

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Thelidji- Laghouat



FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : GÉNIE DES PROCÉDÉS

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

DJEBALI Ahmed

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Hygiène et sécurité industrielle

OPTION : Hygiène et sécurité industrielle

Thème

Sécurité fonctionnelle des installations industrielles

**Application de la norme ISO 13849 sur
la station de pompage SP4, SONATRACH, Hassi R'mel**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ZERROUKI Hamza	MCA	Président
ABDELMOUIZ Ahmed	MCB	Examineur
HASSANI Mouaadh	MCB	Encadreur

Promotion : JUIN 2025

Titre du mémoire

Sécurité fonctionnelle des installations industrielles (Application de la norme ISO 13849 sur la station de pompage SP4, SONATRACH, Hassi R'mel)

Résumé :

La sécurité fonctionnelle vise à garantir la fiabilité des systèmes industriels en réduisant les risques liés aux défaillances. Cette thèse explore les notions fondamentales, les normes et le processus de mise en œuvre de la sécurité fonctionnelle, avec une application spécifique à la station de pompage SP4-Hassi R'mel. L'étude de cas porte sur l'analyse du système de torchère et l'évaluation des niveaux de performance requis pour assurer une sécurité optimale.

Mots-clés : Sécurité fonctionnelle, ISO 13849-1, CEI 62061, gestion des risques, station de pompage, torche industrielle.

Memory title

Functional Safety of Industrial Installations (Application of ISO 13849 Standard on Pumping Station SP4, SONATRACH, Hassi R'mel)

Abstract

Functional safety ensures the reliability of industrial systems by minimizing risks related to failures. This thesis explores fundamental concepts, standards, and the implementation process of functional safety, with a specific application to the SP4-Hassi R'mel pumping station. The case study focuses on the analysis of the flare system and the evaluation of required performance levels to guarantee optimal safety.

Keywords: Functional safety, ISO 13849-1, IEC 62061, risk management, pumping station, industrial flare.

عنوان المذكرة

السلامة الوظيفية للمنشآت الصناعية

(تطبيق المعيار ISO 13849 على محطة الضخ SP4، سوناطراك، حاسي الرمل)

ملخص

تهدف السلامة الوظيفية إلى ضمان موثوقية الأنظمة الصناعية من خلال تقليل المخاطر المرتبطة بالأعطال. تستكشف هذه المذكرة المفاهيم الأساسية والمعايير وعملية تنفيذ السلامة الوظيفية مع تطبيق محدد على محطة الضخ رقم 4 بحاسي رمل، تركز دراسة الحالة على تحليل نظام الشعلة وتقييم مستويات الأداء المطلوبة لضمان السلامة المثلى .

الكلمات المفتاحية: السلامة الوظيفية، ISO 13849-1، CEI 62061، إدارة المخاطر، محطة ضخ، شعلة صناعية.

Dédicaces

Je dédie ce travail modeste à :

Ma chère et vertueuse grand-mère (**Mayma Hadja**), que Allah lui accorde une longue vie et la comble de santé et de sérénité. Ses prières sincères ont été ma force dans les moments de doute et d'effort. Que Dieu la récompense généreusement et bénisse sa présence précieuse dans ma vie.

À **mes chers parents**, source d'amour inconditionnel, de sacrifice et de soutien. Vos efforts inestimables ne seront jamais oubliés. Que Dieu vous accorde longue vie, santé et bonheur éternel

À mon unique petit frère, **Mohamed Abdenour**, lumière de notre foyer, et à **mes petites sœurs chéries**, vous êtes la joie de mon cœur et mon espoir pour l'avenir.

À **mes amis et frères de cœur**, dont la présence a embelli mon parcours. Je pense tout particulièrement à mon grand frère **Mounir Zerarka**, fidèle soutien, et à mon jeune frère au cœur pur, **Younes kharbache**.

Mes remerciements vont également à mes compagnons fidèles : **Walid, Ayoub, Saad, Abdelkader, Islam, El-Hachemi, Ahmed, Abbas, Safouane, Sofiane, Lakhdar**. Votre présence m'a toujours porté, et votre amitié m'est précieuse à jamais.

À mon frère, compagnon de route, **Abdelhadi Barkat**, avec qui j'ai partagé le fardeau de notre spécialité, et ensemble, nous avons dignement représenté notre discipline. Tu as été un appui essentiel et un exemple à suivre.

À **mes frères et collègues de l'université de Laghouat**, dont la gentillesse et l'authenticité ont touché mon cœur. Je pense tout particulièrement à **Khalil, Mohamed Ali, Badr tamam**, et **Slim**. Vous avez été plus que des camarades, vous avez été une famille.

À **mes collègues de la Station de Pompage n°04 à Hassi R'mel**, merci pour l'esprit d'équipe et la solidarité partagée.

Enfin, à **nos frères de Gaza la fière**, nous adressons cette prière : Ô Seigneur, soutiens-les de Ton secours, raffermis leurs cœurs, accorde-leur patience et victoire, et ébranle leurs ennemis. Amîn.

Remerciements

Louange et gratitude soient d'abord rendues à Allah, en toute chose et en toute circonstance, Lui qui m'a accordé la réussite et guidé mes pas vers l'achèvement de ce mémoire, me donnant la patience et la persévérance nécessaires jusqu'à son aboutissement.

À l'issue de ce travail scientifique, j'ai l'immense honneur d'adresser mes plus sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont soutenu, conseillé et encouragé tout au long de cette recherche.

J'exprime toute ma gratitude à mon encadrant, le **Dr. Mouaadh Hassani** – que Allah le préserve – pour ses orientations précieuses, son accompagnement attentif, ses conseils avisés et son soutien constant. Qu'Allah le récompense pour tout le bien qu'il m'a prodigué, et qu'Il bénisse son savoir et son dévouement.

Mes remerciements les plus respectueux vont également à **Dr. Hamza Zerrouki**, le chef d'option d'Hygiène et Sécurité Industrielle, pour sa confiance, son appui et sa bienveillance scientifique, ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de soutenance, une marque d'estime que j'apprécie profondément.

Je tiens également à remercier chaleureusement le **Dr. Ahmed Abdelmouiz** pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de ce travail. Sa présence et ses remarques pertinentes constituent pour moi une source de fierté et de motivation pour poursuivre le chemin de la recherche.

Enfin, j'adresse ma gratitude la plus sincère à tous les enseignants et enseignantes qui m'ont formé, chacun en son nom et à sa place, depuis l'école primaire jusqu'à l'université. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mon respect.

Table des Matières

Table des Matières	ii
Liste des Tableaux	iv
Liste des Figures	v
Liste des Abréviations	vi
Introduction Générale	2
Chapitre I :	4
Introduction :	4
Glossaire :	4
1. Définition de « la sécurité fonctionnelle » :	5
2. Importance de la sécurité fonctionnelle :	6
3. Normes et Standards dédiés à la sécurité fonctionnelle :	6
4. Cycle de vie :	12
Conclusion	12
Chapitre II	13
Introduction :	13
1. Identification des Risques :	13
2. Définition les fonctions de sécurité :	15
3. Estimation des risques :	18
4. Evaluation des risques :	20
5. Définir le niveau de sécurité exigés :	21

6. Conception, sélection et application des moyens de protection :	23
7. Vérification la fonction de sécurité :	24
Conclusion	29
Chapitre III	30
.1 Introduction:.....	30
2. Présentation du GSP4 :	31
.3 Description des activités de GSP4 :.....	32
4. Présentation de la station objet de l'étude :	33
Conclusion	40
<i>Conclusion Générale</i>	41
Conclusion générale	41
Bibliographie.....	43
Annexes.....	44

Liste des Tableaux

N° Tab	Titre du tableau	Page
Tab.1	Quelques exemples de types de Normes internationales (A, B & C)	07
Tab.2	Modèle de tableau d'analyse AMDEC	14
Tab.3	Modèle de tableau d'analyse HAZOP	14
Tab.4	Modèle de tableau d'analyse du méthode APR	15
Tab.5	Classification et Détermination des Niveaux de Sécurité (SIL)	22
Tab.6	Champ d'application des normes ISO 13849-1 et CEI 62061	23
Tab.7	Check-list de conformité HSE pour l'évaluation et l'intégration des dispositifs de protection	25
Tab.8	Les différentes stations du GSP4-Hassi R'mel	31
Tab.9	Etude APR pour le système de torchère	35
Tab.10	Principales fonctions de sécurité et leur mise en œuvre dans ce système de torchère	36
Tab.11	Détermination des niveaux de performance requis (PLr) pour les sous-systèmes analysés	37
Tab.12	Identification des sous-systèmes des fonctions de sécurité	38
Tab.13	Calcul de la PFHd à partir du MTTFd	39
Tab.14	Comparaison entre les PLr et les PL des fonctions de sécurité	40

Liste des Figures

N° Tab	Titre de la figure	Page
Fig.1	Les normes européennes harmonisées relative à la sécurité des installations	10
Fig.2	Positionnement des règles de sécurité des machines et mécanisme dans le DE N°91-05.	11
Fig.3	Schéma du Cycle de vie selon la norme CEI 61511	13
Fig.4	Processus de sécurité fonctionnelle	12
Fig.5	Quelques Exemples des fonctions de sécurité	18
Fig.6	Principaux paramètres de l'estimation des risques	19
Fig.7	Logigramme de risque	20
Fig.8	Arborescence des risques selon la norme ISO 13849-1	21
Fig.9	Les mesures techniques de protection	24
Fig.10	Probabilité de défaillance dangereuse par heure	26
Fig.11	Détermination du PLglobal selon les niveaux PL des sous-systèmes (ISO 13849-1)	27
Fig.12	Le Groupe de stations de pompage N°4 - Hassi R'mel	31
Fig.13	Structure organisationnelle du Groupement SP4 et ses services	32
Fig.14	Hiérarchie et rôles au sein du Service Sécurité Industrielle du SP4	32
Fig.15	Fiche Technique (Système de Torche - Projet LZ2 24Ø" GPL)	34
Fig.16	Comment définir le niveau d'exigence de performance (PLr)	37
Fig.17	Détermination du PLglobal	39

Liste des Abréviations

Abréviatiion	Signification
BPCS	Basic Process Control System
	Système de Contrôle de Processus de Base
SIS	Safety Instrumented System
	Système Instrumenté de Sécurité
ISO	International Organization for Standardization
	Organisation Internationale de Normalisation
CEI / IEC	International Electrotechnical Commission
	Commission Électrotechnique Internationale
SIL	Safety Integrity Level
	Niveau d'Intégrité de Sécurité
ASIL	Automotive Safety Integrity Level
	Niveau d'Intégrité de Sécurité dans l'Automobile
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
	Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE)
PL	Performance Level
	Niveau de Performance
FS	Safety function
	Fonction de sécurité

Introduction Générale

Introduction Générale

La sécurité fonctionnelle est un domaine critique de l'ingénierie qui revêt une importance capitale dans la conception, l'exploitation et la maintenance des systèmes industriels, en particulier ceux qui fonctionnent dans des environnements à haut risque tels que les installations pétrolières et gazières. Son objectif fondamental est de réduire les risques à un niveau tolérable grâce à la mise en œuvre de fonctions de sécurité spécifiques conçues pour prévenir les défaillances dangereuses ou les contrôler lorsqu'elles se produisent ^[1].

Cette discipline repose sur des cadres normatifs internationaux solides, notamment la série de normes **CEI 61508** ^[2] pour la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables (E/E/PE) et la norme **ISO 13849** ^[3] pour la sécurité des machines, qui fournissent des lignes directrices rigoureuses pour garantir la fiabilité et l'intégrité des systèmes de sécurité.

Dans ce contexte, les systèmes de torchage, qui sont essentiels pour gérer les gaz résiduels en cas de surpression ou d'urgence dans les installations pétrolières et gazières, illustrent parfaitement la nécessité d'une sécurité fonctionnelle irréprochable. Bien qu'ils soient vitaux pour la sécurité opérationnelle, une défaillance de ces systèmes peut avoir des conséquences catastrophiques, allant d'explosions et d'incendies à des émissions toxiques et des dommages environnementaux importants. La complexité inhérente à ces systèmes et les risques associés soulignent la nécessité impérieuse de concevoir et de maintenir des systèmes de sécurité fonctionnelle robustes, capables de garantir leurs performances et de prévenir de tels incidents.

Cette thèse, intitulée « **Sécurité fonctionnelle des systèmes de sécurité : étude de cas du système de torchères de la station de pompage n° 4 (SP4-Hassi Rmel)** », s'inscrit dans cette perspective. Elle vise à approfondir la compréhension des principes fondamentaux de la sécurité fonctionnelle et à démontrer leur application pratique à travers une analyse détaillée d'un système critique réel. L'objectif principal est d'explorer comment une approche systématique de la sécurité fonctionnelle, conforme aux normes internationales, peut contribuer à réduire les risques résiduels à un niveau acceptable, tout en optimisant les coûts liés à la conception, à la mise en œuvre et à la maintenance des systèmes.

Pour atteindre ces objectifs, cette thèse est structurée en trois chapitres principaux :

- **Chapitre I** : Principes fondamentaux de la sécurité fonctionnelle.

Ce chapitre présente les concepts fondamentaux de la sécurité fonctionnelle, notamment les définitions clés, les principes de base de la conception des systèmes de sécurité et une présentation détaillée des concepts de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) et de niveau de performance (PL). Ces concepts sont essentiels pour quantifier les risques et déterminer le niveau de sécurité requis pour une application donnée [4].

- **Chapitre II** : Processus de mise en œuvre de la sécurité fonctionnelle.

Ce chapitre décrit les étapes clés du cycle de vie de la sécurité fonctionnelle, depuis l'identification et l'analyse des risques jusqu'à la validation finale des systèmes de sécurité. Il aborde également les méthodes de sélection et de mise en œuvre des mesures de protection conformément aux normes internationales.

- **Chapitre III** : Étude de cas : système de torchère SP4-Hassi Rmel.

Ce chapitre appliquera les concepts et méthodologies présentés ci-dessus à une étude de cas concrète : le système de torchère de la station de pompage n° 4 (SP4-Hassi Rmel). Il comprendra une analyse approfondie des risques spécifiques associés à ce système, des propositions de mesures de protection appropriées et une évaluation de leur efficacité, illustrant ainsi l'application pratique des principes de sécurité fonctionnelle dans un environnement industriel réel.

En fin de compte, cette thèse vise à démontrer l'efficacité d'une approche rigoureuse de la sécurité fonctionnelle, non seulement pour assurer la protection des personnes et de l'environnement, mais aussi pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la durabilité des installations industrielles. Elle soulignera l'importance d'intégrer dès le début la sécurité fonctionnelle dans le cycle de vie des projets industriels pour une gestion optimale des risques.

Chapitre I

Principes fondamentaux de La sécurité fonctionnelle

Chapitre I : *Principes fondamentaux de la sécurité fonctionnelle*

Introduction :

La sécurité fonctionnelle constitue un pilier essentiel dans la conception et la gestion des systèmes techniques, en particulier dans les domaines où les défaillances peuvent avoir des conséquences critiques sur les personnes, l'environnement ou les biens. Elle se définit comme la partie de la sécurité globale d'un système qui dépend du bon fonctionnement des équipements de commande et de contrôle, notamment dans des environnements industriels tels que les usines, les centrales électriques, les systèmes de transport ou les installations médicales.

Ce premier chapitre vise à introduire les notions fondamentales et les principes généraux qui sous-tendent la sécurité fonctionnelle. Nous aborderons les concepts clés.

Glossaire :

◆ **Sécurité :**

L'aptitude d'une entité à prévenir l'occurrence d'événements dangereux (c'est-à-dire des événements susceptibles d'entraîner des atteintes à la santé des personnes, à l'environnement ou aux biens) ou à réduire les conséquences de tels événements sur les personnes, l'environnement ou les biens.

◆ **Danger :**

Le danger, dont la notion précède celle de risque, se définit comme un potentiel de préjudice ou de nuisance pour les personnes, les biens ou l'environnement.

◆ **Risque :**

Le risque désigne une notion qualitative qui concerne son origine, à savoir sa genèse par l'exposition du système à un danger, situation appelée « situation dangereuse ».

◆ **Cycle de vie de sécurité (SLC) :**

Le cycle de vie de sécurité (Safety Life Cycle, SLC) est fondamental pour l'application des normes CEI 61508 et CEI 61511. Il constitue un cadre technique visant à traiter de façon systématique toutes les activités nécessaires pour assurer l'intégrité de sécurité requise des fonctions de sécurité exécutées par les systèmes relatifs à la sécurité.

◆ Système Instrumenté de Sécurité (SIS) :

Combinaison de capteurs, d'une unité de traitement et d'actionneurs (équipements de sécurité) utilisée pour mettre en œuvre une ou plusieurs fonctions instrumentées de sécurité.

◆ Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF) :

Une fonction instrumentée de sécurité est une fonction assurée par un système E/E/PE (électrique, électronique, électronique programmable) relatif à la sécurité, ou par un dispositif externe de réduction de risque, conçue pour assurer ou maintenir un état de sécurité de l'EUC (c'est-à-dire l'équipement commandé) face à un événement dangereux spécifique.

◆ Fonction de Sécurité :

Fonction visant à réduire la probabilité d'occurrence, ainsi que, potentiellement, les effets et conséquences d'un événement non souhaité dans un système. Ces fonctions peuvent être assurées par des barrières techniques, des barrières humaines (activités humaines), ou par une combinaison des deux. Une même fonction peut être assurée par plusieurs barrières de sécurité.

1. Définition de « la sécurité fonctionnelle » :

La sécurité fonctionnelle est une discipline de l'ingénierie de la sécurité visant à garantir qu'un système ou un équipement peut accomplir ses fonctions critiques de manière sûre et contrôlée, même en cas de défaillance.

La sécurité fonctionnelle se distingue par une approche rigoureuse qui identifie les modes de défaillance spécifiques pouvant avoir un impact critique, fixe des objectifs de fréquence maximale tolérable pour chaque scénario de risque, et intègre des dispositifs appelés "relatifs à la sécurité", dont la fiabilité est essentielle pour maîtriser ces risques.

Ce cadre permet d'assurer une protection optimale des personnes, des biens et de l'environnement, tout en maintenant un équilibre entre sécurité et performance opérationnelle.

Elle définit également comme « Sous-ensemble de la sécurité globale se rapportant au processus et au BPCS (basic process control system), qui dépend du fonctionnement correct du système instrumenté de sécurité (SIS) et d'autres couches de protection ^[5] ».

2. Importance de la sécurité fonctionnelle :

La sécurité fonctionnelle est essentielle dans tous les environnements où des systèmes automatisés ou industriels sont utilisés, en particulier ceux où des défaillances peuvent avoir des conséquences graves. Son importance se manifeste dans plusieurs domaines :

- **Protection des personnes :** La sécurité fonctionnelle protège les vies humaines, notamment des travailleurs, en minimisant les risques d'accidents dans des environnements industriels dangereux (ex. usines, centrales électriques, mines).
- **Protection de l'environnement :** En assurant que des systèmes de sécurité sont en place, on prévient les accidents environnementaux tels que les déversements chimiques, les fuites de gaz ou la contamination des eaux.
- **Conformité réglementaire :** La sécurité fonctionnelle permet aux entreprises de respecter les normes et réglementations, comme celles définies par l'IEC 61508 et l'ISO 26262, qui imposent des exigences strictes pour les systèmes de sécurité.
- **Réduction des coûts à long terme :** Une gestion proactive des risques peut éviter des incidents coûteux, notamment les réparations après sinistres, les amendes réglementaires, ou la perte de réputation.

3. Normes et Standards dédiés à la sécurité fonctionnelle :

Les normes de sécurité fonctionnelle sont des documents qui définissent les exigences techniques, méthodologiques et organisationnelles permettant de garantir que les systèmes de sécurité fonctionneront de manière fiable tout au long de leur cycle de vie. Elles sont essentielles pour la conception, l'installation, l'exploitation, et la maintenance des systèmes de sécurité, notamment dans des environnements industriels où les risques sont élevés.

Les normes sont souvent développées par des organismes de normalisation internationaux ou régionaux, tels que : ISO, IEC, EN et ANSI.

L'objectif est d'harmoniser les exigences de sécurité, d'assurer la conformité et d'établir un cadre commun pour la gestion des risques dans des systèmes critiques.

III.1. Normes Internationales :

En principe, les normes référencées sont des normes internationales (ISO ou CEI). On distingue trois différents types de normes ^[6] :

A. Normes de type A :

Ce sont des Normes fondamentales de sécurité : notions de base, des principes de conception et les aspects généraux applicables à toutes les machines.

B. Normes de type B :

Ce sont des Normes génériques de sécurité : moyen de protection applicable à un large éventail de machines.

C. Normes de type C :

Ce sont des normes exigences de sécurité relatives à une machine ou à un type de machine spécifique.

Type	Référence	Description
A	ISO 12100	Définit les principes généraux de conception pour assurer la sécurité des machines en identifiant les dangers et en réduisant les risques.
	ISO 14121-1	Établit une méthodologie pour l'appréciation et la réduction des risques liés aux machines.
	CEI 61508	Norme fondamentale sur la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables.
B	ISO 14118	Spécifie les mesures pour prévenir le redémarrage involontaire des machines afin de garantir la sécurité des opérateurs.
	ISO 13851	Définit les exigences de conception et d'utilisation des dispositifs de commande bimanuelle pour assurer la protection des opérateurs.
	CEI 62061	Sécurité fonctionnelle des systèmes de commande électrique, électronique et programmable liés à la sécurité
	ISO 13849	Définit les exigences de sécurité pour les parties des systèmes de commande des machines, en prenant en compte la fiabilité et la performance des fonctions de sécurité.
C	ISO 1010-X	Série de normes traitant des exigences de sécurité des équipements électriques utilisés en laboratoire.
	ISO 10218	Définit les exigences de sécurité pour la conception et l'intégration des robots industriels.
	ISO 26262	Spécifie les exigences de sécurité fonctionnelle pour les systèmes électriques et électroniques automobiles.
	CEI 61511	Applique les principes de la CEI 61508 aux systèmes instrumentés de sécurité (SIS) dans l'industrie des procédés, incluant le pétrole, le gaz et la chimie.

Tab.1 : Quelques exemples de types de Normes internationales (A, B & C) ^[6]

✚ **La Norme IEC 61508** ^[7] est la norme de base pour la sécurité fonctionnelle dans les systèmes automatisés. Elle s'applique à tous les secteurs industriels, y compris l'industrie chimique, pétrolière, énergétique, et automobile. Cette norme définit les exigences relatives à la conception, à l'exploitation et à la maintenance des systèmes de sécurité fonctionnelle, en se concentrant particulièrement sur les systèmes électroniques et programmables.

Les principaux aspects de cette norme sont les suivants :

- **Cycle de vie complet** : Elle couvre le cycle de vie complet d'un système de sécurité, de la planification à la décommissions de l'équipement.
- **SIL** : La norme définit 4 niveaux de SIL, chacun représentant le degré d'intégrité de sécurité nécessaire pour le système en fonction du risque acceptable.
 - SIL 1 : Faible niveau de sécurité.
 - SIL 2 : Sécurité modérée.
 - SIL 3 : Haute sécurité.
 - SIL 4 : Très haute sécurité.
- **Redondance et fiabilité** : Des exigences sont définies pour garantir la fiabilité et la redondance des systèmes de sécurité, pour éviter les défaillances.
- **Tests et validation** : La norme exige des tests réguliers, des inspections et des procédures de validation afin d'assurer que les systèmes fonctionnent correctement tout au long de leur cycle de vie.

✚ **La norme ISO 26262** ^[7] est une norme spécialisée pour les véhicules automobiles. Elle concerne la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques et électroniques dans les véhicules, en particulier pour des systèmes critiques comme les airbags, les systèmes de freinage, et les systèmes d'assistance à la conduite.

Les principaux aspects de cette norme sont les suivants :

- **Cycle de vie du système automobile** : Comme l'IEC 61508, cette norme couvre le cycle de vie complet du système, en mettant l'accent sur la conception, l'intégration, le test, et la validation des systèmes de sécurité.

- **Définition des ASIL** : ISO 26262 introduit 4 niveaux de sécurité (ASIL A à D), chacun correspondant à un degré de criticité différent, basé sur la probabilité d'un événement et son impact potentiel.
 - ASIL A : Risque faible.
 - ASIL B : Risque moyen.
 - ASIL C : Risque élevé.
 - ASIL D : Risque très élevé.
- **Systèmes critiques** : La norme met l'accent sur les systèmes critiques pour la sécurité des occupants du véhicule, comme les systèmes de freinage automatique, et les systèmes d'alerte de collision.
- **Analyse des risques et gestion des défaillances** : Un aspect clé de la norme est l'analyse approfondie des risques **FMEA** et la gestion des défaillances pour réduire les risques à un niveau acceptable.

✚ **La norme IEC 61511** ^[7] est utilisée spécifiquement dans les industries de process, telles que la chimie, le pétrole, et le gaz. Elle s'applique aux systèmes instrumentés de sécurité (SIS) et décrit les exigences de sécurité fonctionnelle pour la conception, l'installation, et l'exploitation de ces systèmes dans des environnements industriels.

Les principaux aspects de cette norme sont les suivants :

- **Systèmes instrumentés de sécurité** : La norme se concentre sur l'utilisation de systèmes de contrôle automatisés pour surveiller et protéger les processus industriels. Par exemple, elle peut être utilisée pour le contrôle de la température, de la pression, ou de la concentration de produits chimiques dans un réacteur.
- **Évaluation des risques et SIL** : Comme dans IEC 61508, cette norme définit des niveaux SIL et fournit des directives sur la manière de calculer le niveau de sécurité nécessaire en fonction du risque d'un incident.
- **Validation et tests** : Elle exige des tests rigoureux pour valider que les systèmes de sécurité répondent aux exigences de performance tout au long de leur cycle de vie.

- ✚ La norme ISO 13849 [7] est dédiée à la sécurité des machines industrielles. Elle fournit des lignes directrices pour garantir que les systèmes de commande des machines fonctionnent de manière sûre et fiable pour prévenir les accidents.

Les principaux aspects de cette norme sont les suivants :

- **Composants de sécurité** : La norme définit les exigences pour les composants de sécurité utilisés dans les systèmes de contrôle des machines, comme les arrêts d'urgence, les dispositifs de verrouillage, et les capteurs de sécurité.
- **PL (Performance Level)** : ISO 13849 introduit des niveaux de performance (PL) pour évaluer l'efficacité des fonctions de sécurité.

Les niveaux PL vont de **PLa (niveau le plus bas)** à **PLe (niveau le plus élevé)**.

- **Analyse des risques** : Cette norme exige une évaluation détaillée des risques pour déterminer les niveaux de sécurité appropriés pour chaque machine.

III.2. Normes européennes :

Les normes européennes harmonisées transposent en termes techniques les prescriptions correspondant aux exigences essentielles de sécurité définies par une ou plusieurs directives.

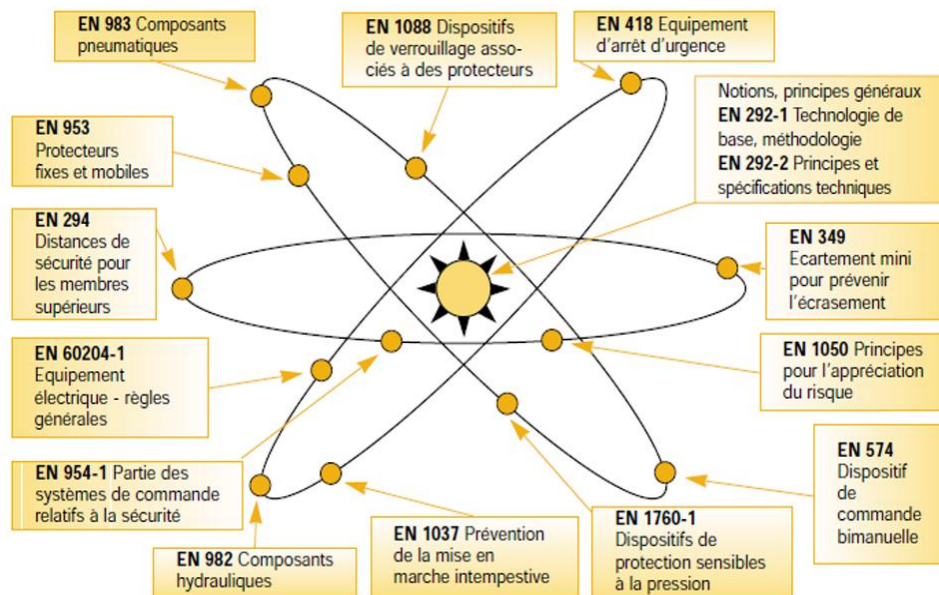


Fig.1 : Les normes européennes harmonisées relative à la sécurité des installations

La figure (1) illustre les principales normes européennes harmonisées assurant la sécurité des installations industrielles. Ces normes définissent les exigences pour l'évaluation des risques, la sécurité des systèmes de commande et des équipements électriques. Elles visent à garantir un niveau de sécurité élevé et uniforme dans l'Union européenne.

III.3. La réglementation Algérienne :

Plusieurs textes réglementaires algériens portent aussi des exigences relatives à la sécurité des installations :

- ◆ **Décret exécutif N° 01-342** : relatif aux prescriptions particulières de protection et de sécurité des travailleurs contre les risques électriques au sein des organismes employeurs (Installations électriques).
- ◆ **Décret exécutif N° 21-257** : Définissant les modalités et la procédure d'autorisation de mise en produit et de mise sous tension des installations et ouvrages relevant des activités d'hydrocarbures.
- ◆ **Décret exécutif N° 21-331** : Définissant les conditions de mise en conformité des installations et équipements relevant des activités hydrocarbures réalisées antérieurement.
- ◆ **Décret exécutif N°92-42** : relatif aux autorisations préalables à la fabrication des produits toxiques ou présentant un risque particulier.
- ◆ **Décret Exécutif N° 91-05** : relatif aux prescriptions générales de protection applicables en matière d'hygiène et de sécurité en milieu du travail (Ce décret édicte dans son contenu les règles de sécurité relative aux machines et mécanismes).

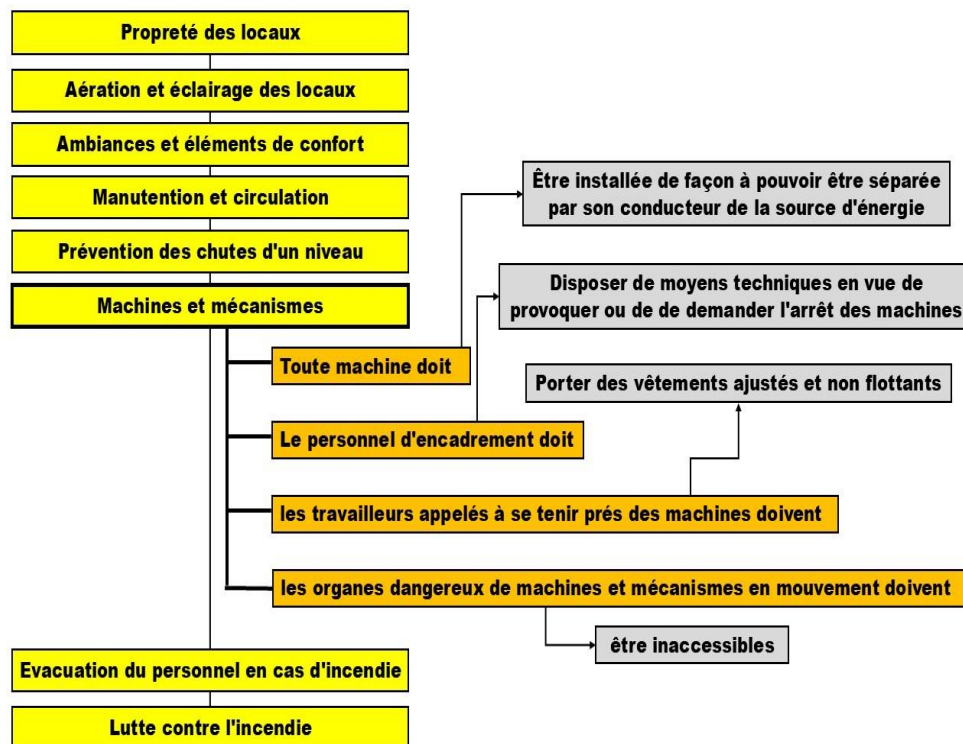


Fig.2 : Positionnement des règles de sécurité des machines et mécanisme dans le DE N°91-05.

4. Cycle de vie :

Le cycle de vie de la sécurité regroupe l'ensemble des étapes indispensables à la spécification, la conception, l'exploitation et la maintenance des systèmes instrumentés de sécurité (SIS). Selon le champ d'application de vos responsabilités, certaines phases, telles que l'exploitation ou la maintenance, peuvent être les seules pertinentes pour vous [8].

Ce cycle est représenté par le schéma suivant :

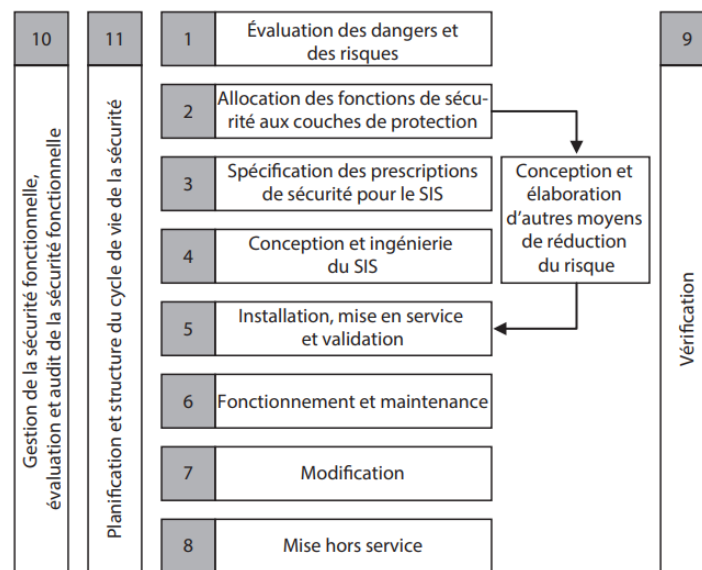


Fig.3 : Schéma du Cycle de vie selon la norme CEI 61511

Conclusion

La sécurité fonctionnelle est un pilier essentiel de la prévention industrielle moderne. En comprenant sa définition, son importance, les normes qui l'encadrent ainsi que son cycle de vie, on saisit l'enjeu de concevoir des systèmes capables de réagir de manière sûre en cas de défaillance ou de situation dangereuse.

Elle permet ainsi de garantir un haut niveau de sécurité tout au long de la vie des installations, de la conception à la mise hors service, en assurant la maîtrise des risques techniques et humains.

Chapitre II

*Processus de mise en œuvre
de la sécurité fonctionnelle*

Chapitre II

Processus de mise en œuvre de la sécurité fonctionnelle

Introduction :

Le processus de sécurité fonctionnelle constitue un élément essentiel de la réduction des risques dans la gestion de la sécurité des installations industrielles.

La figure ci-dessous illustre les différentes étapes de la mise en œuvre, du contrôle et de la validation des systèmes de sécurité :

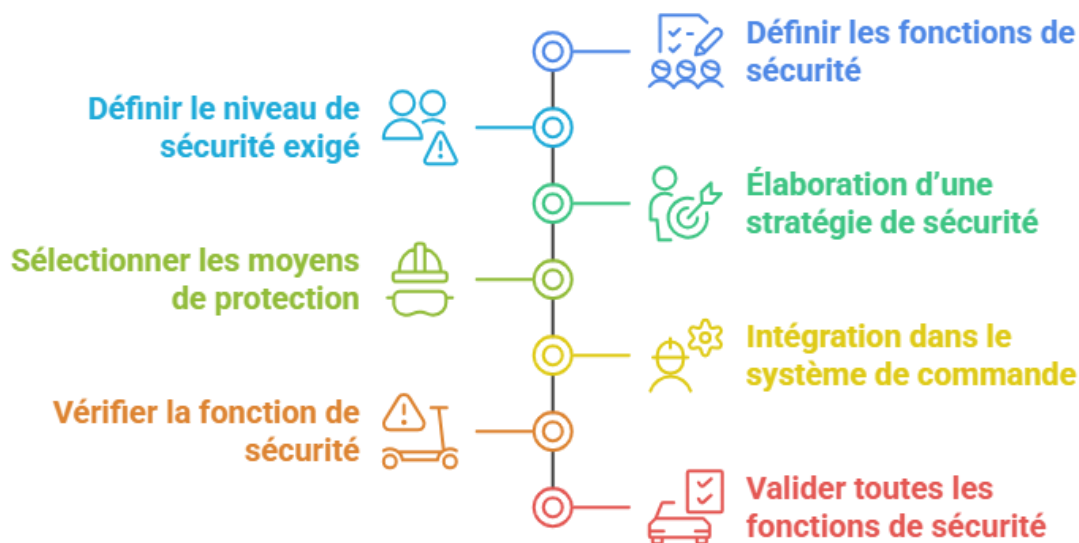


Fig.4 : Processus de sécurité fonctionnelle

1. Identification des Risques :

Dans le domaine de la gestion des risques, l'évaluation des risques est l'ensemble des méthodes consistant à calculer la criticité (Probabilité et gravité) des dangers.

Elle vise outre à les quantifier, à qualifier les dangers (qui doivent donc préalablement avoir été identifiés). Elle se base sur « l'utilisation de faits scientifiques pour définir les effets sur la santé d'une exposition d'individus ou de populations à des matériaux ou à des situations dangereuses ». Il est une étape clé de la sécurité fonctionnelle et s'appuie sur plusieurs méthodes d'analyse, tels que :

1.1. AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) :

Cette technique a pour but d'étudier, d'identifier, de prévenir ou au moins de réduire les risques de défaillances d'un système, d'un processus, d'un produit.

L'Association française de normalisation (Afnor) définit l'AMDEC comme étant une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système.

Tab.2 : Modèle de tableau d'analyse AMDEC

Fonction du produit	Mode de défaillance	Effet de la défaillance	Causes possibles de la défaillance	Evaluation				Actions préventives		Résultats				
				Détection	Occurrence	Gravité	Criticité	Recommandées	Mises en places	Détection	Occurrence	Gravité	Nouvelle criticité	

1.2. HAZOP (Hazard and Operability analysis):

C'est une technique d'analyse structurée et systématique utilisée pour identifier les dangers potentiels et les problèmes d'opérabilité dans un procédé industriel. Elle repose sur l'examen détaillé de chaque étape d'un système en fonctionnement, en utilisant des mots-guides (comme « plus », « moins », « autre que ») afin de détecter les écarts possibles par rapport aux conditions normales, d'en analyser les causes et les conséquences, et de proposer des mesures correctives pour réduire ou éliminer les risques liés à la sécurité, la santé, l'environnement et le bon fonctionnement de l'installation.

Tab.3 : Modèle de tableau d'analyse HAZOP

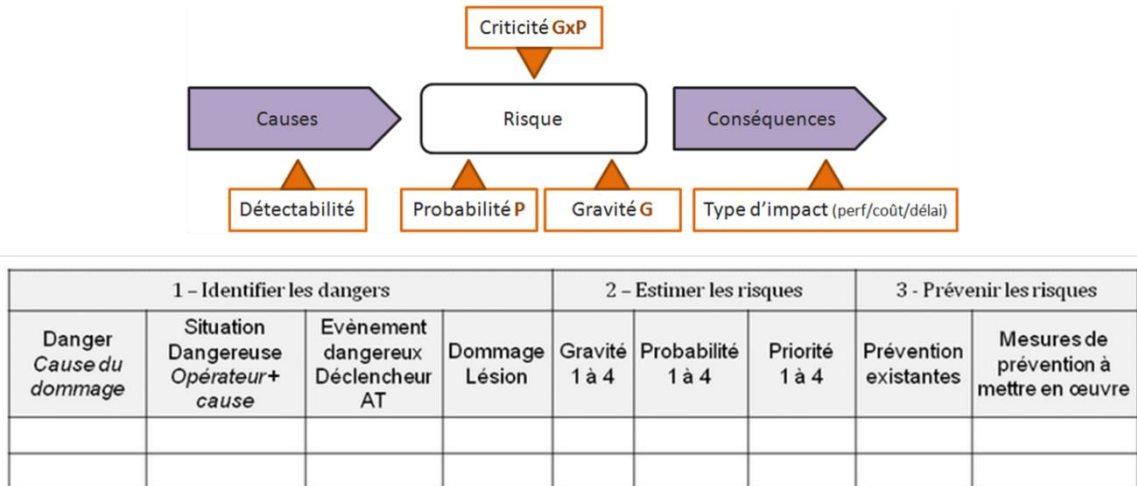
Paramètre	Mot-clé	Déviaton	Causes	Conséquences	Moyen de détection	Moyen de Sécurité	Recommandation

1.3. APR (analyse préliminaire des risques) :

C'est une méthode d'évaluation des risques qui consiste à identifier de façon anticipée les dangers potentiels liés à une activité, un équipement ou un procédé avant sa mise en service. Elle permet de repérer les scénarios d'accidents possibles, d'estimer leurs conséquences et de proposer des mesures préventives adaptées pour réduire les risques à un niveau acceptable.

L'APR est une démarche proactive souvent utilisée dès la phase de conception, afin de renforcer la sécurité des installations industrielles et protéger les personnes, les biens et l'environnement.

Tab.4 : Modèle de tableau d'analyse du méthode APR



2. Définition les fonctions de sécurité :

Les fonctions de sécurité (*ou Safety Functions en anglais*) correspondent à des actions ou des opérations spécifiques mises en œuvre par un système ou un dispositif pour prévenir ou réduire les risques susceptibles de nuire aux personnes, aux biens ou à l’environnement. Leur objectif est d’assurer un état de fonctionnement sécurisé ou de limiter les impacts d’un incident en cas de défaillance ou de conditions anormales.

Elles sont techniquement définies comme des fonctionnalités intégrées à un système ou un équipement, conçues pour maintenir les risques identifiés dans des limites acceptables, même en cas de perturbations ou de situations critiques.

Voici une description détaillée des principales fonctions de sécurité avec des exemples concrets illustrant leur mise en œuvre dans le cadre de la sécurité des machines industrielles :

2.1. Empêcher l'accès en permanence : Cette fonction consiste à installer des protecteurs fixes (carters, grillages, cloisons) qui empêchent tout accès aux zones dangereuses pendant le fonctionnement de la machine. Ces protecteurs ne peuvent être ouverts ou retirés qu’avec des outils spécifiques, ce qui garantit une protection constante.

Exemple : Un carter métallique fixe autour d’une scie circulaire empêche l’opérateur d’atteindre la lame en rotation. Le carter est conçu pour ne pas pouvoir être démonté sans intervention spécifique, évitant ainsi tout contact accidentel.

2.2. Empêcher temporairement l'accès: Cette fonction utilise des protecteurs mobiles interverrouillés qui bloquent l’accès pendant le fonctionnement et arrêtent la machine dès que le protecteur est ouvert. L’accès est ainsi possible uniquement lorsque la machine est arrêtée, assurant une sécurité dynamique.

Exemple : Une porte grillagée sur une presse hydraulique est équipée d'un verrouillage électrique. Si la porte est ouverte, la presse s'arrête automatiquement, empêchant tout contact avec la zone dangereuse.

- 2.3. Retenir des pièces, matériaux, rayonnements:** Il s'agit de dispositifs qui empêchent la projection ou la dispersion de matériaux dangereux, de pièces volantes ou de rayonnements nocifs hors de la zone de travail.

Exemple : Un écran en plexiglas fixé devant une machine de découpe laser retient les éclats et protège l'opérateur des rayonnements lumineux intenses.

- 2.4. Déclencher l'arrêt** : Cette fonction permet d'arrêter rapidement la machine en cas de situation dangereuse, via des dispositifs manuels (bouton d'arrêt d'urgence) ou automatiques (capteurs détectant une anomalie).

Exemple : Un bouton d'arrêt d'urgence rouge, facilement accessible sur une ligne de production, permet à tout opérateur d'arrêter immédiatement la machine en cas de problème.

- 2.5. Empêcher un démarrage intempestif** : Cette fonction bloque la remise en marche automatique ou accidentelle de la machine, notamment après une intervention ou une coupure de courant.

Exemple : Après une coupure de courant, une machine ne redémarre pas automatiquement ; elle nécessite une action volontaire de l'opérateur pour relancer le cycle, évitant ainsi un démarrage soudain dangereux.

- 2.6. Empêcher le démarrage** : La machine est empêchée de démarrer tant que toutes les conditions de sécurité ne sont pas réunies, par exemple si un protecteur est ouvert ou si un dispositif de sécurité est défaillant.

Exemple : Un capteur de position sur une trappe de maintenance empêche le démarrage de la machine tant que la trappe est ouverte.

- 2.7. Permettre le passage de matériaux** : Cette fonction assure le passage sécurisé des pièces ou matières à travers la zone dangereuse sans exposer l'opérateur.

Exemple : Un convoyeur automatique traverse une zone protégée par un grillage, permettant le passage des pièces sans que l'opérateur ait à intervenir dans la zone dangereuse.

2.8. Surveiller les paramètres de la machine : Des capteurs et systèmes de contrôle surveillent en continu des paramètres critiques (vitesse, température, pression) et déclenchent une action corrective en cas d'anomalie.

Exemple : Un capteur de pression sur une presse détecte une surpression et arrête automatiquement la machine pour éviter un accident.

2.9. Neutraliser manuellement et temporairement : Permet à l'opérateur de désactiver temporairement une fonction de sécurité, par exemple pour réaliser une opération particulière, sous conditions strictes et souvent avec un contrôle renforcé.

Exemple : Lors d'une opération de réglage, l'opérateur peut neutraliser temporairement un protecteur mobile interverrouillé, mais uniquement en maintenant une commande à deux mains qui garantit sa vigilance.

2.10. Combiner ou alterner des fonctions de sécurité : Plusieurs fonctions de sécurité peuvent être combinées ou alternées pour assurer une protection adaptée aux différentes phases de travail.

Exemple : Sur une machine complexe, un protecteur fixe empêche l'accès en fonctionnement normal, tandis qu'un protecteur mobile interverrouillé permet un accès temporaire en maintenance, avec un arrêt automatique.

2.11. Arrêt en cas d'urgence : Dispositifs dédiés permettant un arrêt rapide et sûr de la machine en cas d'urgence, avec une activation simple et immédiate.

Exemple : Un câble d'arrêt d'urgence courant le long d'une ligne de convoyage, permettant à n'importe quel opérateur d'arrêter la machine en tirant dessus.

2.12. Signaux de sécurité et avertissements : Systèmes visuels et sonores alertant les opérateurs d'une situation dangereuse ou d'un dysfonctionnement, pour une réaction rapide.

Exemple : Une lampe clignotante rouge et une alarme sonore se déclenchent lorsqu'une porte de protection est ouverte pendant que la machine est en marche.

Ces fonctions de sécurité, combinées et adaptées à chaque situation, permettent de réduire efficacement les risques et de protéger les opérateurs tout en assurant la productivité et la conformité réglementaire.

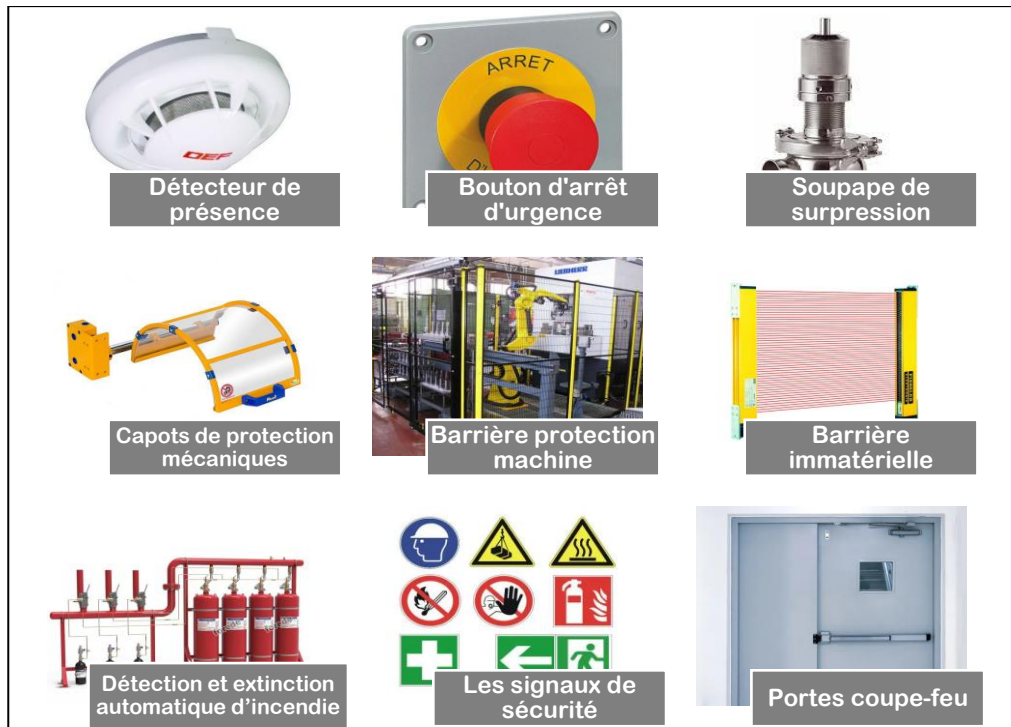


Fig. 5 : Quelques Exemples des fonctions de sécurité

3. Estimation des risques :

L'estimation des risques en sécurité des machines repose sur une analyse systématique de deux composantes clés : la gravité du dommage potentiel (G) et la probabilité d'occurrence de ce dommage, cette dernière étant décomposée en trois paramètres selon la norme ISO 14121 :

3.1. Fréquence et durée d'exposition au phénomène dangereux (F)

- Mesure la répétition et le temps passé dans des situations à risque (ex. : opérations quotidiennes sur une machine).
- Un facteur clé pour les risques chroniques (ex. : exposition aux vibrations ou aux produits chimiques).

3.2. Probabilité d'occurrence d'un événement dangereux (O)

- Évalue la possibilité qu'un phénomène dangereux se matérialise en événement accidentel (ex. : défaillance mécanique, erreur humaine).
- Influencée par l'état des équipements, les facteurs humains (expérience, formation) et l'environnement de travail.

3.3. Possibilité d'éviter ou de limiter le dommage (P)

- Prend en compte les capacités techniques et humaines à atténuer les conséquences (ex. : systèmes d'arrêt d'urgence, temps de réaction).
- Exclut les scénarios irréalistes (ex. : évitement impossible face à une explosion)

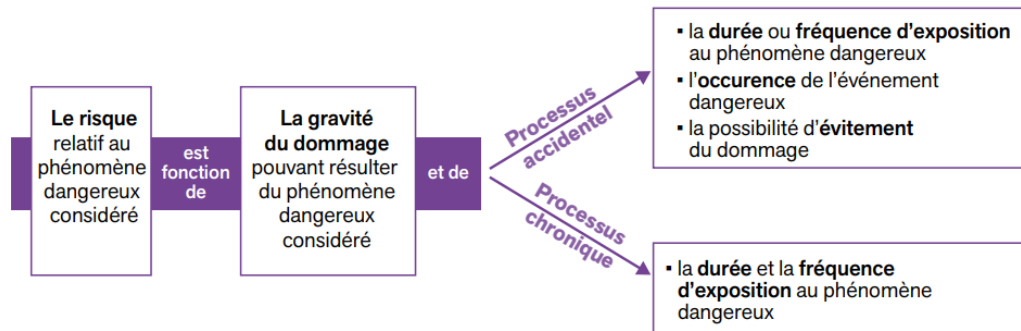


Fig.6 : Principaux paramètres de l'estimation des risques

Dans la pratique, il est important de fixer d'avance des limites objectives aux facteurs G, F, O et P en se référant à des références existantes (ex. : pour le facteur G) ou en fixant des repères temporels (ex. : pour le facteur F).

L'établissement de ces limites favorisera la relation des résultats de l'estimation des situations dangereuses qui pourront ainsi se comparer plus efficacement les uns aux autres.

- a. **la Gravité du dommage (G)** peut être estimée en prenant en compte la gravité des lésions ou de l'atteinte à la santé .
- b. **la Fréquence ou durée d'exposition au phénomène dangereux (F)** qui pourra être estimée en prenant en compte :
 - le besoin d'accéder à la zone dangereuse (par exemple, pour le fonctionnement normal, la maintenance ou la réparation),
 - la raison de l'accès (par exemple, l'alimentation manuelle de matières),
 - le temps passé dans la zone dangereuse,
 - le nombre de personnes devant y accéder,
 - la fréquence d'accès.
- c. **La probabilité d'Occurrence d'un événement dangereux (O)** qui pourra être estimée en tenant compte :
 - des données de fiabilité et d'autres données statistiques,
 - de l'historique des accidents,

- de l'historique des atteintes à la santé,
- d'une comparaison des risques avec ceux que présente une machine similaire

d. la Possibilité d'évitement du dommage (**P**) qui permet d'empêcher la production du dommage ou de le limiter, en fonction :

- des travailleurs qui utilisent la machine,
- de la rapidité d'apparition de l'événement dangereux,
- de la conscience de l'existence du phénomène dangereux,
- de la possibilité pour le travailleur d'éviter ou de limiter le dommage (par exemple, action, réflexe, agilité, possibilité de fuite).

En combinant le résultat obtenu pour les quatre paramètres, l'indice de risque est défini en utilisant le logigramme de risque , qui permet de définir six indices De risque croissant allant de 1 à 6.

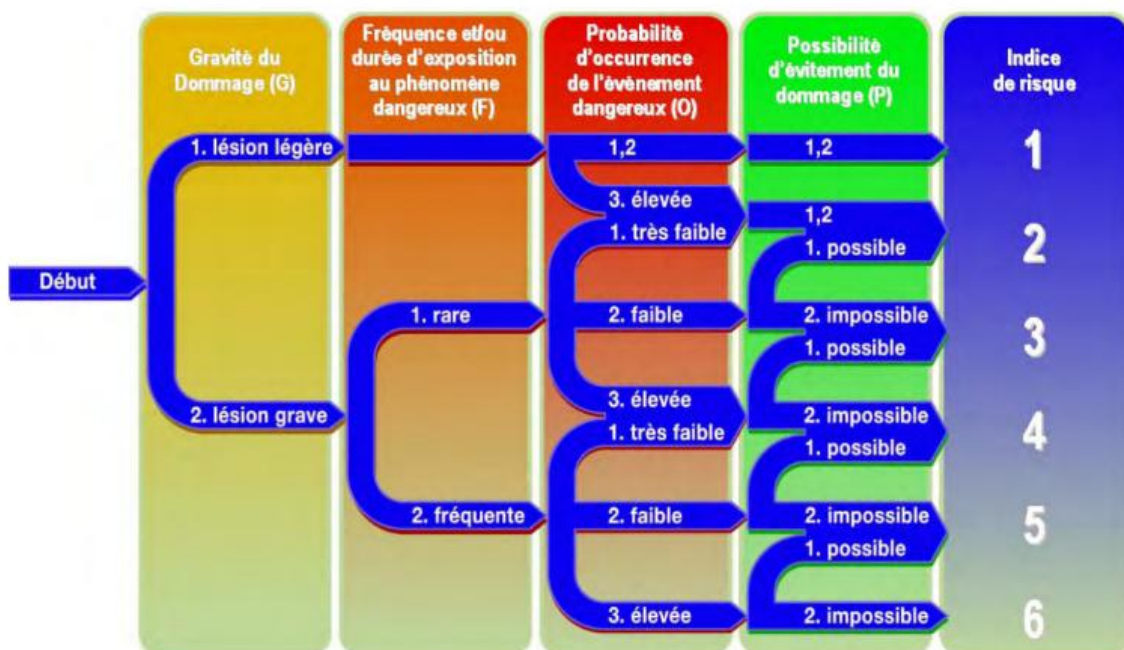


Fig.7 : Logigramme de risque ^[9]

4. Evaluation des risques :

L'évaluation des risques machines se termine par un jugement sur le niveau de risque estimé. C'est à cette étape que l'on décide si le risque est acceptable ou non.

Si le risque est jugé trop élevé, des mesures de réduction doivent être choisies et mises en œuvre pour le diminuer. Après l'application de ces mesures, il est indispensable de répéter l'évaluation afin de vérifier que le risque a bien été réduit et que les solutions n'ont pas généré de nouveaux dangers.

Ce processus itératif garantit une gestion efficace et sécurisée des risques tout au long de la vie de la machine.

5. Définir le niveau de sécurité exigés :

5.1. Niveau de performance requis (PLr) :

Le Niveau de Performance Requis (PLr), selon la norme ISO 13849-1, est un indicateur qui définit le niveau de réduction des risques nécessaire pour assurer la sécurité d'un système de commande lié à une fonction de sécurité. Il est déterminé à partir de l'analyse des risques en prenant en compte Trois paramètres clés :

- La **gravité** des blessures possibles (S),
- La **fréquence** d'exposition au danger (F),
- La **probabilité** d'éviter ou de limiter les effets du danger (P).

Le PLr permet de spécifier les exigences de fiabilité des composants et la conception du système en fonction du niveau de sécurité nécessaire, allant de PLa (risque faible) à PLe (risque élevé).

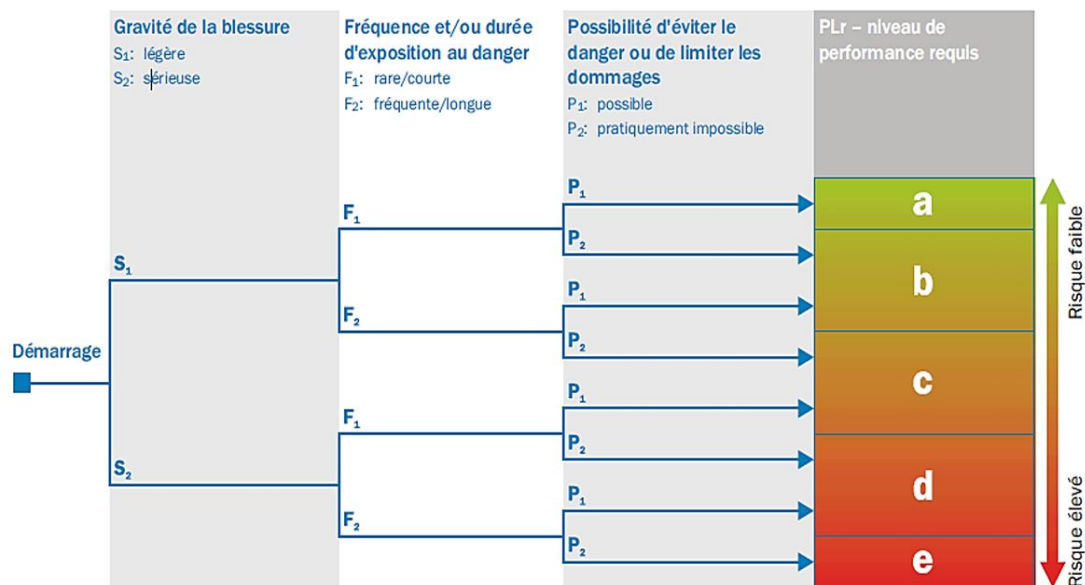


Fig.8 : Arbrescence des risques (selon la norme ISO 13849-1) [10]

5.2. Niveau d'intégrité de sécurité (SIL) :

Le Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL), Selon la norme CEI 62061, est un indicateur utilisé pour évaluer la capacité d'un système de commande de sécurité à réduire les risques liés à un événement dangereux.

Le SIL est déterminé en fonction de plusieurs facteurs, notamment la gravité des conséquences du danger, la probabilité d'occurrence de l'événement dangereux, ainsi que la fréquence d'exposition et la possibilité d'éviter le danger.

Le SIL est classé sur une échelle allant de SIL 1 (risque faible) à SIL 4 (risque élevé), où chaque niveau définit les exigences spécifiques en termes de fiabilité et de performance du système pour garantir une sécurité fonctionnelle optimale.

La fréquence de l'événement dangereux (F)		La probabilité d'apparition de l'événement dangereux (W)		La fréquence de l'événement dangereux (F)	
F ≥ 1 x par heure	5	Fréquente	5		
1 x par heure > F ≥ 1 x par jour	5	Probable	4		
1 x par jour > F ≥ 1 x toutes les 2 semaines	4	Possible	3	Impossible	5
1 x toutes les 2 semaines > F ≥ 1 x par an	3	Rare	2	Possible	3
1 x par an > F	2	Négligeable	1	Probable	1

1) pour des séjours > 10 min

Les Conséquences	la sévérité des dommages (S)	Classe (K = F + W + P)				
		4	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 15
Mort, perte d'un œil ou d'un bras	4	SIL 2	SIL 2	SIL 2	SIL 3	SIL 3
Lésions permanentes, perte de doigts	3			SIL 1	SIL 2	SIL 3
Lésions réversibles, traitement médical	2				SIL 1	SIL 2
Lésions réversibles, premiers secours	1					SIL 1

Tab.5 : Classification et Détermination des Niveaux de Sécurité (SIL) [11]

Le niveau d'intégrité de sécurité est calculé comme suit :

- Définir la **sévérité** des dommages (S).
- Compter les points de **fréquence** (F), de **probabilité** (W) et de **possibilité** d'éviter (P).
- Calculer la **classe** (K) en additionnant (F), (W) et (P).
- Le niveau d'intégrité de sécurité est le point d'intersection entre la ligne (S) et la colonne (K).

5.3. Champ d'application :

Les normes ISO 13849-1 et CEI 62061 fixent des lignes directrices spécifiques pour la conception et la mise en œuvre des systèmes de commande liés à la sécurité. Le choix de la norme dépend principalement de la technologie utilisée dans le système.

Le tableau ci-dessous présente les technologies concernées et leur compatibilité avec chaque norme ^[6] :

Le domaine d'application	La Norme	
	ISO 13849-1	CEI 62061
Mécanique	Applicable	Non applicable
Hydraulique	Applicable	Non applicable
Pneumatique	Applicable	Non applicable
Électrique	Applicable	Applicable
Électronique	Applicable	Applicable
Électronique programmable	Applicable	Applicable

Tab.6 : Champ d'application des normes ISO 13849-1 et CEI 62061

6. Conception, sélection et application des moyens de protection :

La norme ISO 13849-1 impose une approche systématique pour la mise en œuvre des moyens de protection, en intégrant trois caractéristiques fondamentales :

6.1. Qualités et applications :

- Les protections sans contact (barrières optiques, scanners laser) offrent une détection immatérielle pour les zones à accès fréquent, tandis que les protections physiques (capots verrouillés, interrupteurs de position) isolent les dangers mécaniques.

Les dispositifs doivent répondre à des niveaux de Performance (PL) définis, avec une couverture de diagnostic (DC) adaptée au risque.

6.2. Position et dimension :

- L'implantation doit couvrir intégralement la zone dangereuse (ex. : hauteur des barrières conforme à la norme EN ISO 13857 pour prévenir les atteintes).

6.3. Intégration dans le système de commande :

- Les moyens de protection doivent être connectés à une architecture redondante (Catégorie 3 ou 4) avec des entrées/sorties sécurisées.

L'utilisation de composants certifiés (ex. : relais de sécurité SIL3) et une surveillance continue (vérification des interverrouillages) assurent la conformité au PLr (Performance Level requis).

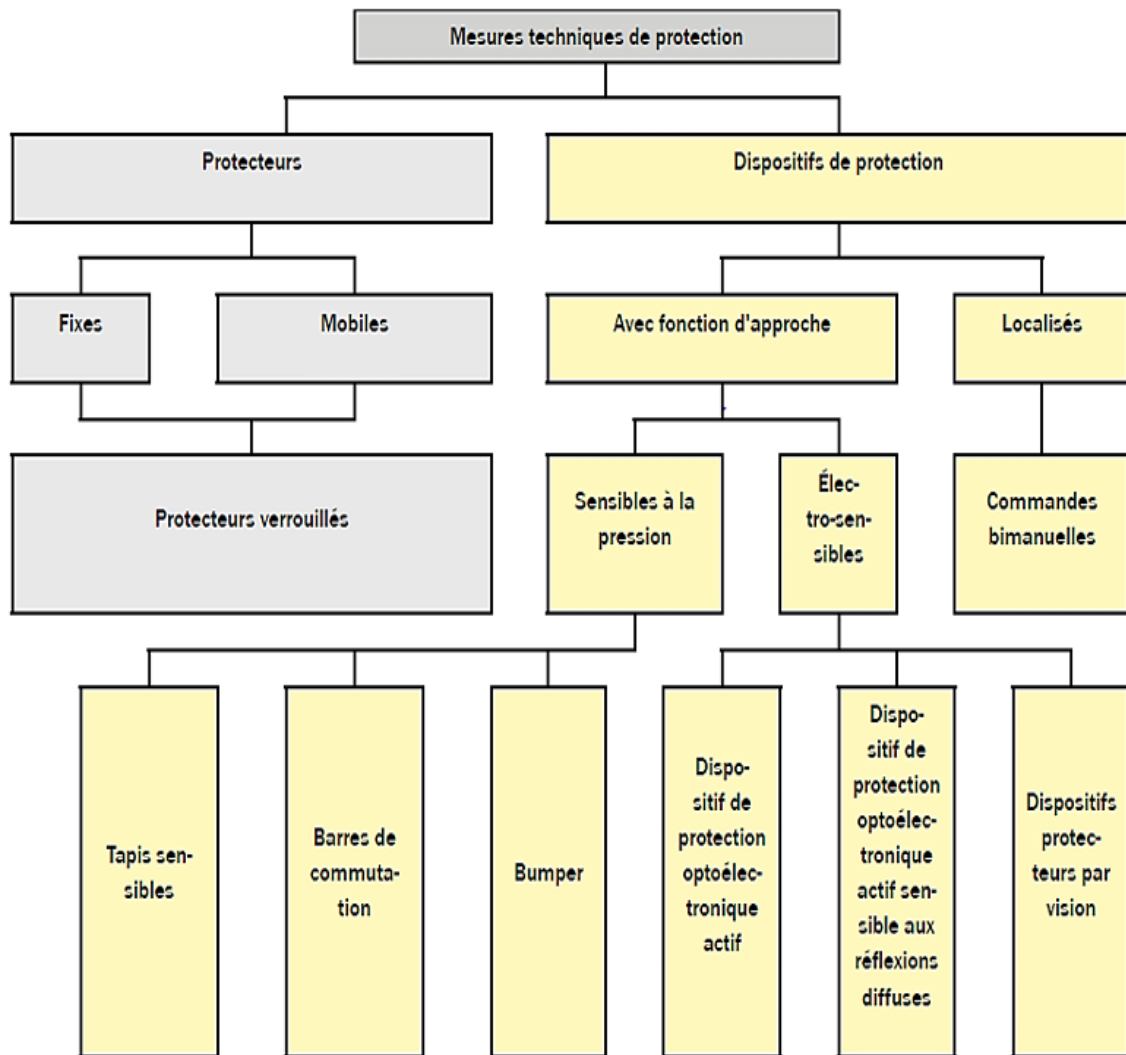


Fig.9 : Les mesures technique de protection [6]

7. Vérification la fonction de sécurité :

L'évaluation et/ou le contrôle révèle que la fonction de sécurité satisfait les objectifs et exigences des spécifications sous tous les aspects.

La vérification repose essentiellement sur deux phases :

A. Vérification de la sûreté mécanique :

Il faut procéder à un contrôle des dispositifs de protection mécaniques pour s'assurer qu'ils satisfont aux critères relatifs à l'éloignement ou à la séparation des zones dangereuses et à la capacité de contenir les éléments projetés ou les radiations. Il faut accorder une attention spéciale à la conformité aux exigences ergonomiques. Ces vérifications couvrent trois axes principaux :

1. Isolement et/ou maintien à distance
2. Conservation des pièces éjectées et/ou des radiations
3. Besoins en ergonomie

Tab.7 : Check-list de conformité HSE pour l'évaluation et l'intégration des dispositifs de protection

N°	Question	Oui	Non
1	Une analyse des risques complète a-t-elle été réalisée ?		
2	Le niveau de performance requis (PLr) a-t-il été déterminé ?		
3	Le type de protection est-il adapté à l'environnement (poussière, humidité, ATEX, température) ?		
4	Les distances de sécurité (ISO 13855) sont-elles respectées ?		
5	Le champ de détection est-il exempt de toute obstruction ou réflexion parasite ?		
6	Y a-t-il une protection contre le contournement (accès latéral, supérieur ou inférieur) ?		
7	Le dispositif est-il connecté à un système de commande de sécurité certifié ?		
8	Un protocole de test périodique a-t-il été mis en place ?		
9	Le manuel d'utilisation et de maintenance a-t-il été fourni ?		
10	Un plan de maintenance préventive est-il intégré au planning HSE ?		
11	Un dispositif physique empêche-t-il l'accès direct à la zone dangereuse (carter, écran, grille) ?		
12	Le poste de travail est-il adapté à différentes tailles d'utilisateurs (hauteur réglable, accès) ?		
13	L'effort requis pour actionner les commandes de sécurité est-il conforme aux normes d'ergonomie ?		

B. Vérification de la sécurité fonctionnelle :

Selon les normes de sécurité fonctionnelle, il est essentiel de vérifier que le niveau de sécurité requis est bien atteint par le système réel. Pour ce faire, deux méthodes sont disponibles :

1. Le calcul du niveau de performance (PL) selon la norme EN ISO 13849-1.
2. Le calcul du niveau d'intégrité de sécurité (SIL) selon la norme CEI 62061.

Dans les deux cas, l'évaluation repose sur une valeur quantitative commune : le **PFHd** (probabilité de défaillance dangereuse par heure), qui permet de vérifier si les exigences de sécurité sont respectées.

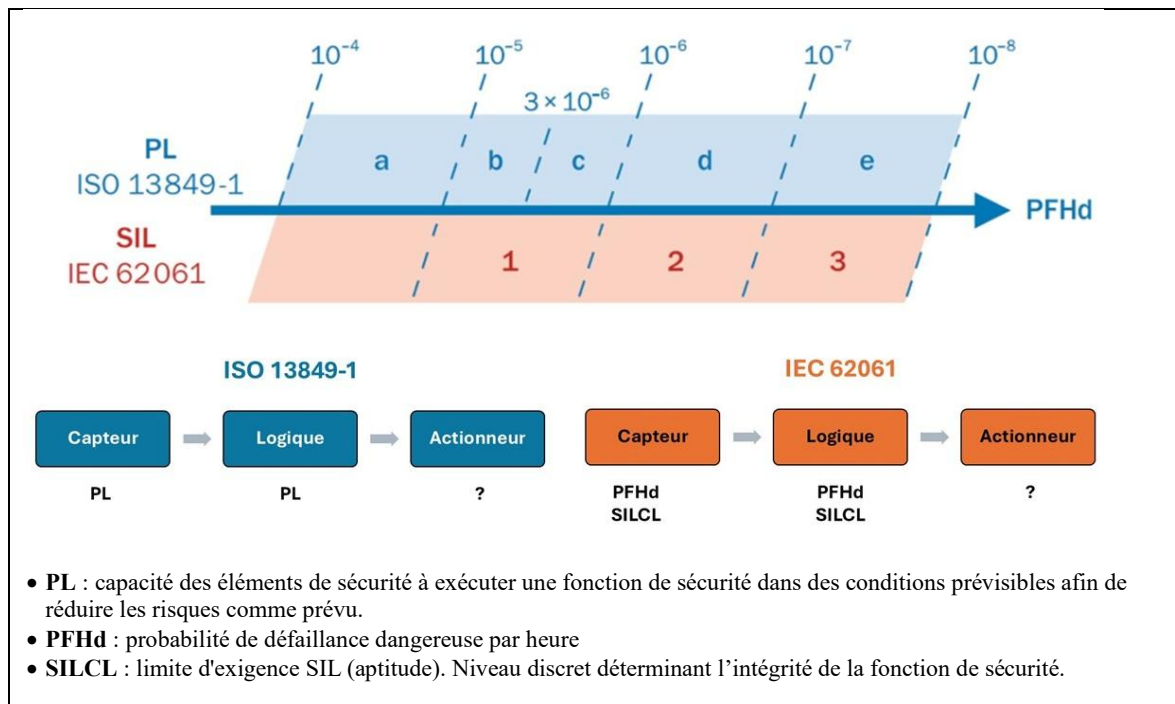


Fig.10 : Probabilité de défaillance dangereuse par heure

8. Vérification de la sécurité fonctionnelle pour les Sous-systèmes :

Une fonction de sécurité mise en œuvre au moyen de dispositifs techniques de commande se compose généralement de trois éléments principaux : un capteur, une unité logique et un actionneur. Cette chaîne fonctionnelle peut comprendre à la fois des composants discrets et des systèmes de commande de sécurité plus complexes.

Il est donc souvent nécessaire de décomposer la fonction de sécurité en plusieurs sous-systèmes afin d'en analyser précisément chaque partie.

8.1. Calcule simplifier le PL (ISO 13849-1) :

Cette méthode permet d'estimer de manière suffisamment précise le niveau de performance global d'une fonction de sécurité, même en l'absence des valeurs individuelles de PFHd.

Lorsque le PL de chaque sous-système est connu, il est possible de déterminer le PL_{global} en s'appuyant sur le tableau présenté ci-dessous.

Cette approche repose sur l'utilisation de valeurs moyennes correspondant à chaque niveau de performance dans l'intervalle des valeurs de PFHd. Ainsi, bien qu'elle soit simplifiée, cette méthode offre une bonne approximation ; toutefois, l'application de la procédure détaillée permet d'obtenir des résultats plus rigoureux et exacts.

- Identifier le niveau de performance du ou des sous-systèmes présentant la valeur la plus faible au sein de la fonction de sécurité : PL (low)
- Déterminer le nombre total de sous-systèmes possédant ce niveau de performance minimal : n (low)

PL (low)	n (low)		PL
a	> 3	→	--
	≤ 3	→	a
b	> 2	→	a
	≤ 2	→	b
c	> 2	→	b
	≤ 2	→	c
d	> 3	→	c
	≤ 3	→	d
e	> 3	→	d
	≤ 3	→	e

Fig.11 : Détermination du PL_{global} selon les niveaux PL des sous-systèmes (ISO 13849-1) ^[12]

8.2. Calcule le SIL (CEI 62061) :

La détermination du niveau d'intégrité de la sécurité (SIL) repose sur plusieurs critères fondamentaux, à savoir :

- L'intégrité de sécurité du matériel,
- Les limitations structurelles (notamment la limite d'exigence SIL, ou SILCL),
- La probabilité de défaillances matérielles dangereuses aléatoires (PFHd),
- Les exigences d'intégrité de sécurité systématique,
- Les mesures de prévention des défaillances,
- La maîtrise des défaillances systématiques.

Lorsqu'on évalue une fonction de sécurité dans son ensemble, l'intégrité de sécurité du matériel est déterminée de manière à respecter les conditions suivantes :

Le niveau d'intégrité de sécurité (SIL) maximal atteignable par le système complet est limité par la plus faible limite d'exigence SIL (SILCL) parmi les sous-systèmes le composant.

La valeur globale de PFHd du système de commande, obtenue par la somme des PFHd individuelles des sous-systèmes, ne doit pas dépasser les seuils définis dans les tableaux de vérification de la sécurité fonctionnelle (conformément à la norme IEC 62061).

Dans l'illustration ci-dessus, tous les sous-systèmes répondent à la catégorie de limite d'exigence SIL SILCL3.

La somme des valeurs PFHd est inférieure à 1×10^{-7} , Les mesures visant à assurer l'intégrité de sécurité systématique sont mises en œuvre et la fonction de sécurité atteint donc le niveau SIL3.

9. Validation toutes les fonctions de sécurité :

La validation consiste à vérifier une thèse, un plan ou une hypothèse par rapport à un problème à résoudre.

Contrairement à la vérification, où l'on évalue seulement la mise en œuvre correcte d'une solution conformément aux spécifications, la validation est plutôt un contrôle final pour s'assurer que les solutions sont adaptées en général pour le besoin de réduction du risque.

L'objectif de la procédure de validation est de contrôler les spécifications et la conformité de la conception des composants prenant part à la fonction de sécurité dans la machine.

La validation doit montrer que les éléments relatifs à la sécurité de la fonction de commande répondent aux exigences de la norme ISO 13849-2, en particulier en ce qui concerne les exigences du niveau de sécurité défini.

La validation doit, lorsque c'est raisonnable, être effectuée par des personnes qui n'ont pas pris part à la conception des éléments relatifs à la sécurité des systèmes de commande.

Pendant le processus de validation, il est important de vérifier les erreurs et en particulier les omissions dans les spécifications formulées.

L'élément critique de la conception d'une fonction de commande de sécurité est en règle générale la spécification.

Un exemple : l'accès à un poste de fabrication doit être protégé par un barrage immatériel. La fonction de sécurité est donc spécifiée comme suit :

« En cas d'intrusion dans le champ de protection d'un barrage immatériel, tous les mouvements dangereux doivent être stoppés le plus rapidement possible. »

Le constructeur aurait toutefois dû penser au redémarrage lorsque le champ de protection est libéré, en particulier s'il est possible de le contourner. Le processus de validation doit couvrir ce genre d'aspects.

Dans le cadre d'un processus de validation, on applique en général plusieurs procédures complémentaires. Notamment :

- La vérification technique du positionnement et de l'efficacité des moyens de protection

- La vérification pratique des réactions en cas de défaut par rapport aux résultats attendus au moyen de simulations
- La validation des exigences ambiantes par des tests de fonctions :
- La protection suffisante contre les facteurs ambiants tels que la température, l'humidité, les chocs, les vibrations, etc.
- L'immunité aux perturbations électromagnétiques.

Conclusion

La sécurité fonctionnelle est une approche structurée permettant d'assurer la protection des personnes et des équipements face aux risques liés aux machines et installations industrielles.

Il repose sur une série d'étapes logiques et interdépendantes : de l'identification des dangers à la vérification des fonctions de sécurité mises en œuvre.

Chaque phase de l'analyse des risques jusqu'à la conception et la validation des protections vise à garantir que les niveaux de sécurité exigés sont atteints et maintenus.

Ce processus contribue ainsi à réduire les accidents, à améliorer la fiabilité des systèmes et à se conformer aux normes en vigueur.

Chapitre III

Etude de cas :

Groupe stations pompages N°4

(SONATRACH - TRC - RTO - GSP4 - Hassi R'mel)

Chapitre III

Etude de cas : Groupe stations pompages N°4 (SONATRACH - TRC - RTO - GSP4 - Hassi R'mel)

1. Introduction:

La Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures (SONATRACH), créée le 31 décembre 1963, est l'une des plus importantes entreprises publiques algériennes. Acteur majeur de l'industrie pétrolière à l'échelle continentale, elle est souvent qualifiée de « major africaine » et se classe en tête des entreprises africaines en termes de chiffre d'affaires et de capacité opérationnelle.

SONATRACH déploie ses activités sur toute la chaîne de valeur des hydrocarbures : de l'exploration à la production, en passant par le transport, la transformation et la commercialisation. Parmi ces activités, le transport par canalisation (TRC) constitue un maillon stratégique garantissant l'acheminement continu et sécurisé des hydrocarbures (brut, gaz naturel, GPL, condensats) depuis les gisements jusqu'aux unités de traitement, de transformation, de stockage et d'exportation.

Dans ce cadre, la station LZ2, implantée le long de l'oléoduc reliant Hassi R'mel à Arzew, occupe une place stratégique. Elle assure des fonctions cruciales telles que le transit, la régulation et le contrôle des flux de gaz de pétrole liquéfié (GPL) au sein du réseau national de transport. Dotée d'équipements technologiques avancés (torches de sécurité, systèmes instrumentés de sécurité (SIS), pompes industrielles) la station LZ2 joue un rôle fondamental dans la sécurisation des opérations et la prévention des incidents.

Ainsi, l'étude de cas présentée dans ce travail porte sur l'analyse de la sécurité fonctionnelle au niveau de la station LZ2, avec un accent particulier sur les risques associés aux torchères et les mesures de protection mises en place. Cette étude vise à proposer des améliorations concrètes pour renforcer la maîtrise des risques industriels dans cette infrastructure critique.

2. Présentation du GSP4 :

Le GSP4 dépend de l'activité transport par canalisations de Sonatrach, Région de Transport Ouest (RTO). Son rôle est de Transporter Hydrocarbures liquides et gazeux à partir des champs de production de sud vers le pôle industriel d'Arzew (ORAN).

a. Situation géographique :

Le Groupe de stations de pompage N°4 - Hassi R'mel est situé à environ de 520 km au sud d'Alger, et à 10 km au nord de Hassi R'mel dans la wilaya de Laghouat.

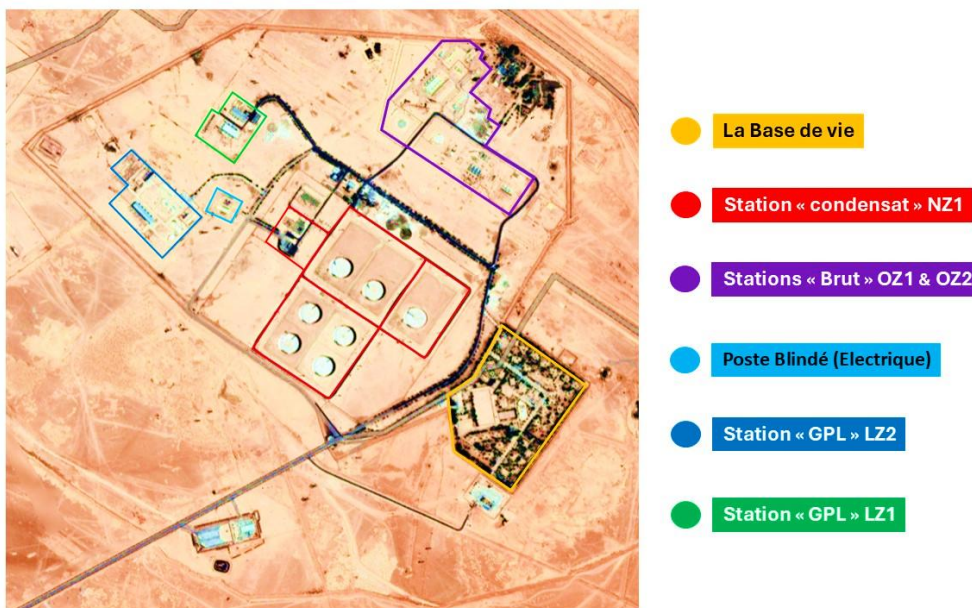


Fig.12 : Le Groupe de stations de pompage N°4 - Hassi R'mel

b. Les différentes stations du GSP4 :

Le GSP4 est situé au niveau du Hassi R'mel, il est constitué de 5 stations de pompage :

Nom de station	Le produit	L'année d'exploitation	Diamètre des Pipes (''Ø)	La ligne
OZ 1	Brut	1967	28 ''Ø	HEH - ARZEW
OZ 2		2004	34 ''Ø	
LZ 1	GPL	1984	24 ''Ø	CP4 - ARZEW
LZ 2		2010		
NZ 1	Condensat	1978	28 ''Ø	
LNZ 1	GPL	1973	12 ''Ø	
	Condensat		16 ''Ø	

Tab.8 : Les différentes stations du GSP4-Hassi R'mel

3. Description des activités de GSP4 :

Le Groupement SP4 est divisé en 4 services :

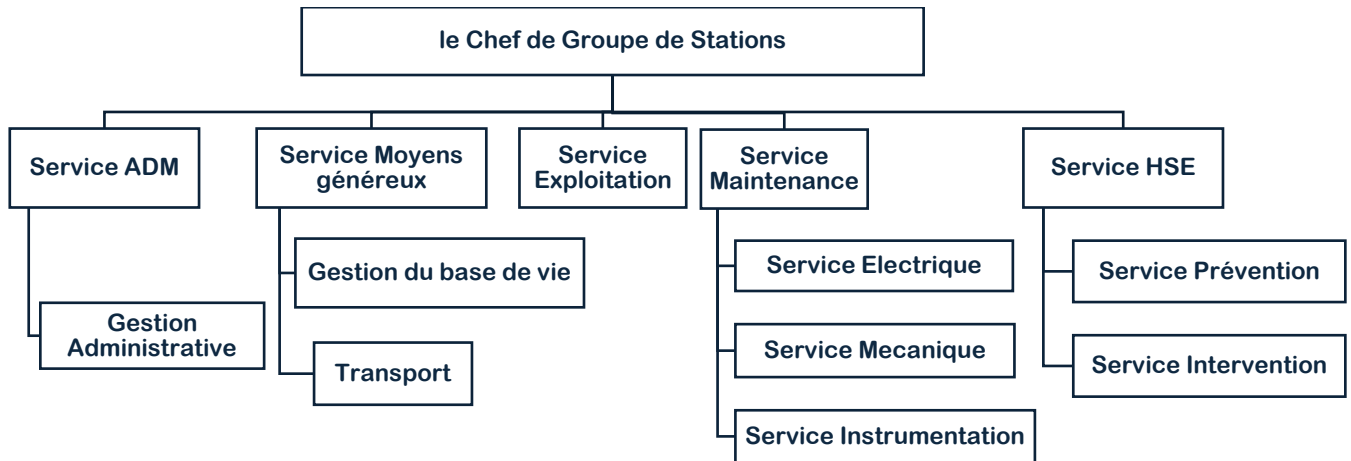


Fig.13 : Structure organisationnelle du Groupement SP4 et ses services

- **Service Sécurité Industriel :**

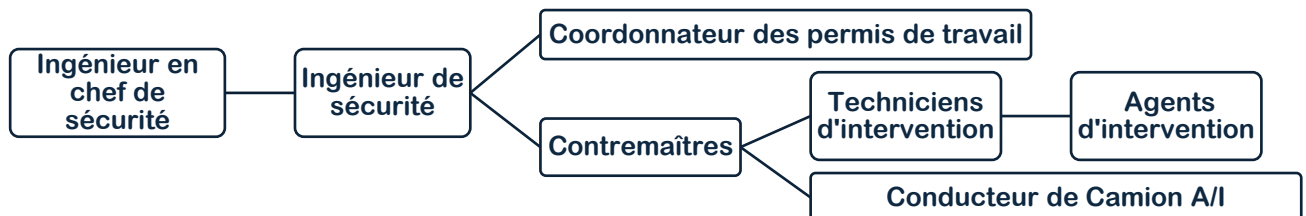


Fig.14 : Hiérarchie et rôles au sein du Service Sécurité Industrielle du SP4

Dans le cadre des exigences croissantes en matière de santé, sécurité et environnement, le Service Sécurité Industrielle joue un rôle fondamental au sein des installations industrielles :

- ✓ Préserver le milieu naturel et crée les conditions de bien être des travailleurs.
- ✓ Prévenir les accidents et les incidents.
- ✓ L'utilisation obligatoire du permis de travail pour effectuer des travaux dans le groupement.
- ✓ La mise en place des systèmes et des procédures pour chaque tâche effectuée dans le site selon les normes industrielles.
- ✓ Etablira des programmes de formation de sécurité.

4. Présentation de la station objet de l'étude :

La station LZ2 fait partie du Nouveau Système de Transport de GPL reliant Hassi R'Mel à Arzew. Mise en service en 2010, elle joue un rôle essentiel dans le pompage et la sécurisation du transport du GPL via l'oléoduc 24" LZ2. Elle est composée de ^[13] :

- **05 électropompes de pompage du GPL**, d'une puissance unitaire de 2470 Kw .
- **Une fosse de brûlage équipée par un torcher**, pour brûler les gaz évacués en cas d'urgence.
- **Une Salle de contrôle centralisée**, assurant la supervision et le pilotage en temps réel de l'ensemble des systèmes de la station.
- **Un Réseau d'eau anti-incendie en boucle fermée**, constitué de conduites de diamètre Ø10.
- **Deux pompes anti-incendie**, alimentées par des sources d'énergie distinctes (**une électrique et une diesel**), délivrant un débit de 269 m³/h sous une pression de 9 kg/cm², assurant l'extinction rapide en cas d'incendie.
- **Deux pompes de pressurisation de type « jockey »**, d'un débit unitaire de 50 m³/h, destinées à maintenir la pression constante dans le réseau incendie.
- **Un réservoir d'eau anti-incendie**, d'une capacité de stockage de 2000 m³.

La station LZ2 assure le pompage du GPL dans le pipeline LZ2, garantissant un débit continu et sécurisé jusqu'au Terminal d'Arrivée d'Arzew. Grâce à son système anti-incendie avancé, elle offre une protection efficace contre les risques liés au transport de GPL.

Cette infrastructure clé contribue à l'optimisation et la sécurisation du transport de GPL, tout en garantissant une exploitation fiable et conforme aux normes de sécurité industrielle.

Le nouvel oléoduc GPL-LZ2 s'étend sur 495 km avec un diamètre de 24 Ø et est équipé de 31 vannes de sectionnement.

5. Présentation l'objet d'étude :

La fosse de brûlage est une installation de sécurité essentielle dans la station LZ2, Elle permet de brûler en toute sécurité les gaz inflammables excédentaires ou relâchés lors d'opérations de purge, de maintenance ou en cas d'incident, afin d'éviter leur accumulation et le risque d'explosion ou d'incendie.

Cette fosse est conçue pour contenir et canaliser ces gaz vers une flamme de combustion contrôlée, limitant ainsi les dangers pour le personnel et les installations.

Ce système de torchère est utilisé pour détruire le gaz de pétrole liquéfié (GPL) en cas d'urgence, comme l'ouverture des soupapes de sécurité (PSV) sur la conduite. Le système fonctionne normalement uniquement avec du gaz de balayage, et il est activé en cas de flux anormal ou de situation d'urgence.

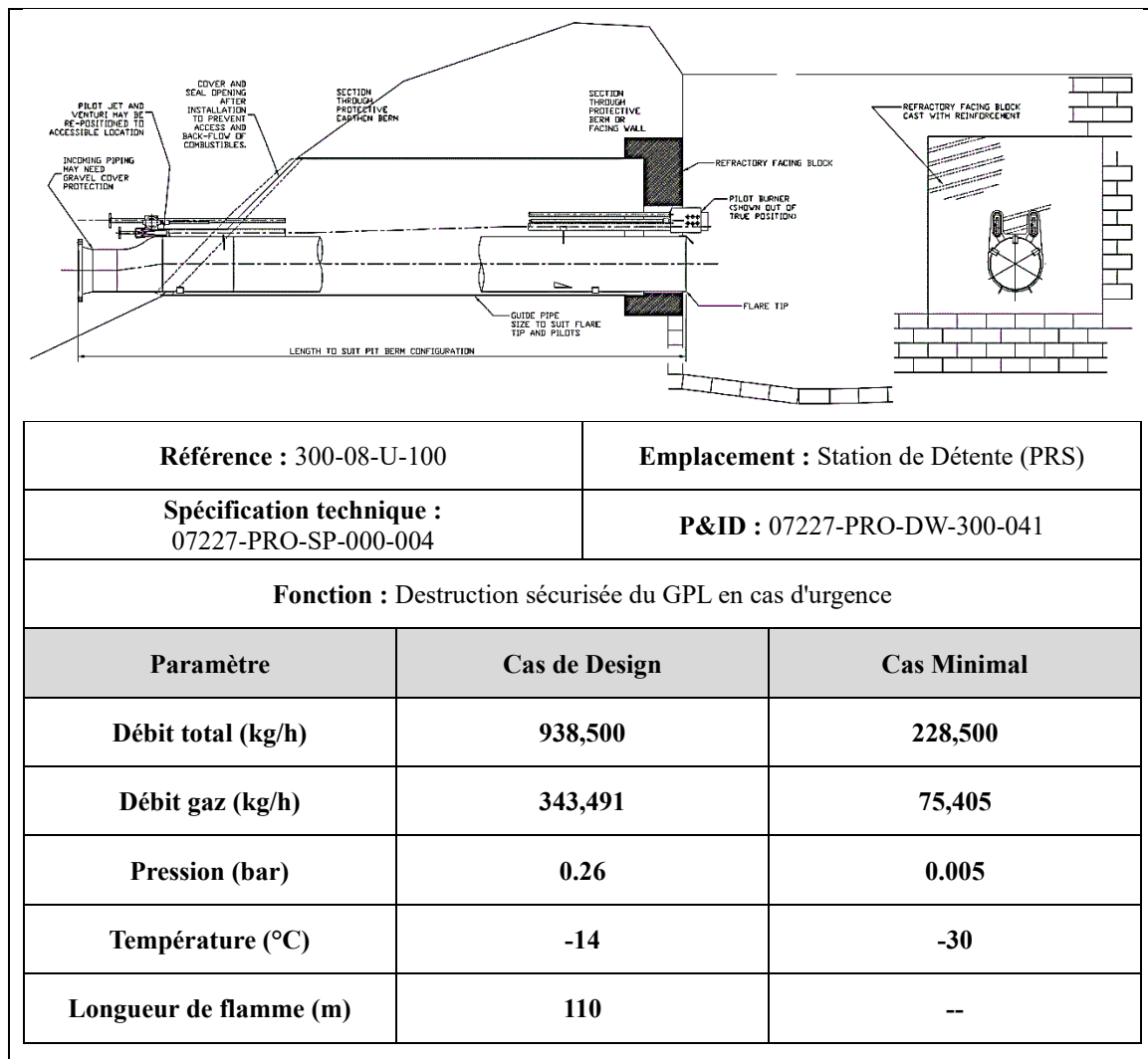


Fig.15 : Fiche Technique ^[13] (Système de Torche - Projet LZ2 24Ø" GPL)

6. Identification des Risques :

L'identification des risques constitue une étape clé dans la démarche de sécurité fonctionnelle. Elle repose sur plusieurs méthodes d'analyse. Dans le cadre de cette étude de cas, nous avons choisi d'utiliser la méthode APR (Analyse Préliminaire des Risques), car elle permet de prendre en compte deux facteurs essentiels : l'identification des dangers et l'estimation du niveau de risque.

Pour la phase d'estimation (notamment l'évaluation de la gravité et de la probabilité) il est nécessaire de s'appuyer sur l'expertise d'un professionnel de l'entreprise ayant installé ou mis en service la machine concernée.

Identifier les dangers			
Risque	Situation	Événement	
Retour de flamme	Entrée d'air dans la tuyère	Explosion en amont du système	
Extinction des pilotes	Pression insuffisante du gaz	Accumulation de gaz non brûlé	
Obstruction de la tuyère	Accumulation de sable/givrage	Rejet incontrôlé de GPL	
Fuites de gaz	Corrosion des joints	Incendie/ATEX	
Radiation thermique excessive	Vent fort déviant la flamme	Brûlures du personnel	
Estimer les dangers			
Risque	Gravité	Probabilité	Criticité
Retour de flamme	4	3	12
Extinction des pilotes	4	2	8
Obstruction de la tuyère	3	3	9
Fuites de gaz	4	2	8
Radiation thermique excessive	3	2	6

Tab.9 : Etude APR pour le système de torchère ^[13]

7. Définition les fonctions de sécurité :

Les fonctions de sécurité sont techniquement définies comme des fonctions spécifiques intégrées à un système ou à un équipement, dont le but est de maintenir les risques identifiés (lors de l'étape d'analyse) dans des limites jugées acceptables, même en cas de défaillance, de perturbation ou de situation critique.

Dans le cadre de notre étude de cas, qui porte sur un système de torchère (La fosse de brûlage), plusieurs fonctions de sécurité ont été mises en place pour répondre aux risques identifiés précédemment.

Voici une description de ces fonctions ainsi que de leur mise en œuvre concrète :

Risque	Fonction de Sécurité	Bloc Fonctionnel
Retour de flamme	Arrêt d'urgence	Détection
Extinction des pilotes	Rallumage automatique	Détection flamme
Obstruction tuyère	Arrêt d'urgence	Surveillance
Fuites de gaz	Arrêt d'urgence	Détection
Radiation thermique	Alarme	Mesure

Tab.10 : Principales fonctions de sécurité et leur mise en œuvre dans ce système de torchère

8. Définition le niveau de sécurité exigés :

La définition du niveau de performance requis (PLr) constitue une étape fondamentale dans l'application de la norme ISO 13849-1, car elle permet de quantifier le niveau de réduction du risque nécessaire pour chaque fonction de sécurité identifiée. Cette évaluation se base sur l'analyse des risques menée au préalable, et permet d'orienter la conception des systèmes de commande liés à la sécurité.

Le niveau PLr est déterminé à l'aide d'une approche semi-quantitative qui prend en compte trois paramètres clés : **S (Gravité du dommage potentiel)**, **F (Fréquence et durée d'exposition au danger)**, **P (Possibilité d'éviter le danger ou de limiter les dommages)**.

Ces trois critères sont utilisés dans une grille de décision fournie par la norme, permettant d'assigner à chaque fonction de sécurité un niveau de performance requis allant de '**a**' (le plus faible) à '**e**' (le plus élevé).

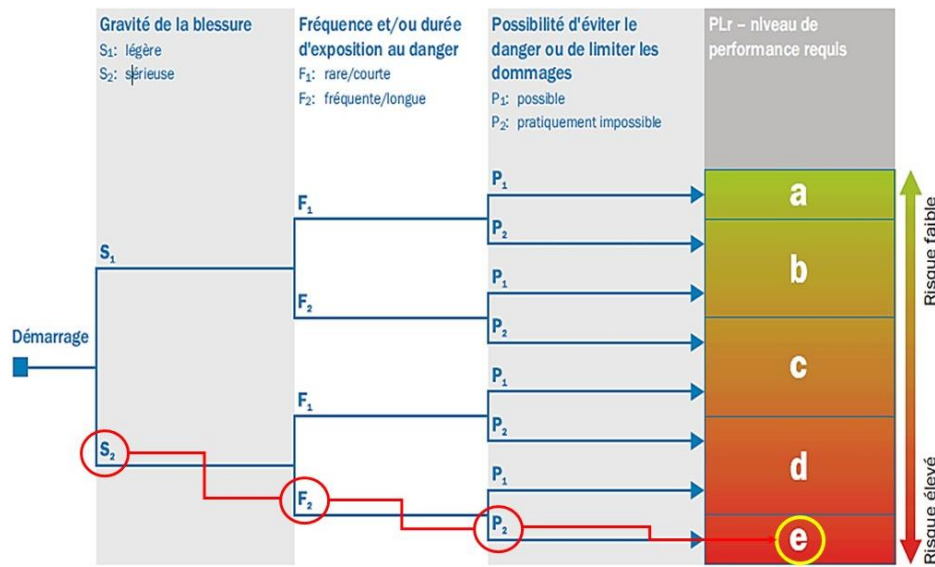


Fig.16 : Identification du niveau d'exigence de performance (PLr)

En utilisant la méthode décrite ci-dessus, nous pouvons obtenir les résultats suivants :

Fonctions de Sécurité		G	F	P	PLr
FS 1	Arrêt d'urgence	S2	F2	P2	e
FS 2	Rallumage automatique	S2	F1	P1	c
FS 3	Alarme d'obstruction + Arrêt d'urgence	S2	F2	P1	d
FS 4	Arrêt d'urgence	S1	F2	P2	c
FS 5	Alarme de radiation	S2	F1	P1	c

Tab.11 : Détermination des niveaux de performance requis (PLr) pour les sous-systèmes analysés

9. Analyse, conception et validation des moyens de protection liés à la fonction de sécurité :

Dans notre cas les systèmes ou sous-systèmes réalisent les fonctions de sécurité identifiées préalablement sont déjà mis en place, et notre rôle là est l'évaluation de la performance des sous-systèmes de sécurité.

Le tableau suivant présente les équipements de chaque fonction de sécurité :

Fonctions de Sécurité		Sous-systèmes
FS ₁	Arrêt d'urgence	Capteur de flux inverse + Electrovanne
FS ₂	Rallumage automatique	Système d'alimentation gaz secours
FS ₃	Alarme d'obstruction + Arrêt d'urgence	Capteurs de ΔP + Electrovanne
FS ₄	Arrêt d'urgence	Détecteurs IR + Electrovanne
FS ₅	Alarme de radiation	Capteur thermiques

Tab.12 : Identification des sous-systèmes des fonctions de sécurité

Dans le cadre de notre étude de cas portant sur le système de torchère LZ2, l'analyse de la sécurité fonctionnelle repose en partie sur l'évaluation des défaillances dangereuses probables des sous-systèmes critiques.

Les fiches techniques associées au système nous fournissent les valeurs du MTTFd (Mean Time To Dangerous Failure) pour chaque composant de sécurité.

Pour estimer la probabilité de défaillance dangereuse par heure (PFHd) de ces sous-systèmes, nous avons utilisé la relation mathématique simplifiée suivante, valable pour un système non réparable et à taux de défaillance constant :

$$PFHd = \frac{1}{MTTFd}$$

Les résultats obtenus sont exprimés en heures⁻¹, et servent à positionner chaque sous-système dans une logique d'évaluation de la conformité aux exigences des niveaux d'intégrité de sécurité (SIL), conformément à la norme IEC 61508.

Les calculs suivants ont été réalisés :

Sous-Système	Fonctions de sécurité	MTTFd (h)	PFHd (h ⁻¹)	Niveau SIL / PL
Capteurs de flux inverse	FS₁	10 ⁸	1.0 × 10 ⁻⁸	SIL 3 / PL _e
Electrovannes	FS_{1,3 & 4}	10 ⁸	1.0 × 10 ⁻⁸	SIL 3 / PL _e
Alimentation gaz secours	FS₂	5.0 × 10 ⁵	2.0 × 10 ⁻⁶	SIL 1 / PL _c
Capteurs de ΔP	FS₃	2.0 × 10 ⁶	5.0 × 10 ⁻⁷	SIL 2 / PL _d
Détecteurs IR	FS₄	5.0 × 10 ⁵	2.0 × 10 ⁻⁶	SIL 1 / PL _c
Capteurs thermiques	FS₅	10 ⁶	1.0 × 10 ⁻⁶	SIL 1 / PL _c

Tab.13 : Calcul de la PFHd à partir du MTTFd

Le niveau de Performance (PL) d'une fonction de sécurité avec un sous-système individuel (tel que FS₂ ou FS₅) reste inchangé. En revanche, le PL global des fonctions de sécurité intégrant plusieurs sous-systèmes doit être calculées conformément au tableau suivant défini par la norme ISO 13849.

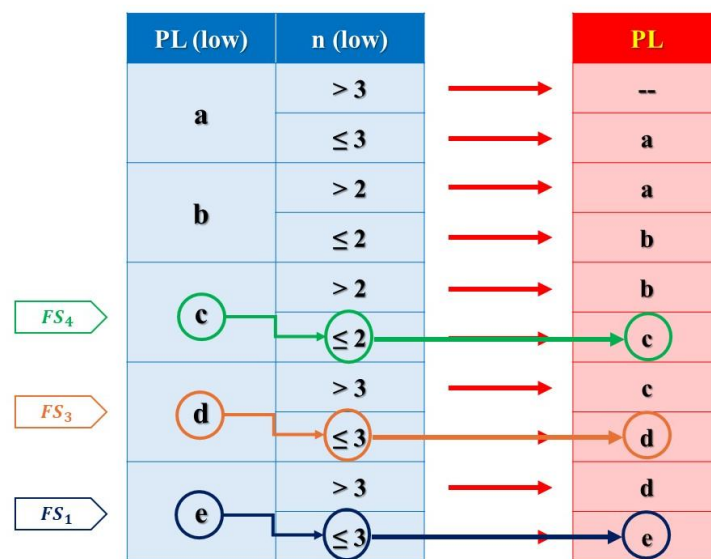


Fig.17 : Détermination du PL_{global}

Le tableau suivant présente une comparaison entre les niveaux de performance exigés PLr et les niveaux de performance PL des fonctions de sécurité trouvés :

Fonctions de Sécurité		Sous-systèmes	PL	PLr
FS ₁	Arrêt d'urgence	Capteur de flux inverse + Electrovanne	e	e
FS ₂	Rallumage automatique	Système d'alimentation gaz secours	c	c
FS ₃	Alarme d'obstruction + Arrêt d'urgence	Capteurs de ΔP + Electrovanne	d	d
FS ₄	Arrêt d'urgence	Détecteurs IR + Electrovanne	c	c
FS ₅	Alarme de radiation	Capteur thermiques	c	c

Tab.14 : comparaison entre les PLr et les PL des fonctions de sécurités

La constatation que les Performance Index (PLi) calculés pour toutes les fonctions de sécurité du système étudié sont égaux aux Performances Level requis (PLr) est un résultat acceptable au regard de la norme ISO 13849.

Conclusion

L'égalité entre le PL et le PLr indique que les fonctions de sécurité du système de torchage ont été conçues et réalisées de manière à atteindre précisément le niveau de performance requis pour maîtriser les risques identifiés. Elle signifie que le système de sécurité est conforme aux exigences de la norme ISO 13849.

Pratiquement et selon les recommandations de la norme, les PL des fonctions de sécurité d'un système critique (à haut risque majeur) doivent être supérieurs aux PLr pour compenser les incertitudes des calculs et des évaluations dans toutes les étapes de gestion du risque, sinon il faut assurer un système de maintenance rigueur pour éviter toute une défaillance dans les équipements assurent les fonctions de sécurité de ce type des installations critiques.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La sécurité fonctionnelle est une composante essentielle de l'ingénierie moderne, visant à garantir la protection des personnes, des biens et de l'environnement contre les risques liés aux défaillances des systèmes industriels.

Ce mémoire a entrepris de lier la théorie rigoureuse de la sécurité fonctionnelle à la réalité opérationnelle d'une infrastructure industrielle critique (système de torchère de la station SP4-Hassi R'mel). En achevant ce parcours, de l'exploration des normes fondamentales à l'application méticuleuse de la méthodologie ISO 13849, cette étude a non seulement atteint son objectif principal, mais a également permis de formuler des constats majeurs.

Premièrement, ce travail a vérifié l'adéquation du système de sécurité existant. L'analyse a démontré que les fonctions de sécurité mises en œuvre atteignent le niveau de performance requis (PLr) pour les risques identifiés. Ce résultat, loin d'être anodin, confirme la pertinence des choix de conception et d'ingénierie effectués sur cette installation clé du transport d'hydrocarbures en Algérie. Il offre une assurance quantifiée que le système est capable, en l'état actuel, de remplir sa mission de protection.

Conclusion générale

Deuxièmement, cette étude souligne une vérité fondamentale de la gestion des risques : la conformité est un seuil, non un sommet. L'égalité parfaite entre le niveau de performance calculé (PL) et le niveau requis (PLr) agit comme un rappel : il n'existe aucune marge de sécurité intrinsèque pour pallier les dégradations futures, les erreurs humaines ou les incertitudes inhérentes à toute analyse. Cette conclusion appelle donc à une vigilance accrue et à la mise en place d'une politique de maintenance préventive et de tests périodiques d'une rigueur absolue, seule garante du maintien de ce niveau de sécurité sur le long terme.

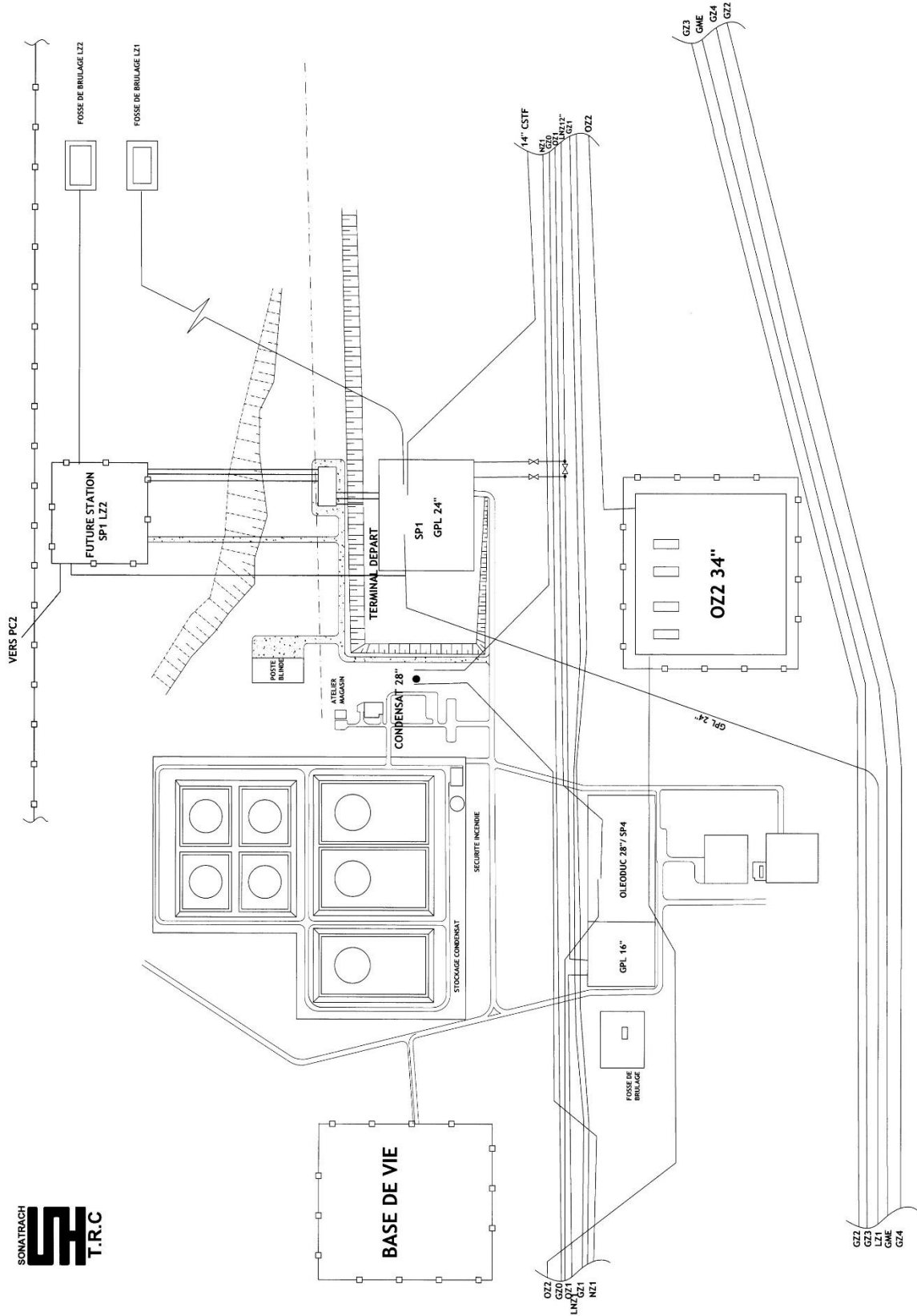
Enfin, cette recherche ouvre des perspectives importantes. Au-delà du cas spécifique de la station LZ2, la démarche ici présentée constitue un modèle répliquable pour l'évaluation d'autres installations similaires. Des travaux futurs pourraient s'orienter vers une analyse comparative des coûts sur le cycle de vie, intégrant les dépenses de maintenance et les coûts évités grâce à la robustesse du système de sécurité. Une autre piste serait d'approfondir l'intégration des facteurs humains et organisationnels dans l'évaluation.

Bibliographie

- [1] Pilz. (n.d.). Normes pour la sécurité fonctionnelle. Consulté le 14 mai 2025, de <https://www.pilz.com/fr-BE/support/law-standards-norms/functional-safety>
- [2] GT Engineering. (n.d.). IEC 61508 : Sécurité fonctionnelle des E/E/PE. Consulté le 14 mai 2025, de <https://www.gt-engineering.it/fr/reglements-techniques/normes-iec/iec-61508-securite-fonctionnelle-des-e-e-pe/>
- [3] ISO. (n.d.). ISO 13849-1:2023(fr), Sécurité des machines. Consulté le 14 mai 2025, de <https://www.iso.org/obp/ui/#!iso:std:73481:fr>
- [4] ISIT. (n.d.). ISO 13849 : Répondre aux exigences de la norme de sûreté des machines industrielles. Consulté le 14 mai 2025, de <https://www.isit.fr/fr/article/iso-13849-repondre-aux-exigences-de-la-norme-de-surete-des-machines->
- [5] Bufferne, J. (2015). « Norme CEI 61508 : La sécurité fonctionnelle dans l'industrie ». Techniques de l'Ingénieur.
- [6] Hassani, M. (s.d.). « Document universitaire » Université Amar Telidji Laghouat.
- [7] GT Engineering. (2023, 8 août). *Bref historique des normes de la sécurité fonctionnelle*. Disponible sur : (<https://www.gt-engineering.it>)
- [8] Rockwell Automation. (2009, février). « Systèmes de commande de sécurité pour machines : Principes, normes et intégration (SAFEBOOK 3) »..
- [9] Pratiques RH. (2021, juin). « Comment savoir si vos machines sont conformes ? » Disponible sur : (<https://pratiquesrh.com/>)
- [10] Durand, J.-M. (2013, 13 février). « Norme EN ISO 13849-1 : Sécurité des machines – Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité ». DEKRA Industrial SA.
- [11] Endress+Hauser. (s.d.). « Sécurité fonctionnelle – SIL : Les systèmes instrumentés de sécurité dans l'industrie des process ». People for Process Automation.
- [12] INRS, Sécurité des machines – Principes de conception des systèmes de commande, ED 6310, févr. 2019 .
- [13] SONATRACH. (s.d.). « Manuel d'exploitation – Oléoduc LZ2 » \ [Document interne].
- [14] ENI. (2008). « Feuille de données pour la torche OLEODUC LZ2 24'' GPL Hassi R'mel – Arzew » \ [Document technique rédigé par l'ingénieur Snamprogetti].
- [15] ITAS S.p.A. (s.d.). « Document de présentation d'une formation sur site SONATRACH – OLEODUC LZ2 24'' GPL Hassi R'mel – Arzew »

Annexes

1. Plan des stations de pompage groupe n°04 Hassi Rmel



2. La forme mécanique réelle des tubes de torches (la fosse de brulage)



3. Fenêtre d'ordinateur pour contrôler le système de torche depuis la salle de contrôle du Station LZ2 :

