gestion des risques industriels : la méthode HAZOP pour l'identification des déviations potentielles duprocédé, et la méthode LOPA pour l'analyse des barrières de protection et la détermination du niveau SIL requis selon les standards internationaux, notamment la norme IEC 61511.

Au terme de cette étude, l'application rigoureuse des deux méthodologies a permis de mettre en évidence les scénarios d'accidents majeurs auxquels le bac pourrait être exposé, à savoir l'implosion, le débordement et la surpression. Grâce aux données recueillies et à l'utilisation du logiciel GRIF pour les calculs quantitatifs, il a été possible de comparer les niveaux de sécurité requis avec ceux réellement atteints sur le terrain.

Les résultats montrent que les fonctions instrumentées de sécurité (SIF) mises en œuvre sont globalement adéquates. Dans le cas de l'implosion, le niveau de sécurité atteint (SIL 1) dépasse les exigences minimales (SIL 0), ce qui témoigne d'une marge de sécurité supplémentaire. Pour le scénario de débordement, le niveau SIL requis est parfaitement respecté. En revanche, l'analyse a révélé que le scénario de surpression pourrait bénéficier d'un renforcement, à travers l'ajout d'une fonction de sécurité complémentaire afin d'augmenter la robustesse globale du système.

Ces constats nous ont conduits à formuler plusieurs recommandations. Il est notamment conseillé de compléter les barrières existantes par des dispositifs supplémentaires dans les cas critiques, de mettre à jour régulièrement les études HAZOP et LOPA afin de tenir compte de l'évolution du procédé et des retours d'expérience, et de promouvoir une culture de sécurité plus intégrée à travers la formation continue des opérateurs aux systèmes de sécurité instrumentée.

Enfin, ce travail ouvre la voie à des perspectives de recherche plus larges. L'évaluation dynamique des risques en temps réel, l'intégration des facteurs humains dans l'analyse de la performance des systèmes de sécurité, ainsi que la prise en compte de la cybersécurité dans les architectures des SIS, représentent autant de pistes intéressantes pour approfondir la réflexion sur la fiabilité et la résilience des installations industrielles face aux menaces actuelles et futures.

## **Conclusion**

Ainsi, cette étude a permis non seulement de valider l'efficacité du système de sécurité d'un équipement critique, mais aussi de souligner l'importance d'une approche globale, évolutive et préventive dans la gestion des risques industriels.

### *Liste des Références*

- [1] : Desroches A, Courtois M, Vesseron P, Gourisse D. Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité. Paris : Lavoisier - Tec & Doc ; 1995.
- [2] : OHSAS 18001. Système de management de la santé et de la sécurité au travail – Spécification. British Standards Institution ; 2007.
- [3] : Gouriveau R. Analyse de risques, formalisation des connaissances et structuration des données pour l'intégration des outils d'étude et de décision [Thèse de doctorat]. Institut National Polytechnique de Toulouse ; 2003.
- [4] : Farmer F. R. Siting criteria: a new approach. Atom ; 1967 ; 128:152–166.
- [5] : ISO/CEI. ISO/IEC Guide 73:2009 – Risk management – Vocabulary. Organisation internationale de normalisation / Commission électrotechnique internationale ; 2009.
- [6] : Hamaidia M. Contribution à l'allocation et à la vérification des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL) à l'aide des réseaux bayésiens [Thèse de doctorat]. Université Badji Mokhtar Annaba ; 2019.
- [7] : IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. Genève : International Electrotechnical Commission ; 2010.
- [8] : IEC 61511. Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Genève : International Electrotechnical Commission ; 2003.
- [9] : ENSPM. Cours D1-2/A : Tuyauterie – robinetterie – matériel de stockage des gaz liquéfiés ; 2009.
- [10] : Yahiaoui H. Les risques liés aux stockages des hydrocarbures. Cours IAP ; 2016.
- [11] : Chbira. L'explosion et l'incendie [Cours]. Université de Batna ; 2016.
- [12] : Zerbi H. Prévention des risques professionnels [Mémoire de fin d'études]. Encadré par Pr. Hadjaj A.

## Liste des Références

- [13] : Villemeur A. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : Fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité. Paris : Eyrolles ; 2007.
- [14] : ISO. ISO 31000:2018 – Gestion du risque – Lignes directrices. Organisation internationale de normalisation ; 2018.
- [15] : Boucly P. La sécurité des procédés industriels – Évaluation et gestion des risques. Paris : Éditions Technip ; 2008.
- [16] : INERIS. Retour d'expérience et analyse des accidents industriels. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques ; 2010. Disponible sur : <https://www.ineris.fr>
- [17] : IEC 61511-1. Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 1: Framework, definitions, system, hardware and application programming requirements. Genève : International Electrotechnical Commission ; 2016.
- [18] : Mkhida A. Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes instrumentés de sécurité intégrant de l'intelligence [Thèse de doctorat]. Nancy Université, Institut National Polytechnique de Lorraine ; 2008.
- [19] : Sallak M. Évaluation 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 Université, Institut National Polytechnique de Lorraine ; 2007.
- [20] : Aya M. Étude des systèmes instrumentés de sécurité (SIS) [Mémoire de fin d'études]. Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene ; 2005.
- [21] : 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 de Bordeaux 1 ; 2008.
- [22] : Senouci M. Étude d'allocation et de vérification de niveau SIL d'un système de détection F&G [Mémoire de master]. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, IMSI ; 2022.
- [23] : Schonbeck M., Rausand M., Rouvroye J. Human and organisational factors in the operational phase of safety instrumented systems: A new approach. Safety Science ; 2010 ; 48:310–318.

## Liste des Références

- [24] : Royer M. HAZOP : une méthode d'analyse des risques – Présentation et contexte. Techniques de l'ingénieur, base documentaire SE4030 ; 2009.
- [25] : CEI 61882. Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide. Genève : Commission Électrotechnique Internationale ; 2001.
- [26] : Deutsches Institut für Normung. Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen für MSR-Schutzeinrichtungen. Berlin : DIN ; s.d.
- [27] : Olivier I. Méthode LOPA : principe et exemple d'application ; 2012.
- [28] : Royer M. HAZOP : une méthode d'analyse des risques – Présentation et contexte. Techniques de l'ingénieur, base documentaire SE4030 ; 2009. Document délivré le : 23/06/2014, pour le compte : 7200100403 – Techniques Ingénieur.
- [29] : Ahmed R. Modélisation et simulation thermo-hydraulique d'un générateur de vapeur industriel en régime transitoire par le code RELAP P5/MOD3.2 [Thèse de doctorat] ; 2007.
- [30] : Signoret J.-P. High integrity protection system (HIPS): Overcoming SIL calculation difficulties. Rapport technique. TOTAL, Pau ; 2004.
- [31] : Villemeur A. Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Paris : Eyrolles ; 1998.
- [32] : Rauzy A. New algorithms for fault trees analysis. Reliability Engineering & System Safety ; 1993 ; 59(5):203–211.
- [33] : Rauzy A., Dutuit Y., Signoret J.-P. Assessment of safety integrity levels with fault trees. In : Proceedings of ESREL. Estoril, Portugal ; 2006.
- [34] : 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 – Proceedings of ESREL Estoril, Portugal ; 2006.
- [35] : SONATRACH. (2015, décembre). Site internet officiel. <https://www.sonatrach.com>
- [36] : CP2K. (s.d.). *Manuel opératoire d'exploitation – Documentation interne*. Complexe Pétrochimique CP2K, SONATRACH.

## **Liste des Références**

[37] : Fiche de données de sécurité. (2018, 30 novembre). *Conformément au Règlement (CE) No 453/2010* (Version 1.2). Date de révision : 30.11.2018.

## ANNEXE 1 : Taux d'échec pour les pannes matérielles aléatoires, les couvertures, les périphériques et Unités logiques de contrôle d'entrée PSF

**Table 3: Failure rates for random hardware failures, coverages and PSF for input devices**

Input Devices								
Component	$\lambda_{crit}^{1)}$	$\lambda_D^{1)}$	$c_D$	$c_{ST}$	$\lambda_{DU}^{1)}$	$\lambda_{STU}^{1)}$	SFF	PSF
Pressure Switch, Conventional	3.4	2.3	30 %	20 %	1.6	0.9	52 %	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ <sup>2)</sup>
Pressure Transmitter	1.3	0.8	60 %	20 %	0.3	0.4	75 %	$3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>
Level (displace) Transmitter <sup>3)</sup>	3.0	1.4	60 %	50 %	0.6	0.8	81 %	$3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>
Temperature Transmitter	1.8	0.7	60 %	60 %	0.3	0.4	84 %	$3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>
Flow Transmitter	3.7	1.5	60 %	50 %	0.6	1.1	84 %	$3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$ <sup>3)</sup>
Gas detector, catalytic	5.0	3.5	50 %	40 %	1.8	0.9	65 %	$3 \cdot 10^{-2} - 0.1$ <sup>4)</sup>
Gas detector IR point	4.0	3.3	80 %	70 %	0.7	0.2	84 %	$6 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-3}$ <sup>4,5)</sup>
Gas detector IR line	5.3	3.3	80 %	70 %	0.7	0.6	88 %	$6 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-2}$ <sup>4,5)</sup>
Smoke detector	3.7	1.3	40 %	50 %	0.8	1.2	81 %	$10^{-2} - 0.05$ <sup>6)</sup>
Heat detector	2.4	0.9	50 %	50 %	0.5	0.8	81 %	$0.05 - 0.5$ <sup>7)</sup>
Flame detector	8.2	4.1	60 %	50 %	1.6	2.1	80 %	$3 \cdot 10^{-2} - 0.5$ <sup>8)</sup>
ESD Push button	1.1	0.3	20 %	20 %	0.2	0.6	78 %	$10^{-5}$

<sup>1)</sup> All failure rates are given per  $10^6$  hours

<sup>2)</sup> Without/with the sensing line

<sup>3)</sup> For smart/conventional, respectively

**Table 4: Failure rates for random hardware failures, diagnostic coverage's and PSF for control logic units**

Control Logic Units								
Component	$\lambda_{crit}^{1)}$	$\lambda_D^{1)}$	$DC_D$ <sup>2)</sup>	$DC_{ST}$ <sup>2)</sup>	$\lambda_{DU}^{1)}$	$\lambda_{STU}^{1)}$	SFF	PSF
Standard industrial PLC – single system	30	15	67 %	20 %	5.0	12.0	83	$5 \cdot 10^{-4}$
Programmable safety system – single system	20	10	90%	20 %	1.0	8.0	95%	$5 \cdot 10^{-5}$
Hardwired safety system – single system	2	1	90%	0 %	0.1	1.0	95%	$0.5 \cdot 10^{-5}$
Field bus coupler	0.2	0.01	90 %	20 %	0.001	0.08	99.5%	$10^{-5}$
Field bus CPU/Communic. unit	0.2	0.01	90 %	20 %	0.001	0.08	99.5%	$10^{-5}$

1) All failure rates are given per  $10^6$  hours

2) For logic units we give diagnostic coverage (DC) rather than coverage (c). Critical (random hardware) failures for control logic units are only detected by automatic self-testing.

**Table 5: Failure rates for random hardware failures, coverage's and PSF for output devices**

Output devices								
Component	$\lambda_{crit}^{1)}$	$\lambda_D^{1)}$	$c_D$	$c_{ST}$	$\lambda_{DU}^{1)}$	$\lambda_{STU}^{1)}$	SFF	PSF
ESV/XV incl. actuator (ex. pilot)	5.4	2.7	25 %	0 %	2.0	2.7	63 %	$10^{-6} - 10^{-5}$
Topside X-mas tree ESV incl. actuator (ex. pilot)	2.1	1.1	25 %	0 %	0.8	1.0	61 %	$10^{-6} - 10^{-5}$ <sup>2)</sup>
Blowdown valve incl. actuator (ex. pilot)	3.7	2.7	25 %	0 %	2.0	1.0	46 %	$10^{-6} - 10^{-5}$
Solenoid / pilot valve	3.2	1.3	30 %	0 %	0.9	1.9	71 %	- <sup>3)</sup>
Control valve, small	7.5	7.1	60 %	70 %	2.8	0.1	62 %	$10^{-5}$
Control valve, large	2.8	2.1	60 %	70 %	0.8	0.2	70 %	$10^{-5}$
Pressure relief valve, PSV	1.2	1.0	0 %	0 %	1.0	0.2 <sup>4)</sup>	17 %	$10^{-3}$

1) All failure rates are given per  $10^6$  hours

2) For complete and incomplete functional testing, respectively

3) PSF for pilot valve included in PSF for main valve.

4) Note that trip of PSV does not necessarily lead to system trip



**Annexe 2 : Chambre de flash**



**Annexe 3 : Réacteur 950-155**



**Annexe 4 : P&ID du bac de stockage d'hexene**



**Annexe 5 : Détecteur de flamme**

**Documents :**

Document 1 : fiche de sécurité de hexène ..\Downloads\hexène-1.pdf

Document 2 : P&ID PB-1007\_4.pdf

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation du niveau de sécurité instrumentée (SIL) d'un bac de stockage d'hexène au complexe CP2K de Sonatrach à Skikda. En raison du caractère inflammable de l'hexène, des analyses HAZOP et LOPA ont été menées pour identifier les scénarios accidentels et vérifier la conformité des fonctions instrumentées de sécurité (SIF) aux exigences de la norme IEC 61511. Les résultats montrent une sécurité globalement satisfaisante, mais recommandent un renforcement pour le scénario de surpression. L'étude met en avant l'importance d'une gestion des risques continue, évolutive et intégrée.

**Mots-clés :** Sécurité instrumentée ; SIL ; Bac de stockage ; Hexène ; Sonatrach CP2K ; HAZOP ; LOPA ; IEC 61511 ; Analyse de risque ; Systèmes instrumentés de sécurité (SIS) ; Scénarios accidentels ; Barrières de protection ; SIF ; Gestion des risques industriels.

## Abstract

This thesis focuses on the assessment of the Safety Integrity Level (SIL) of a hexene storage tank at the Sonatrach CP2K complex in Skikda. Due to the flammable nature of hexene, HAZOP and LOPA analyses were conducted to identify potential accident scenarios and verify the compliance of the Safety Instrumented Functions (SIF) with the IEC 61511 standard. The results indicate overall adequate safety, with a recommendation to strengthen the system in case of overpressure. The study highlights the need for continuous, adaptive, and integrated risk management.

**Keywords :** Safety Instrumented System ; SIL ; Storage tank ; Hexene ; Sonatrach CP2K ; HAZOP ; LOPA ; IEC 61511 ; Risk analysis ; SIS ; Accident scenarios ; Protection layers ; SIF ; Industrial risk management.

## ملخص

التابع لسوناطراك CP2K لخزان تخزين الهكسين في مجمع (SIL) يتناول هذا البحث تقييم مستوى السلامة المُبرمجة لتحليل السيناريوهات الخطرة LOPA وHAZOP ونظرًا لطبيعة الهكسين القابلة للاشتعال، تم اعتماد طريقتي بسكيدة IEC 61511 مع متطلبات المعيار (SIF) والتحقق من مدى توافق وظائف السلامة المُبرمجة

ويؤكد هذا العمل على .أظهرت النتائج أن نظام السلامة فعّال بشكل عام، مع توصية بتعزيزه في حالة خطر الضغط الزائد .أهمية إدارة المخاطر بشكل مستمر ومتكامل ومتطور

### **الكلمات المفتاحية**

السلامة المُبرمجة ؛ SIL ؛ خزان التخزين ؛ الهكسين ؛ سوناطراك CP2K ؛ طريقة HAZOP ؛ طريقة LOPA ؛ المعيار IEC 61511 ؛ تحليل المخاطر ؛ أنظمة السلامة المُبرمجة (SIS) ؛ السيناريوهات الخطرة ؛ طبقات الحماية ؛ وظائف السلامة المُبرمجة (SIF) ؛ إدارة المخاطر الصناعية.