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 : DJEKIDEL Oussama Abderrahmane

BENATTIA Yacine

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIÈRE : Hygiène et sécurité industrielle

OPTION : Hygiène et sécurité industrielle

Thème

ANALYSE QUANTITATIVE DES RISQUES LIÉS AUX BACS DE STOCKAGE

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
HANNACHI Manelle	MCA	Présidente
HASSANI Mouaadh	MCB	Examinateur
ZERROUKI Hamza	MCA	Rapporteur

Promotion : 2025/2026

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer la profondeur de mon amour, de mon respect et de ma gratitude envers vous. Merci pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre de poursuivre mes études dans les meilleures conditions. Votre soutien moral, vos encouragements constants, votre patience et votre confiance ont toujours été ma plus grande source de motivation. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À mes frères et sœurs

Pour leur affection, leur soutien et leur présence dans les moments difficiles comme dans les moments de joie. Je leur souhaite réussite, bonheur et prospérité.

À toute ma famille

Pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À mes amis et collègues

Pour leur aide précieuse, leur esprit de solidarité, les moments de partage et les souvenirs inoubliables vécus durant ces années d'études.

À tous mes enseignants

Qui ont contribué à ma formation et à mon développement personnel et professionnel par leur savoir et leur dévouement.

Enfin, à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce mémoire avec une profonde reconnaissance et un immense respect.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur(e), Dr. HAMZA

ZERROUKI, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son accompagnement scientifique et son soutien permanent tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses orientations pertinentes et ses remarques constructives ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux honorables membres du jury Dr HANNACHI Manelle et Dr HASSANI Mouaadh qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce mémoire. Nous sommes honorés par l'intérêt qu'ils portent à notre travail et nous leur sommes reconnaissants pour leurs remarques et suggestions qui contribueront à son amélioration.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel de SONATRACH, particulièrement aux responsables et aux ingénieurs de l'unité MPP1 de Hassi R'Mel, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité ainsi que pour les informations techniques et les documents mis à notre disposition durant cette étude.

Nous remercions vivement tous nos enseignants du département qui ont assuré notre formation universitaire et nous ont transmis les connaissances nécessaires à la réalisation de ce projet.

Nous exprimons également notre reconnaissance à nos collègues et camarades de promotion pour l'entraide, les échanges enrichissants et l'ambiance de travail qui ont marqué notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles et à toutes les personnes qui nous ont soutenus moralement ou matériellement tout au long de nos études et qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réussite de ce travail.

À toutes ces personnes, nous exprimons notre profonde gratitude et notre respect le plus sincère.

Table des matières

Introduction Générale **1**
Problématique 1
Objectifs 2
Structure de mémoire 2
1. Introduction à la Gestion des barrières de sécurité **1**
2. Généralités sur les procédés industriels et le stockage des hydrocarbures **1**
3. État de l'art sur la gestion des risques industriels **2**
4. Les Barrières de Sécurité : Concepts et Classification **3**
4.1. Exemple des Barrières 4
4.1.1. Barrières de Prévention 4
4.1.2. Barrières de Mitigation (Protection) 4
5. Évaluation des performances : Fiabilité et Niveaux SIL **4**
5. Gestion des Barrières de Sécurité **5**
6. Méthodologies d'évaluation des performances et gestion des barrières de sécurité **7**
6.1. Les principales méthodologies d'évaluation des performances 7
6.2. L'intégration de l'évaluation dans la gestion des barrières 8
6.3. Applications concrètes sur le site de SONATRACH à Hassi R'Mel 8
7. Conclusion **9**
Chapitre 2 : Évaluation des performances des barrières de sécurité **11**
1. Introduction **11**
2. Description générale du système choisi **11**
2.1 Structure du bac de stockage de gaz 11
2.2 Composition du système 12
1.3. Fonctionnement du système 12
3. Choix du système étudié selon la disponibilité des données **13**
4. Identification des barrières de sécurité existantes dans le système **14**
4.1. Les barrières techniques de sécurité 14
4.2. Les barrières humaines de sécurité 15
4.3. Les barrières organisationnelles 15
4.4. Barrières de prévention 15
4.5. Barrières de protection 16
5. Analyse HAZOP du système choisi (Nœud 4 – Bacs de stockage condensat S204A/B/C) **17**

5.1 Description de la méthode HAZOP 18
5.3 Matrice des risques 19
5.5 Echelle des occurrences : 20
5.6 Niveaux de risque : 20
5.7. Analyse HAZOP (Nœud 4 – Bacs de stockage condensat S204A/B/C) 20
5.8. Synthèse des résultats de l'HAZOP 24
6. Modélisation par le diagramme de nœud papillon **24**
6.1. Définition de l'Événement redouté central (ERC) 25
6.2. Partie gauche – Arbre de défaillance (causes) 25
6.3. Partie droite – Arbre d'événements (conséquences) 25
6.4. Diagramme simplifié du nœud papillon 26
7. Évolution des accidents liés à la défaillance des barrières de sécurité **27**
7.1. Statistiques issues de l'étude LASTFIRE (Large Atmospheric Storage Tank Fires) 27
7.2. Accidentologie interne – Région de Hassi R'mel 29
7.3. Conclusion sur l'accidentologie 30
8. Évaluation des performances des barrières de sécurité du système choisi selon certains critères **30**
9. Interprétation des résultats **31**
10. Recommandations d'amélioration **32**
10.1 Recommandations techniques (instrumentées et mécaniques) 32
10.2 Recommandations organisationnelles et humaines 33
10.3 Recommandations de maintenance et inspection 33
10.4 Recommandations générales issues de l'Étude de Dangers (applicables au CSTF et à l'ensemble du site) 34
11. Conclusion **35**
Conclusion générale **37**
Références **38**

Liste des abréviations :

AAA : Accident Avec Arrêt

LARP : As Low As Reasonably Practicable

AMDE : Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

API : American Petroleum Institute

APR : Analyse Préliminaire des Risques

ASA : Accident Sans Arrêt

ATEX : Atmosphères Explosibles

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

BP : Barrière de Prévention / Basse Pression

BPCS : Basic Process Control System

BPr : Barrière de Protection / Mitigation

CCPS : Center for Chemical Process Safety

CEI / IEC : Commission Électrotechnique Internationale / International Electrotechnical Commission

CND : Contrôle Non Destructif

CSTF : Centre de Stockage et de Transfert

DNV : Det Norske Veritas

DP : Direction Production

EEMUA : Engineering Equipment and Materials Users Association

ERC : Événement Redouté Central

ESD / ESDV : Emergency Shut Down / Emergency Shut Down Valve

FCV : Flow Control Valve

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

HAZOP : Hazard and Operability study

HRM : Hassi R'Mel

HSE : Hygiène, Sécurité, Environnement

HSI : Hygiène et Sécurité Industrielle

INERIS : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

PL : Independent Protection Layer

ISO : International Organization for Standardization

LAH : Level Alarm High **LAHH** : Level Alarm High High **LAHHH** : Level Alarm High High High **LAL** : Level Alarm Low **LALL** : Level Alarm Low Low

LASTFIRE : Large Atmospheric Storage Tank Fires

LIAH : Level Indicator Alarm High

LOPA : Layer Of Protection Analysis

LV : Level Valve

MOSAR : Méthode Organisée et Systémique d'Analyse de Risque

MPP / MPP1 / MPP2 : Module Processing Plant

MTTF : Mean Time To Failure

MTTR : Mean Time To Repair

OREDA : Offshore Reliability Data

P&ID : Piping and Instrumentation Diagram

PFD / PFDavg : Probability of Failure on Demand / Average

PIAH : Pressure Indicator Alarm High

PIAL : Pressure Indicator Alarm Low

POI : Plan d'Opération Interne

PSV : Pressure Safety Valve

QRA : Quantitative Risk Assessment

QSE : Qualité, Sécurité, Environnement

RBI : Risk-Based Inspection

REX : Retour d'Expérience

RRF : Risk Reduction Factor

SDV : Shut Down Valve

SIF : Safety Instrumented Function

SIL : Safety Integrity Level

SIS : Safety Instrumented System

SONATRACH : Société Nationale pour la Recherche, la Production, du Transport, de la Transformation, et de la Commercialisation des Hydrocarbures

ST : Sciences et Technologies

TAH / TIAH : Temperature Alarm High / Temperature Indicator Alarm High

TVR : Tension de Vapeur Reid

UTGA : Unité de Traitement de Gaz d'Alimentation

UV / UV-IR : Ultraviolet / Infrarouge

UVCE : Unconfined Vapor Cloud Explosion

Liste des figures :

Figure 1. Schéma procédé (P&ID) et barrières de sécurité du bac S204……27
Figure 2. Résultats des tableaux HAZOP.....41
Figure 3. Diagramme de Nœud Papillon du bac de stockage.....45
Figure 4. Évolution des accidents liés à la défaillance des barrière……47
Figure 5. Recommandations d'amélioration……..…….54

Liste des tableaux :

Tableau 1. Correspondance entre niveau SIL, probabilité de défaillance à la demande (PFD) et performance……18
Tableau 2. Les différents équipements du bac de stockage……..25
Tableau 3. Sources de données disponibles pour le système choisi…….27
Tableau 4. Exemple de barrières de prévention (BP1 à BP16)……30
Tableau 5. Exemple de barrières de protection (BPr1 à BPr16)……..31
Tableau 6. Exemple de tableau pour l'HAZOP (canevas)……33
Tableau 7. Matrice de risques SONATRACH DP……...34
Tableau 8. Échelle des gravités (G1 à G4)……...35
Tableau 9. Échelle des occurrences (P1 à P4)……..35
Tableau 10. Niveaux de risque (Acceptable / ALARP / Inacceptable)……36
Tableau 11. Causes principales menant à l'ERC (Événement Redouté Central)……42
Tableau 12. Enchaînement des événements sur l'arbre d'événements (AdE)…….43
Tableau 13. Scénarios de conséquences sur l'arbre d'événements (S1 à S5)……..44
Tableau 14. Causes de défaillance dans le bac selon LASTFIRE……...46
Tableau 15. Répartition des accidents par substance (Hassi R'Mel)……...48
Tableau 16. Causes principales des accidents (Hassi R'Mel)……..48
Tableau 17. Conséquences des accidents (Hassi R'Mel)…….48
Tableau 18. Rappel de la grille de criticité SONATRACH DP……...51
Tableau 19. Positionnement des scénarios résiduels du nœud papillon sur la grille……...51

Introduction Générale

L'industrie pétrolière et pétrochimique joue un rôle fondamental dans l'économie mondiale, nécessitant des infrastructures complexes pour l'extraction, le traitement et le stockage des hydrocarbures. Parmi ces infrastructures, les parcs de stockage occupent une place critique. Les bacs de stockage, conçus pour contenir de grandes quantités de fluides inflammables, toxiques ou explosifs (tels que le pétrole brut, les condensats ou les produits raffinés), représentent un enjeu majeur en matière de sécurité industrielle.

En effet, la concentration de ces substances dangereuses expose les installations, le personnel, l'environnement et les populations avoisinantes à des risques d'accidents majeurs : incendies, explosions (UVCE, BLEVE), fuites toxiques ou pollutions environnementales. L'accidentologie internationale, marquée par des catastrophes telles que Buncefield (2005) ou Texas City (2005), rappelle que la défaillance des barrières de sécurité peut entraîner des conséquences humaines, économiques et environnementales dévastatrices.

Face à ces menaces, la simple identification des dangers ne suffit plus. Il est impératif d'évaluer ces risques de manière chiffrée et précise afin de dimensionner adéquatement les mesures de prévention et de protection. Cette démarche s'inscrit dans le cadre de l'**Analyse Quantitative des Risques (QRA)**, une méthodologie reconnue internationalement qui combine l'identification des scénarios d'accidents, l'évaluation probabiliste de leur occurrence et la modélisation de leurs conséquences.

En Algérie, le cadre réglementaire de la prévention des risques majeurs est défini par la **loi n° 04-20 du 25 décembre 2004** relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. **SONATRACH**, en tant que première entreprise pétrolière du continent africain, occupe une place centrale dans l'application de ces exigences. La Direction Production (DP) de SONATRACH a développé une expertise reconnue dans l'analyse des risques technologiques majeurs, avec des études de dangers menées sur l'ensemble de ses unités, notamment au niveau du **gisement de Hassi R'mel**, le plus grand gisement de gaz naturel d'Afrique.

Problématique

Malgré la mise en place de nombreuses barrières de sécurité (techniques, humaines et organisationnelles), des incidents et des accidents regrettables continuent de survenir sur les sites industriels. L'analyse des enseignements tirés montre que les causes profondes de ces incidents sont souvent liées à la défaillance des barrières : maintien insuffisant, corrosion non détectée, erreurs humaines ou conception inadéquate des systèmes de sécurité automatisés. Par conséquent, la question centrale qui guide cette recherche est la suivante :

Les barrières de sécurité mises en place sur les réservoirs de stockage de condensats dans les unités HRM sont-elles suffisamment efficaces pour garantir un niveau de risque acceptable ?

Cette question se subdivise en plusieurs sous-questions :

- Quelles sont les barrières de sécurité présentes dans le système étudié et comment sont-elles classées ?
- Quels sont les scénarios d'accidents majeurs susceptibles de se produire en cas de défaillance de ces barrières ?
- Quel est le niveau de performance (SIL) des barrières de sécurité équipées de capteurs ?
- Le nombre de couches de protection et leur indépendance sont-ils suffisants pour réduire les risques à un niveau acceptable ?
- Quelles améliorations peut-on proposer pour renforcer la sécurité du système ?

Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser une analyse quantitative des risques liés aux bacs de stockage et d'évaluer la performance des barrières de sécurité associées. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Décrire le système choisi : présenter le circuit de stockage de condensat du module MPP1 à Hassi R'mel (bacs S204A/B/C) et justifier sa sélection.
2. Identifier et classifier les barrières de sécurité existantes sur le système, en distinguant les barrières de prévention et de protection.
3. Analyser les risques par la méthode HAZOP afin d'identifier les déviations potentielles, leurs causes, leurs conséquences et les barrières associées.
4. Modéliser les scénarios d'accidents par le diagramme de nœud papillon (Bow-Tie), en structurant les causes, l'événement redouté central et les conséquences.
5. Évaluer la performance des barrières selon trois critères : le degré de confiance (calcul des niveaux SIL), l'efficacité (analyse LOPA) et le coût.
6. Formuler des recommandations d'amélioration concrètes pour renforcer le niveau de sécurité du système.

Structure de mémoire

Ce mémoire est structuré en deux chapitres principaux, précédés d'une introduction générale. Le premier chapitre « Étude conceptuelle et état de l'art » pose le cadre théorique nécessaire à la compréhension de l'étude. Le deuxième chapitre « Évaluation des performances des barrières de sécurité » constitue le cœur de l'étude appliquée. Il suit une démarche structurée de plusieurs étapes. Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats, répond à la problématique posée et ouvre des perspectives pour des travaux futurs.

CHAPITRE I : Gestion des barrières de sécurité

Dans le domaine des industries extractives et de transformation, la sécurité est devenue une discipline d'ingénierie à part entière. Ce chapitre a pour vocation de définir le socle théorique nécessaire à la compréhension de l'Analyse Quantitative des Risques (QRA) appliquée aux systèmes de stockage. Nous explorerons les caractéristiques technologiques des bacs de stockage, les principes fondamentaux de la gestion des risques selon les standards internationaux, ainsi que la modélisation mathématique des barrières de sécurité.

1. Introduction à la Gestion des barrières de sécurité

Pour assurer une gestion efficace des barrières de sécurité dans les parcs de stockage d'hydrocarbures, il est essentiel de s'appuyer sur des outils d'analyse des risques adaptés. Ces outils permettent d'identifier les dangers, d'évaluer la performance des barrières existantes et de proposer des améliorations. Parmi les plus couramment utilisés, on retrouve l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE), l'arbre de défaillance, la méthode HAZOP, l'analyse des couches de protection (LOPA), ainsi que les réseaux bayésiens et les simulations de Monte Carlo. Ces outils aident à comprendre les faiblesses du système de sécurité et à prioriser les actions. Mais l'analyse seule ne suffit pas : il faut ensuite gérer ces barrières dans le temps. La gestion des barrières de sécurité désigne l'ensemble des activités organisées visant à garantir qu'une barrière, qu'elle soit technique, humaine ou organisationnelle, reste capable de remplir sa fonction de prévention, de détection ou de protection contre un accident majeur. Elle ne se limite pas à l'installation initiale d'un équipement ou à la rédaction d'une procédure. Elle englobe des actions continues comme la maintenance préventive et corrective, les tests périodiques (vannes de déluge, détecteurs de flamme), la vérification des cuvettes de rétention, la formation des opérateurs, et la gestion des modifications apportées aux installations. Une barrière bien gérée est une barrière dont le niveau de performance est connu, surveillé et maintenu dans le temps. À l'inverse, une barrière négligée (corrosion non détectée, vanne bloquée, procédure obsolète, opérateur non formé) peut créer un risque aussi grand que l'absence de barrière. C'est pourquoi l'analyse des risques et la gestion des barrières doivent être intimement liées : les outils d'analyse identifient les points critiques, et la gestion des barrières met en œuvre les actions correctives. Dans le domaine du stockage d'hydrocarbures, où les conséquences d'une défaillance peuvent être catastrophiques (BLEVE, effet domino, pollution), une gestion rigoureuse des barrières de sécurité est la clé pour maintenir le risque à un niveau acceptable et protéger durablement les personnes, les biens et l'environnement.

2. Généralités sur les procédés industriels et le stockage des hydrocarbures

L'industrie pétrolière et gazière repose sur un ensemble de procédés industriels complexes qui permettent d'extraire, de transporter, de transformer et de stocker les hydrocarbures jusqu'à leur commercialisation. Un procédé industriel peut être défini comme une succession d'opérations physiques et chimiques, réalisées

dans des équipements spécifiques (colonnes de distillation, échangeurs de chaleur, séparateurs, pompes, compresseurs, bacs de stockage), visant à transformer une matière première en produits finis répondant à des spécifications précises. Dans le cas du gaz naturel, par exemple, le procédé comprend des étapes de séparation des phases liquides et gazeuses, de déshydratation, de fractionnement pour extraire les coupes légères (GPL) et lourdes (condensats), ainsi que de stabilisation et de stockage. Chaque équipement fonctionne dans des conditions opératoires définies (température, pression, débit) qui doivent être rigoureusement contrôlées pour garantir à la fois la qualité des produits et la sécurité des installations. Les zones de stockage, qu'il s'agisse de bacs atmosphériques pour les liquides à pression ambiante ou de sphères sous pression pour les gaz liquéfiés, constituent une partie essentielle de ces procédés. Elles assurent la continuité entre la production et l'expédition, mais elles représentent également des points de vulnérabilité particuliers en raison des quantités importantes de matières inflammables ou toxiques qu'elles contiennent. La maîtrise des procédés industriels repose donc sur une combinaison de moyens techniques (automatismes, instrumentation de contrôle, systèmes de sécurité), de moyens humains (formation, compétences des opérateurs, respect des consignes) et de moyens organisationnels (procédures, maintenance, gestion des modifications). Toute dérive d'un paramètre de procédé – une pression trop élevée, une température excessive, un niveau mal régulé – peut, si elle n'est pas détectée et corrigée à temps, conduire à une situation dangereuse, voire à un accident majeur. C'est pourquoi la conception, l'exploitation et la surveillance des procédés industriels intègrent dès l'origine une approche de maîtrise des risques, qui sera détaillée dans les sections suivantes. Le présent mémoire s'appuie sur une étude menée au sein d'une installation de SONATRACH (division production), où j'ai effectué mon stage et où j'ai pu observer concrètement les procédés de stockage d'hydrocarbures ainsi que les barrières de sécurité associées.

3. État de l'art sur la gestion des risques industriels

La gestion des risques industriels a connu une évolution significative au cours des dernières décennies, passant d'une approche réactive, fondée sur le constat des accidents passés, à une approche proactive et préventive, intégrée dès la conception des installations. Cet état de l'art repose sur plusieurs piliers fondamentaux : l'identification systématique des dangers, l'évaluation quantitative et qualitative des risques, la mise en place de barrières de sécurité performantes, ainsi que l'organisation d'un retour d'expérience continu pour améliorer les dispositifs existants. Au niveau international, des référentiels tels que les normes ISO 31000 [1] (management du risque) et IEC 61508 (sécurité fonctionnelle) structurent les bonnes pratiques. Dans le secteur pétrolier et gazier, des guides professionnels comme les normes API (American Petroleum Institute) – notamment l'API 653 pour les bacs de stockage, l'API 2350 pour la prévention des débordements, ou encore l'API 752 pour la gestion des bâtiments exposés – constituent des références incontournables. Par ailleurs, des bases de données spécialisées comme OREDA (Offshore Reliability Data) [2] et des retours d'expérience collectifs comme l'étude LASTFIRE (portant sur plus de

30 000 bacs dans le monde) fournissent des données fiables sur les taux de défaillance, les modes de défaillance et les causes d'accidents majeurs. En Algérie, la gestion des risques industriels s'inscrit dans un cadre réglementaire rigoureux, notamment à travers la loi n°04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes, ainsi que le décret exécutif n°07-144 fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. Dans ce contexte, SONATRACH, en tant que première entreprise pétrolière du continent africain, occupe une place centrale. La Direction Production (DP) de SONATRACH a développé une expertise reconnue dans l'analyse des risques technologiques majeurs, avec des études de dangers menées sur l'ensemble de ses unités (CSTF, modules de traitement, centres de stockage). L'entreprise utilise des méthodes d'analyse éprouvées telles que l'APR, l'HAZOP, l'AMDEC, les arbres de défaillance et d'événements, et applique des matrices de criticité spécifiques pour hiérarchiser les risques. Elle s'appuie également sur des partenariats avec des bureaux d'études internationaux (DNV, par exemple)[2] pour réaliser des études quantitatives des risques (QRA) et des analyses de conséquences (modélisation VCE, BLEVE, feux de nappe, effets dominos). L'engagement de SONATRACH en matière de gestion des risques se traduit aussi par la mise en place de plans d'intervention internes (PII), de plans d'aide mutuelle (PAM), et par une politique de formation continue de son personnel. Ainsi, l'état de l'art sur la gestion des risques industriels ne saurait être présenté sans mentionner le rôle moteur de SONATRACH, dont les installations de stockage d'hydrocarbures (bacs atmosphériques, sphères GPL) constituent un cas d'étude pertinent pour illustrer les bonnes pratiques et les défis actuels de la maîtrise des risques majeurs.

4. Les Barrières de Sécurité : Concepts et Classification

Une barrière de sécurité est un dispositif, qu'il soit technique, humain ou organisationnel, conçu pour prévenir la survenue d'un événement dangereux, en limiter la propagation ou en atténuer les conséquences sur les personnes, les biens et l'environnement. Le concept repose sur le principe de la « défense en profondeur » (*defense in depth*), qui consiste à multiplier les couches de protection indépendantes afin qu'aucune défaillance unique ne puisse conduire à un accident majeur.

On distingue généralement trois grandes familles de barrières. Les **barrières techniques** incluent les équipements passifs (cuvettes de rétention, murs coupe-feu, toits flottants) et les équipements actifs (systèmes de détection de gaz et de flammes, vannes d'isolement automatiques, systèmes de déluge, soupapes de sûreté). Les **barrières humaines** concernent les actions des opérateurs (surveillance, intervention manuelle, respect des consignes) et dépendent directement de leur formation, de leur compétence et de leur vigilance. Les **barrières organisationnelles** regroupent l'ensemble des procédures, des règles de gestion, des permis de travail, des plans d'intervention et des retours d'expérience qui structurent l'exploitation sécurisée des installations. La performance d'une barrière se juge à son efficacité (capacité à remplir sa fonction), son indépendance (absence de cause commune de défaillance avec d'autres

barrières), son temps de réponse (adéquation avec la cinétique de l'accident) et sa fiabilité dans le temps. Dans l'industrie pétrolière, ces barrières sont particulièrement critiques au niveau des zones de stockage d'hydrocarbures, où les enjeux sont majeurs. **SONATRACH**, à travers ses nombreuses installations (CSTF, modules de traitement, centres de stockage de Hassi Messaoud, Hassi R'mel, Haoud Berkaoui), applique rigoureusement ces principes. Les bacs de stockage sont par exemple équipés de cuvettes de rétention (barrière passive), de détecteurs de niveau avec alarmes et interlock (barrière technique active), de procédures de remplissage et de tournées de surveillance (barrières organisationnelle et humaine), ainsi que de systèmes de déluge et de mousse pour lutter contre un incendie. Les sphères de GPL bénéficient de barrières spécifiques : couronnes de refroidissement, soupapes de sûreté, vannes de sectionnement à distance, détection gaz et flamme. L'approche de SONATRACH en matière de classification et de gestion des barrières s'aligne sur les standards internationaux (API, IEC 61508)[3] [4] et intègre les retours d'expérience des études de dangers et des analyses HAZOP. Ainsi, la compréhension des barrières de sécurité, de leurs rôles et de leur classification, est indispensable pour analyser la maîtrise des risques dans les parcs de stockage d'hydrocarbures, comme le démontrent les pratiques mises en œuvre au sein des installations de SONATRACH [5].

4.1. Exemple des Barrières

Une barrière est une mesure de maîtrise des risques. Pour être considérée comme une **Couche de Protection Indépendante (IPL)**, elle doit être spécifique, indépendante, fiable et auditable.

4.1.1. Barrières de Prévention

Elles visent à empêcher l'Événement Redouté Central (ERC), tel que le débordement d'un bac.

- **Systèmes de contrôle (BPCS) :** Régulation automatique du niveau.
- **Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) :** Alarmes de niveau très haut (LAHH) déclenchant la fermeture des vannes d'admission (SDV).

4.1.2. Barrières de Mitigation (Protection)

Elles limitent l'ampleur des conséquences après la perte de confinement.

- **Barrières Passives :** Cuvettes de rétention (conçues pour retenir 110% du volume du plus grand bac), murs coupe-feu.
- **Barrières Actives :** Systèmes d'aspersion d'eau, canons à mousse, détection de gaz et flamme.

5. Évaluation des performances : Fiabilité et Niveaux SIL

L'évaluation des performances des barrières de sécurité repose sur des indicateurs quantifiables qui permettent de mesurer leur capacité à remplir leur fonction de manière fiable dans le temps. Pour les

barrières techniques, et plus particulièrement pour les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), le niveau de performance est exprimé par le SIL (Safety Integrity Level). Défini par les normes internationales IEC 61508 et IEC 61511, le SIL comporte quatre niveaux (SIL 1 à SIL 4). Plus le niveau est élevé, plus la probabilité de défaillance à la demande (PFD) est faible, et plus la barrière est performante. Le tableau ci-dessous résume cette correspondance :

Tableau 1. Niveau De SIL Défini par les normes internationales IEC 61508 et IEC 61511.

Niveau SIL	Probabilité de défaillance à la demande (PFD)	Performance
SIL 1	Comprise entre 10^{-1} et 10^{-2}	Faible
SIL 2	Comprise entre 10^{-2} et 10^{-3}	Moyenne
SIL 3	Comprise entre 10^{-3} et 10^{-4}	Élevée
SIL 4	Comprise entre 10^{-4} et 10^{-5}	Très élevée

Dans l'industrie pétrolière, les fonctions critiques de sécurité (comme la fermeture automatique d'une vanne d'admission en cas de niveau très haut dans un bac, ou le déclenchement d'un système de déluge) sont généralement dimensionnées avec des objectifs de **SIL 2 ou SIL 3**, selon la gravité des conséquences redoutées. La fiabilité d'une barrière ne se limite toutefois pas au seul composant électronique : elle intègre également les capteurs, les actionneurs, les logiques de traitement, ainsi que les facteurs humains et organisationnels (maintenance, tests périodiques, gestion des défaillances). C'est pourquoi l'évaluation des performances inclut des indicateurs complémentaires tels que le taux de défaillance (λ), le temps moyen de fonctionnement avant défaillance (MTTF), le temps moyen de réparation (MTTR), ou encore la disponibilité (A). Des bases de données spécialisées comme OREDA fournissent des valeurs de référence pour les équipements pétroliers. Dans ce cadre, **SONATRACH** applique rigoureusement ces principes d'évaluation des performances sur ses installations sensibles. Par exemple, les systèmes de détection de gaz et de flamme, les vannes de sectionnement d'urgence (SDV) et les systèmes de déluge des sphères de GPL sont conçus avec des niveaux de SIL déterminés à partir des études de dangers et des analyses HAZOP. Les études quantitatives des risques (QRA) menées par SONATRACH, souvent en partenariat avec des bureaux d'études comme DNV, intègrent le calcul des PFD et des niveaux de SIL pour justifier la maîtrise des risques. De plus, l'entreprise met en œuvre des programmes de tests périodiques et de maintenance préventive pour maintenir dans le temps le niveau de performance requis. Ainsi, l'évaluation de la fiabilité et des niveaux SIL ne constitue pas une simple exigence normative ; elle est au cœur de la stratégie opérationnelle de SONATRACH pour garantir la sécurité de ses installations de stockage d'hydrocarbures et protéger les personnes, les biens et l'environnement [6].

5. Gestion des Barrières de Sécurité

La gestion des barrières de sécurité ne se limite pas à leur conception ou à leur installation initiale. Elle englobe l'ensemble des activités organisées visant à garantir qu'une barrière, qu'elle soit technique,

humaine ou organisationnelle, reste capable de remplir sa fonction de prévention, de détection ou de protection tout au long de la vie de l'installation. Une barrière bien gérée est une barrière dont le niveau de performance est connu, surveillé et maintenu dans le temps. À l'inverse, une barrière négligée (corrosion non détectée, vanne bloquée, procédure obsolète, opérateur non formé) peut créer un risque aussi grand que l'absence de barrière. La gestion des barrières repose sur plusieurs principes fondamentaux : la traçabilité des actions de maintenance et des tests, l'indépendance entre les barrières pour éviter les défaillances de cause commune, la redondance lorsque le niveau de risque l'exige, et l'amélioration continue à partir du retour d'expérience.

Dans l'industrie pétrolière, cette gestion s'articule autour de trois grandes familles d'actions :

- La maintenance et les tests périodiques : les barrières techniques doivent être inspectées, testées et réparées à intervalles réguliers. Par exemple, les soupapes de sûreté sont testées périodiquement, les vannes de déluge sont actionnées manuellement ou automatiquement, les détecteurs de gaz sont calibrés, et les cuvettes de rétention sont vérifiées pour garantir leur étanchéité.
- La gestion du changement : toute modification apportée à l'installation (ajout d'un équipement, modification d'un procédé, changement de produit stocké) doit être analysée pour évaluer son impact sur les barrières existantes et, si nécessaire, adapter ces barrières ou en ajouter de nouvelles.
- La formation et la sensibilisation : les barrières humaines et organisationnelles dépendent directement des compétences des opérateurs. Une formation continue, des exercices de simulation (incendie, fuite, évacuation) et une culture de sécurité forte sont essentiels pour maintenir l'efficacité de ces barrières.

Sur le site de SONATRACH à Hassi R'Mel, la gestion des barrières de sécurité est rigoureusement organisée, comme en témoignent les études de dangers et les analyses de risques réalisées sur les différentes unités. Plusieurs exemples concrets illustrent cette démarche :

- Pour les sphères de stockage de GPL (CSTF) : les barrières de sécurité font l'objet d'un programme de tests périodiques. Les soupapes de sûreté sont testées régulièrement, les systèmes de déluge à eau (couronnes de refroidissement) sont vérifiés, et les détecteurs de gaz et de flamme sont calibrés et testés. De plus, les vannes de sectionnement d'urgence sont actionnées périodiquement pour vérifier leur bon fonctionnement.
- Pour les bacs de stockage de condensat (CSTF) : la gestion des barrières passe par des inspections périodiques des fonds de bac pour détecter la corrosion (première cause de défaillance selon l'étude LASTFIRE), la vérification des cuvettes de rétention (dimensionnées pour contenir 110 % du volume du plus grand bac), et les tests des alarmes de niveau avec interlock sur les vannes de remplissage.
- Pour le module MPP2 : les recommandations issues des analyses HAZOP ont conduit à des actions concrètes de gestion des barrières : installation de détecteurs de gaz supplémentaires dans la zone

des ballons de séparation, mise en place d'alarmes de pression redondantes, installation de vannes automatiques en parallèle vers le centre de stockage, et mise à jour des procédures de réception des travaux pour éviter l'oubli d'outils ou de joints pleins dans les équipements [3].

- Pour le centre de production de Haoud Berkaoui : l'évaluation des barrières par la méthode LOPA [7]a permis d'identifier les défaillances potentielles d'un séparateur critique et de proposer des recommandations pour améliorer la fiabilité des couches de protection, avec des actions de maintenance préventive et des tests périodiques renforcés.

Ainsi, la gestion des barrières de sécurité chez SONATRACH, et en particulier sur le site de Hassi R'Mel, ne se résume pas à une simple liste d'équipements. Elle s'inscrit dans une démarche systémique et continue, intégrant la maintenance, les tests, la formation, la gestion du changement et le retour d'expérience. Cette approche permet de maintenir les barrières à un niveau de performance élevé, de réduire les risques majeurs et de protéger durablement les personnes, les biens et l'environnement [8]**.**

6. Méthodologies d'évaluation des performances et gestion des barrières de sécurité

L'évaluation des performances des barrières de sécurité et leur gestion constituent deux facettes indissociables d'une même démarche visant à maîtriser les risques industriels. Si la gestion assure le maintien dans le temps de l'efficacité des barrières, l'évaluation des performances permet de quantifier objectivement leur capacité à remplir leur fonction et d'identifier les éventuelles faiblesses. Ces deux activités s'alimentent mutuellement : les résultats de l'évaluation orientent les actions de gestion, et le retour d'expérience de la gestion enrichit les bases de données utilisées pour les évaluations futures.

6.1. Les principales méthodologies d'évaluation des performances

Plusieurs méthodologies, complémentaires, sont utilisées pour évaluer la performance des barrières de sécurité :

- L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) : elle examine chaque composant d'une barrière pour identifier les défaillances possibles, leurs causes et leurs conséquences. Cette méthode est particulièrement utile pour les barrières techniques complexes.

- L'arbre de défaillance : il modélise les combinaisons d'événements (défaillances de composants, erreurs humaines, défaillances de barrières) qui peuvent conduire à un événement redouté. Il permet de calculer la probabilité globale de défaillance et d'identifier les points critiques.

- La méthode LOPA (Layer Of Protection Analysis) : elle évalue semi-quantitativement la fréquence résiduelle d'un scénario d'accident en multipliant la fréquence de l'événement initiateur par les probabilités de défaillance à la demande (PFD) de chaque barrière. Elle permet de déterminer si les barrières existantes sont suffisantes ou si des améliorations sont nécessaires.

- La détermination des niveaux SIL (Safety Integrity Level) : pour les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS), le niveau SIL (de 1 à 4) quantifie la performance attendue. Un SIL plus élevé correspond à une probabilité de défaillance plus faible. Cette exigence est définie à partir des résultats de la LOPA.

- Les indicateurs de performance (indicateurs avancés et retardés) : les indicateurs avancés (nombre de tests réalisés, taux de conformité des maintenances, nombre de défaillances détectées lors des tests) permettent une évaluation proactive. Les indicateurs retardés (nombre d'accidents, temps d'indisponibilité, etc.) mesurent les conséquences des défaillances.

6.2. L'intégration de l'évaluation dans la gestion des barrières

L'évaluation des performances n'est pas une fin en soi. Ses résultats doivent être systématiquement intégrés dans le processus de gestion des barrières :

- Planification des tests et de la maintenance : les résultats de l'AMDE ou de l'arbre de défaillance permettent d'identifier les composants critiques qui nécessitent des tests plus fréquents ou une maintenance renforcée.
- Optimisation des redondances : la LOPA peut montrer qu'une barrière unique est insuffisante et qu'une redondance (deux vannes en série ou en parallèle, par exemple) est nécessaire pour atteindre le niveau de risque acceptable.
- Mise à jour des procédures et de la formation : l'identification d'erreurs humaines récurrentes lors des analyses peut conduire à réviser les procédures d'exploitation ou à renforcer la formation des opérateurs.
- Gestion du changement : toute modification d'une installation (ajout d'un équipement, modification des conditions opératoires) doit être précédée d'une réévaluation des performances des barrières affectées.

6.3. Applications concrètes sur le site de SONATRACH à Hassi R'Mel

Sur le site de SONATRACH à Hassi R'Mel, ces méthodologies sont appliquées de manière intégrée, comme en témoignent les études de dangers et les analyses de risques réalisées sur les différentes unités :

- Au CSTF (Centre de Stockage et de Transfert) : les études de dangers ont combiné l'analyse HAZOP, la LOPA et la modélisation des conséquences (logiciel PHAST) pour évaluer les barrières des sphères de stockage de GPL et des bacs de condensat. Les résultats ont permis de classer les risques (inacceptable, ALARP, acceptable) et de définir des actions de gestion prioritaires : vérification de la résistance des salles de contrôle (fireproof et blastproof), installation de vannes excess flow, renforcement des détections de gaz, etc.

- Sur le module MPP2 : l'analyse HAZOP réalisée sur la section de dégazage et stockage de condensat a identifié des défaillances potentielles (blocage de vannes, erreurs humaines, défaillances d'instrumentation). Les recommandations issues de cette évaluation ont été directement traduites en actions de gestion : installation de détecteurs de gaz supplémentaires, mise en place d'alarmes de pression redondantes, installation de vannes automatiques en parallèle, et mise à jour des procédures de réception des travaux.
- Sur l'unité UTGA : une étude combinant LOPA et arbres de défaillance a évalué la performance des barrières d'un ballon de gaz combustible. Les résultats ont permis d'optimiser les architectures des Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) et leurs intervalles de tests périodiques pour réduire leur probabilité de défaillance à la demande (PFD) et améliorer leur disponibilité.

7. Conclusion

Cette recherche a permis de mettre en évidence le rôle fondamental des barrières de sécurité dans la prévention et la maîtrise des risques majeurs liés au stockage des hydrocarbures. Une barrière de sécurité, qu'elle soit technique (cuvette de rétention, détecteur de gaz, système de déluge), humaine (formation, vigilance des opérateurs) ou organisationnelle (procédures, plans d'intervention), constitue un maillon essentiel pour empêcher qu'un accident ne se produise ou pour en limiter les conséquences.

L'évaluation des performances de ces barrières repose sur des méthodologies éprouvées telles que l'analyse des modes de défaillance (AMDE), les arbres de défaillance, la méthode LOPA et la détermination des niveaux SIL. Ces outils permettent de quantifier la fiabilité des barrières et d'identifier leurs faiblesses. Mais l'évaluation ne suffit pas : elle doit être intégrée dans une véritable **démarche de gestion continue**, incluant la maintenance préventive, les tests périodiques, la formation du personnel, la gestion des modifications et le retour d'expérience.

L'étude des installations de **SONATRACH à Hassi R'Mel** (CSTF, module MPP2, unité UTGA, centre de Haoud Berkaoui) a montré que cette approche intégrée est concrètement mise en œuvre. Les analyses de risques (HAZOP, LOPA, Bow-Tie) y sont régulièrement réalisées, et leurs résultats sont traduits en actions de gestion concrètes : renforcement des détections de gaz, installation de vannes automatiques, tests périodiques des soupapes et des systèmes de déluge, mise à jour des procédures, etc.

En définitive, la gestion des barrières de sécurité n'est pas une activité ponctuelle mais un **processus dynamique et itératif**. Elle exige une surveillance constante, une adaptation aux évolutions des installations et une amélioration continue basée sur le retour d'expérience. C'est à cette condition que les installations de stockage d'hydrocarbures peuvent maintenir leur niveau de sécurité, protéger les personnes et les biens, et prévenir les accidents majeurs.

Chapitre 2 : Évaluation des performances des barrières de sécurité

1. Introduction

L'évaluation des performances des barrières de sécurité est une activité essentielle du cycle de gestion des risques industriels. Selon la norme **CEI 61511**, une barrière de sécurité est un dispositif technique, organisationnel ou humain conçu pour prévenir l'occurrence d'un événement redouté (barrière de prévention) ou pour en limiter les conséquences (barrière de protection). La performance d'une barrière se mesure à sa capacité à remplir sa fonction au moment de sa sollicitation, ce qui se traduit par des indicateurs tels que la **Probabilité de Défaillance à la Demande (PFD)** , le **Facteur de Réduction du Risque (RRF)** et le **Niveau d'Intégrité de Sécurité (SIL)** .

Dans le contexte des industries extractives, et plus particulièrement des installations de traitement et de stockage d'hydrocarbures, la défaillance d'une barrière peut entraîner des conséquences catastrophiques : incendies, explosions (UVCE, BLEVE), pollutions environnementales majeures et pertes humaines. L'accidentologie internationale (Buncefield 2005, Texas City 2005, San Juanico 1984) et nationale (incidents documentés à Hassi R'mel) confirment que les causes profondes de ces accidents sont très souvent liées à des défaillances de barrières : maintenance insuffisante, corrosion non détectée, erreurs humaines, ou conception inadéquate des systèmes instrumentés de sécurité.

Ce chapitre a pour objectif d'appliquer une démarche structurée d'évaluation des performances des barrières de sécurité à un système représentatif choisi au sein du **gisement de Hassi R'mel (HRM)** , le plus grand gisement de gaz naturel d'Afrique, exploité par **SONATRACH** [9]. La démarche suit les étapes suivantes : description du système, identification des barrières existantes, évaluation de leurs performances selon des critères définis, interprétation des résultats, et formulation de recommandations d'amélioration.

2. Description générale du système choisi

Le système étudié dans le cadre de ce projet est un bac de stockage de gaz et d’hydrocarbures, tel que les condensats ou le gaz de pétrole liquéfié (GPL). Ce type d’installation joue un rôle essentiel dans les chaînes industrielles pétrolières et gazières, notamment dans les unités de production, de traitement et de distribution.

Ces réservoirs assurent la fonction de liaison entre la production et le transport, permettant de réguler les flux de matière et de garantir la continuité des opérations industrielles. Cependant, en raison de la nature inflammable, explosive et parfois cryogénique des produits stockés, ces installations présentent un niveau de risque élevé nécessitant des dispositifs de sécurité robustes et fiables.

2.1 Structure du bac de stockage de gaz

Le bac de stockage est conçu pour résister à des conditions extrêmes de pression et de température. Il est constitué d'une cuve métallique fabriquée en acier au carbone ou en acier inoxydable, selon la nature du gaz stocké et ses propriétés physico-chimiques.

La forme du réservoir est généralement :

- Cylindrique (réservoirs atmosphériques)
- Sphérique (réservoirs sous pression)

Pour les gaz liquéfiés ou cryogéniques, le réservoir est souvent à double paroi avec isolation thermique (vide ou matériaux isolants) afin de maintenir des températures très basses et réduire les pertes énergétiques.

La structure globale comprend également :

- Des fondations en béton armé
- Des supports mécaniques
- Des revêtements anticorrosion
- Des systèmes de ventilation et d'évents

2.2 Composition du système

Le système de bac de stockage est constitué d'un ensemble d'équipements interconnectés assurant le stockage, le contrôle et la sécurité du produit comme l'illustre le tableau 1.

Tableau 1. Les différents équipements du bac de stockage.

Élément	Description résumée
Corps principal (cuve)	Cuve cylindrique ou sphérique généralement fabriquée en acier au carbone. Pour les gaz corrosifs ou cryogéniques, utilisation d'acier inoxydable ou d'alliages spéciaux (nickel, aluminium).
Revêtements internes et externes	Revêtements anticorrosion pour protéger les surfaces internes et externes contre la corrosion et les conditions environnementales. Isolation thermique ajoutée pour le stockage du GNL/GPL.
Isolation thermique	Réduction des échanges thermiques pour le stockage cryogénique grâce à des matériaux isolants : mousse, laine minérale ou panneaux sous vide.
Équipements de sécurité	Soupapes de sécurité, capteurs de pression et température, disques de rupture, systèmes de détection de fuite et de lutte contre l'incendie.
Fondations et structure de support	Fondation en béton armé assurant la stabilité du réservoir, complétée par des structures métalliques de soutien.
Accessoires et tuyauterie	Vannes de régulation et d'isolement, tuyauteries adaptées, systèmes de remplissage et de vidange pour l'exploitation et la maintenance.

1.3. Fonctionnement du système

Les réservoirs de stockage de gaz sont implantés dans des zones spécifiques des usines, éloignées des unités de production et des zones à forte présence humaine afin de respecter les exigences de sécurité industrielle. Ils peuvent être installés en surface ou enterrés selon les besoins de protection et de maintenance. Des

digues de rétention sont souvent aménagées pour limiter les conséquences d'éventuelles fuites. Le fonctionnement du système de stockage repose sur l'acheminement du gaz depuis les unités de production vers les réservoirs à travers des canalisations adaptées. Avant le stockage, le gaz subit plusieurs traitements, tels que la filtration, la déshydratation ou la compression, afin d'assurer sa stabilité et de prévenir les risques techniques. Le gaz est ensuite conservé sous pression ou à basse température, dans des conditions strictement contrôlées, grâce à des capteurs de surveillance. Des dispositifs de sécurité, comme les soupapes, les alarmes et les systèmes de torchage, protègent les installations contre les surpressions et les accidents majeurs. Le soutirage et la distribution du gaz sont réalisés selon les besoins de consommation avec un contrôle du débit et d'éventuelles opérations de conditionnement. Les opérateurs assurent la supervision, la maintenance et la gestion des anomalies afin de garantir un fonctionnement fiable et sécurisé. Enfin, des systèmes de détection de fuite, d'arrêt d'urgence et de lutte contre l'incendie complètent la protection globale des installations. Cette figure présente le schéma de procédé et d'instrumentation (P&ID) du système de stockage de condensat. Elle cartographie l'emplacement exact des capteurs de niveau, de la vanne automatique d'arrêt d'urgence (UV 80/ ESD) et des deux fonctions instrumentées de sécurité (SIF 1 et SIF 2) conçues pour prévenir tout risque de débordement ou de perte de confinnement.

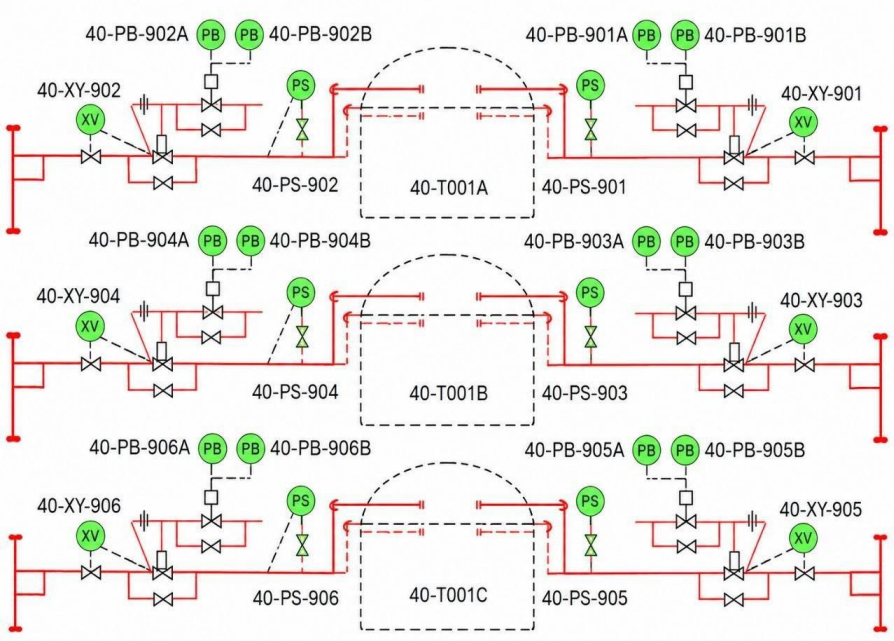


Figure 1. Schéma procédé (P&ID) et barrières de sécurité du bac S204.

3. Choix du système étudié selon la disponibilité des données

Le système de bacs de stockage de condensat S204 du MPP1 a été retenu sur la base de critères objectifs de disponibilité et de qualité des données (Tableau 2), essentiels à une évaluation crédible des performances des barrières de sécurité.

Tableau 2. Sources de données disponibles pour ce système.

Source	Contenu	Année	Fiabilité
Rapport HAZOP DNV (EP002715)	Analyse détaillée du Nœud 4 : 15 déviations, identification des causes, conséquences, barrières existantes et recommandations.	2010	Élevée (étude DNV, bureau international certifié)
Rapport Étude de Dangers CSTF (EP002718)	Données complémentaires sur les bacs de condensat au CSTF (mêmes types d'équipements), scénarios enveloppes, fréquences de défaillance génériques.	2010	Élevée
Handbook Failure Frequencies 2009	Données génériques de fréquences de défaillance pour les équipements (réservoirs atmosphériques, pompes, lignes).	2009	Élevée (référence internationale)
Étude LASTFIRE 1997	Statistiques sur les causes de défaillance des bacs de stockage atmosphériques (sur 33 906 bacs).	1997	Élevée (référence industrielle)
Rapports de maintenance internes	Données sur l'état des équipements, résultats d'inspections, historique des tests de barrières.	Variables	Moyenne (dépend de la traçabilité)

Ce tableau répertorie les documents techniques, études de dangers et manuels de maintenance exploités pour garantir la fiabilité et la traçabilité des données d'entrée. La disponibilité de ces données permet de mener une évaluation semi-quantitative robuste, en croisant les fréquences génériques de défaillance avec les conditions spécifiques du site (procédures, maintenance, âge des équipements) [10].

4. Identification des barrières de sécurité existantes dans le système

A. Définition générale des barrières de sécurité

Une barrière de sécurité est un dispositif technique, humain ou organisationnel conçu pour empêcher la survenue d'un accident (prévention) ou pour en limiter les conséquences (protection). Le principe de défense en profondeur consiste à multiplier ces couches de protection indépendantes afin qu'aucune défaillance unique ne conduise à un accident majeur. Dans le stockage d'hydrocarbures, où les risques sont élevés, ces barrières sont essentielles.

B. Typologie et catégories des barrières de sécurité

On distingue trois grandes familles de barrières, classées ici avec leurs sous-catégories et les équipements concrets du système S204 :

4.1. Les barrières techniques de sécurité

- **Passives** : Aucune action extérieure nécessaire, efficaces par leur présence.
    - **Cuvettes de rétention (BPr10)** : Contiennent le liquide en cas de fuite (capacité : 110 % du plus grand bac).
    - **Clapet anti-retour (BPr7)** : Empêche le retour de condensat vers les bacs.
- **Actives** : Nécessitent détection, traitement et actionnement.

- **Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS)** :
  - **SIF-1** : Niveau très haut (LAHH30) → fermeture automatique vanne alimentation (BPr1).
  - **SIF-2** : Niveau très bas (LALL30) → arrêt pompes P211 (BPr2).
- **Détection** : Détecteurs de gaz (BPr11), détecteurs de flamme (BPr12).
- **Protection mécanique** : Soupapes de respiration PSV957 (BPr6), ligne torche (BPr8).

4.2. Les barrières humaines de sécurité

Elles reposent sur la compétence et la vigilance des opérateurs. Leur défaillance (erreur humaine) est une cause majeure de risque identifiée par l'HAZOP.

- **Surveillance et intervention** : Réaction de l'opérateur en salle de contrôle aux alarmes (LAH29, PIAH60) pour corriger la dérive avant l'incident.
- **Respect des procédures terrain** : Application des check-lists avant/après maintenance (ex : retrait d'un platinage sur évent), rondes de surveillance.
- **Maintenance et inspection** : Qualité du diagnostic humain lors des inspections visuelles (corrosion, étanchéité).

4.3. Les barrières organisationnelles

Elles encadrent et structurent l'exploitation sécurisée.

- **Procédures opérationnelles (BP10)** : Encadrement strict du remplissage et de la vidange des bacs.
- **Analyses et purges (BP11, BP12)** : Contrôle quotidien de la TVR du condensat et purge de l'eau en fond de bac pour prévenir la corrosion.
- **Maintenance préventive (BP13, BP14)** : Programme d'inspection périodique des bacs et de maintenance des instruments.
- **Formation et intervention d'urgence (BP15, BPr14)** : Formation continue des opérateurs et mise en œuvre du Plan d'Opération Interne (POI) en cas d'accident.

L'identification des barrières de sécurité du système S204 a été réalisée à partir de l'analyse HAZOP du Nœud 4 (Rapport EP002715). Les barrières sont présentées ci-dessous, classées par type (prévention, protection) et par nature (instrumentée, mécanique, passive, active, organisationnelle).

4.4. Barrières de prévention

Les barrières de prévention visent à empêcher l'occurrence d'une déviation ou d'un événement redouté. Le tableau ci-dessous indique des exemples de barrières de prévention et leur fonction spécifique. Ce tableau liste l'ensemble des systèmes d'alarmes instrumentés et des procédures d'exploitation prévus pour intercepter les dérives opérationnelles avant l'accident.

Tableau 3. Exemple de barrières de prévention.

Code	Barrière	Type	Fonction	Défaillance ciblée
BP1	Limite switch vanne AV2102A/B avec report en salle de contrôle	Instrumentée	Détecter la position anormale (fermeture/ouverture) des vannes d'alimentation des bacs	Pas/assez de débit, Trop de débit
BP2	FIAL2004 alarme bas débit ligne de remplissage des bacs S204	Instrumentée	Alerter l'opérateur d'une baisse anormale du débit de remplissage	Pas assez de débit
BP3	LAH29 alarme niveau haut des bacs S204	Instrumentée	Alerter l'opérateur avant que le niveau n'atteigne un seuil critique	Trop de niveau, Trop de débit
BP4	LAL29 alarme bas niveau des bacs S204	Instrumentée	Alerter l'opérateur d'une baisse anormale de niveau	Pas assez de niveau, Pas assez de débit
BP5	PIAH60/61/62 alarme haute pression des bacs	Instrumentée	Détecter une surpression avant ouverture des PSV	Trop de pression, Trop de débit (vapeurs)
BP6	PIAL60/61/62 alarme basse pression des bacs	Instrumentée	Détecter une dépression avant collapse du bac	Pas assez de pression
BP7	TIAH1-15 alarme haute température sortie aéroréfrigérant E210	Instrumentée	Détecter un échauffement anormal du condensat	Trop de température
BP8	TAH2004 alarme haute température ligne d'alimentation des bacs S204	Instrumentée	Détecter l'arrivée de condensat chaud vers les bacs	Trop de température
BP9	TAH628 alarme haute température des bacs de stockage S204	Instrumentée	Détecter une élévation anormale de température dans le ciel gazeux du bac	Trop de température, Mélange/réaction
BP10	Procédure de remplissage/vidange du bac de stockage	Organisationnelle	Encadrer les opérations pour éviter les erreurs humaines (surremplissage, vidange excessive)	Toutes
BP11	Analyse quotidienne de la TVR du condensat produit	Organisationnelle	Vérifier que le condensat respecte les spécifications (TVR – Tension de Vapeur Reid)	Mélange/composition
BP12	Purge quotidienne de l'eau des bacs S204	Organisationnelle	Éliminer l'eau accumulée en fond de bac pour prévenir la corrosion	Mélange/composition, Corrosion
BP13	Inspection périodique des bacs S204 et du ballon V230	Maintenance	Détecter et suivre l'évolution de la corrosion, des défauts de structure	Corrosion, Fuite
BP14	Maintenance préventive des instruments	Maintenance	Assurer la fiabilité des capteurs, vannes et systèmes de contrôle	Défaillance des barrières instrumentées
BP15	Formation des opérateurs	Organisationnelle	Prévenir les erreurs humaines lors des manœuvres	Erreur humaine, Opération anormale
BP16	Respect des paramètres de fonctionnement du four H201/202	Organisationnelle	Maintenir la TVR du condensat dans les spécifications	Mélange/composition

4.5. Barrières de protection

Les barrières de protection visent à limiter les conséquences d'un événement redouté une fois celui-ci survenu. Le tableau ci-dessous représente des exemples de barrières de protection et leur fonction spécifique. Ce tableau recense les systèmes de sauvegarde mécaniques, d'isolement automatique et d'extinction d'incendie dédiés à la limitation des conséquences en cas de brèche ou de surremplissage.

Tableau 4. Exemple de barrières de protection.

Code	Barrière	Type	Fonction	Événement protégé
BPr1	LAHH30 alarme très haut niveau → ouverture UV66/71 des autres bacs	Instrumentée	En cas d'échec de BP3, répartir le surplus de condensat vers les autres bacs pour éviter le	Surremplissage

			surremplissage et le débordement	
BPr2	LALL30 alarme très bas niveau → arrêt pompe P211A/B/C	Instrumentée	Protéger les pompes contre la cavitation et le fonctionnement à sec	Cavitation pompe
BPr3	LAL59 ballon V230 → arrêt pompe P231A/B	Instrumentée	Protéger les pompes de soutirage du V230	Cavitation pompe
BPr4	LAHH59 → démarrage 2ème pompe P231A/B	Instrumentée	Éviter le débordement du ballon V230	Surremplissage V230
BPr5	LAHHH60 → ouverture UV88 vers bourbier	Instrumentée	Ultime protection du ballon V230, dirigé vers le bourbier pour éviter une mise à l'atmosphère directe	Surremplissage V230
BPr6	PSV957 de respiration du bac de stockage S204A (et équivalents S204B/C)	Mécanique	Évacuer la surpression (vapeurs) ou admettre de l'air (dépression) pour maintenir l'intégrité mécanique du bac	Surpression/Dépression bac
BPr7	Clapet anti-retour ligne refoulement pompes P211A/B/C	Mécanique	Empêcher le retour de condensat vers les bacs en cas d'arrêt des pompes	Retour de débit
BPr8	Ligne de banalisation vers torche BP	Mécanique	Évacuer les vapeurs en excès vers la torche	Surpression bac
BPr9	Minimum flow pompes P211A/B/C (UV72/75/77)	Mécanique	Assurer un débit minimal dans les pompes pour éviter l'échauffement et la cavitation	Cavitation pompe
BPr10	Cuvette de rétention individuelle des bacs	Passive	Contenir le condensat liquide en cas de fuite du bac ou de débordement	Fuite, Débordement
BPr11	Détecteurs de gaz au niveau des cuvettes de rétention et des pompes	Active	Détecter la présence de gaz inflammable pour alerter et permettre l'intervention	Fuite, Évaporation
BPr12	Détecteurs de flamme (UV-IR)	Active	Détecter un début d'incendie	Incendie
BPr13	Moyens d'extinction mobiles et fixes (extincteurs, poteaux incendie)	Active	Permettre la lutte contre un incendie	Incendie
BPr14	Plan d'Opération Interne (POI)	Organisationnelle	Organiser l'intervention d'urgence, l'évacuation et la communication	Tous accidents
BPr15	Zone ATEX	Conception	Limiter les sources d'inflammation potentielles dans la zone	Inflammation
BPr16	Clapet anti-retour sur la ligne de refoulement des pompes P212A/B	Mécanique	Empêcher le retour de condensat	Retour de débit

5. Analyse HAZOP du système choisi (Nœud 4 – Bacs de stockage condensat S204A/B/C)

Les différentes méthodes d'analyse des risques : comment s'y retrouver ? Il existe une multitude de façons d'analyser les risques dans les installations industrielles. Pour vous donner une idée de l'ordre, des chercheurs (Tixier et al., 2002) en ont recensé pas moins de 62 !

Pour y voir plus clair, on les divise généralement en deux grandes familles :

- Les approches **qualitatives** d'un côté.
- Les approches **quantitatives** de l'autre.

À l'intérieur de ces deux groupes, la méthode peut s'appuyer sur une logique **déterministe** (basée sur des causes et des faits précis), **probabiliste** (basée sur des statistiques), ou bien un mélange des deux. Le choix de la bonne méthode se fait souvent à l'aide de grilles d'évaluation, en fonction des données de départ dont vous disposez, de votre domaine d'application et des limites propres à chaque outil.

Pour faire simple et aller à l'essentiel, voici les méthodes les plus couramment utilisées sur le terrain

- **APR** (Analyse Préliminaire des Risques)
- **AMDE** (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets)
- **AMDEC** (La grande sœur de l'AMDE, qui intègre la notion de *Criticité*)
- **HAZOP** (Étude des dangers et d'exploitabilité)
- **WHAT IF ?** (Que se passerait-il si... ?)
- Les méthodes de **l'arbre des défaillances** [11]et de **l'arbre des événements** [11](ou des conséquences)
- La méthode du **nœud papillon**

On va choisir la méthode HAZOP car elle a été la méthode la plus appliquée au sein de l'entreprise SONATRACH DP.

5.1 Description de la méthode HAZOP

La méthode de type HAZOP est dédiée à l'analyse des risques des systèmes thermo-hydrauliques pour lesquels il est primordial de maîtriser des paramètres comme la pression, la température, le débit… [3]HAZOP

L'HAZOP ne considère plus les modes de défaillance mais les dérives potentielles (ou déviations) des principaux paramètres liés à l'exploitation de l'installation. Pour chaque partie constitutive du système examiné (ligne ou maille), la génération (conceptuelle) des dérives est effectuée de manière systématique par la conjonction de mots-clés comme par exemple « Pas de », « Plus de », « Moins de », « Trop de », et de paramètres associés au système étudié. Des paramètres couramment rencontrés concernent la température, la pression, le débit, la concentration, mais également le temps ou des opérations à effectuer comme illustré par le tableau 5. Ce tableau présente le canevas standardisé d'une feuille de travail HAZOP, structurant l'analyse depuis les causes d'une déviation jusqu'aux propositions d'amélioration [12].

Date : Ligne ou équipement :								
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
№	Mot clé	Paramètre	Causes	Conséquences	Détection	Sécurités existantes	Propositions d'amélioration	Observations

Tableau 5. Exemple de tableau pour l'HAZOP.

5.2 Échelle d'évaluation des risques

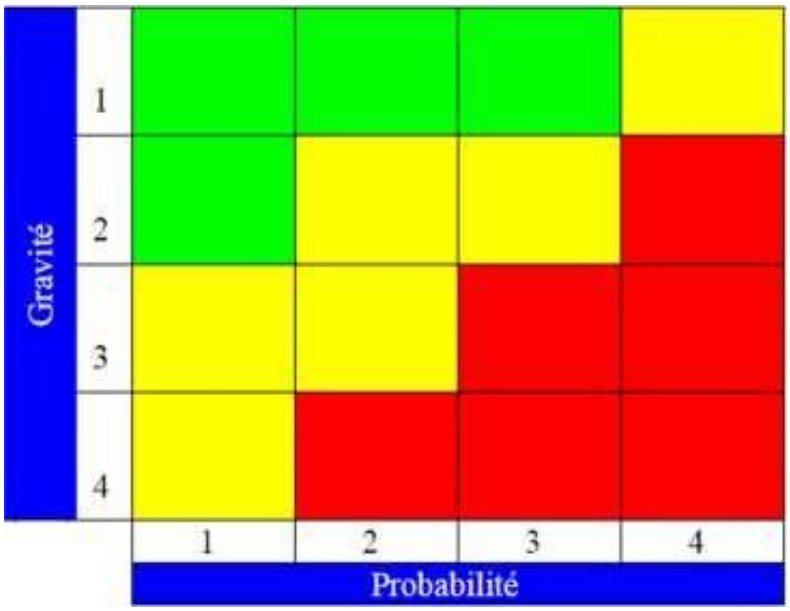
Après avoir identifié les risques et problèmes potentiels, une évaluation des risques est effectuée en déterminant la probabilité d'occurrence et la gravité des conséquences.

Cette évaluation est basée sur les principes de la matrice des risques. Cet outil a pour but de juger si les risques sont acceptables et de renforcer nos barrières de prévention et de protection.

5.3 Matrice des risques

La matrice des risques utilisée est celle définie par SONATRACH DP. Ce tableau fournit la structure bidimensionnelle de la matrice de criticité de l'entreprise, croisant graphiquement les axes de gravité et de probabilité. Les niveaux de gravité et de probabilité sont décrits en détail ci-dessous :

Tableau 6. Matrice de risques SONATRACH DP.



5.4 Échelle des gravités :

Ce tableau définit les quatre seuils de gravité de SONATRACH en quantifiant les impacts potentiels sur le personnel, l'environnement, le public et l'outil de production.

Tableau 7. Échelle des gravités.

Gravité	Personnel	Environnement	Public	Production/biens
G4	Plusieurs décès	Pollution hors limites de longue durée	Décès	Dommage importante tarrêt total de la roduction

G3	Incapacité Permanente ou 1 décès	Pollution interne non maîtrisée ou pollution hors limite maîtrisée	Blessures significatives	Dommage localisée arrêt partie d'unité
G2	Blessures significatives (AAA)	Pollution interne maîtrisée	Blessures mineures	Dommage mineurs et arrêt bref de la production
G1	Blessure mineures (ASA)	Mineure	Pas d'incidence	Pas de dommage, pas d'arrêt de production

5.5 Echelle des occurrences :

Ce tableau catégorise les fréquences d'occurrence des événements redoutés, allant de l'improbable au retour d'expérience annuel sur site.

Tableau 8. Échelle des Occurrences.

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

5.6 Niveaux de risque :

Ce tableau explicite les critères d'évaluation de la criticité finale d'un scénario en déterminant s'il est acceptable, tolérable sous condition (ALARP) ou inacceptable.

Tableau 9. Niveaux de risque.

Classification de risque	Description
	Acceptable
	ALARP
	Inacceptable

5.7. Analyse HAZOP (Nœud 4 – Bacs de stockage condensat S204A/B/C)

Les tableaux suivants présentent une synthèse structurée de l'analyse HAZOP du Nœud 4.

Tableau HAZOP – Déviation 1 : Pas / Pas assez de débit

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Vanne AV2102A fermée (perte d'utilité)	Baisse niveau bacs S204, cavitation pompes P211A/B/C, collapse des bacs, fuite de condensat, incendie/explosion	G4	P3	BP1, BP4, BP10, BP15	BPr2, BPr6, BPr9, BPr10, BPr11, BPr13	Inacceptable
Vanne AV2102B fermée	Baisse niveau ballon V230, cavitation pompes P231A/B, collapse V230	G4	P3	BP1, BP15	BPr3, BPr4	ALARP
Vanne UV80 bloquée fermée sortie bacs	Montée pression amont UV80, montée niveau bacs S204, surremplissage, défaillance bac, fuite, incendie/explosion	G4	P3	BP3, BP5, BP10	BPr2, BPr6, BPr8, BPr10	Inacceptable
Vanne FCV148 bloquée fermée (refoulement P231)	Montée niveau V230, entraînement condensat vers torche	G2	P2	BP14	BPr3, BPr4, BPr5	Acceptable
Vanne UV55 bac S204A bloquée fermée	Baisse niveau S204A, cavitation P211, collapse	G4	P2	BP1, BP4, BP10	BPr2, BPr6, BPr10	ALARP
Vanne UV51 bac S204A bloquée fermée	Montée niveau S204A, surremplissage, fuite, incendie/explosion	G4	P2	BP1, BP3, BP10	BPr1, BPr6, BPr8, BPr10	ALARP
Vanne UV53 aspiration P212A/B fermée	Cavitation P212A/B, défaillance pompe, fuite, incendie	G4	P1	BP1, BP15	BPr16, BPr11	ALARP
Erreur humaine : vanne manuelle refoulement P212 fermée	Surpression ligne, échauffement pompe, fuite, incendie	G4	P4	BP10, BP15	BPr16, Ligne mini-flow	Inacceptable
Erreur humaine : vanne fuel gaz pressurisation bacs fermée	Chute de pression, collapse du bac, fuite, incendie	G4	P4	BP6, BP10, BP15	BPr6	Inacceptable

Ce tableau formalise l'impact d'une baisse ou d'une perte totale de débit, générant des risques majeurs de cavitation de pompe ou de déformation (collapse) des bacs.

Tableau HAZOP – Déviation 2 : Trop de débit

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Vanne LV20 bloquée ouverte	Montée niveau et pression S204, surremplissage, défaillance bac, fuite, incendie/explosion	G4	P3	BP3, BP5, BP10	BPr1, BPr6, BPr8, BPr10, BPr11	Inacceptable
Vanne UV80 bloquée ouverte	Baisse niveau S204, cavitation P211, fuite, incendie	G4	P3	BP1, BP4, BP14	BPr2, BPr9, BPr10, BPr11	Inacceptable
Vanne manuelle fuel gaz grande ouverte	Augmentation pression S204, défaillance bac (surpression), fuite, incendie	G3	P3	BP5, BP10, BP15	BPr6, BPr8	ALARP
Vanne FCV148 bloquée ouverte	Baisse niveau V230, cavitation P231, fuite	G4	P3	BP14	BPr3, BPr11	ALARP

Tableau HAZOP – Déviation 4 : Trop de niveau

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Voir causes "Trop de débit" et "Pas assez de débit" (vanne sortie fermée)	Surremplissage, débordement, fuite, incendie/explosion	G4	P3	BP3, BP5, BP10	BPr1, BPr6, BPr8, BPr10, BPr11, BPr13	Inacceptable

Tableau HAZOP – Déviation 5 : Trop de température

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Envoi de condensat trop chaud depuis T202 (arrêt	Défaillance bac (haute T°), montée en pression par	G4	P3	BP7, BP8, BP9, BP14	BPr6, BPr8, BPr10,	Inacceptable

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
aéroréfrigérant E210)	vaporisation excessive, fuite, incendie/explosion				BPr11, BPr15	

Tableau HAZOP – Déviation 6 : Mélange / Réaction / Viscosité / Composition

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
TVR du condensat d'alimentation trop élevée	Montée en pression S204, cavitation P211, fuite, incendie/explosion	G4	P1	BP11, BP16	BPr6, BPr8, BPr10	ALARP
Entraînement d'eau avec le condensat dans le bac S204	Corrosion du fond du bac, fuite de condensat, pollution, incendie/explosion	G4	P3	BP12, BP13	BPr10, BPr11, BPr13	Inacceptable

Tableau HAZOP – Déviation 7 : Opération anormale

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Joint plein (platinage) sortie gaz S204 maintenu après maintenance (remplissage)	Montée en pression, éclatement du bac, fuite, incendie/explosion	G4	P3	BP10, BP15, Check-list	BPr6, BPr10, BPr11	Inacceptable
Joint plein sortie gaz S204 maintenu (vidange)	Dépression, collapse du bac, fuite, incendie	G4	P3	BP10, BP15, Check-list	BPr6, BPr10, BPr11	Inacceptable
Vanne d'échantillonnage laissée ouverte	Fuite de condensat, incendie, pollution	G3	P4	BP10, BP15	BPr10, BPr11, BPr13	Inacceptable

Cause	Conséquences	G	P	Barrières de prévention	Barrières de protection	Risque initial
Présence d'atmosphère explosible lors de maintenance d'un bac	Explosion interne du bac, éclatement, projection de missiles, fatalités	G4	P3	BP10, Procédure ventilation, Permis de feu, Explosimètre	BPr13, POI	Inacceptable

5.8. Synthèse des résultats de l'HAZOP

L'étude HAZOP révèle un nombre important de scénarios à risque **inacceptable**, principalement liés :

- Aux erreurs humaines (vannes manuelles, oublis de platinage après maintenance).
- Aux défaillances de vannes automatiques (AV, UV) entraînant des montées en niveau/pression.
- À l'entraînement d'eau favorisant la corrosion et la fuite.
- À la présence d'atmosphère explosible dans le ciel gazeux du bac lors des interventions.

Ces scénarios justifient pleinement une évaluation approfondie des performances des barrières existantes et la définition d'un plan d'amélioration [10]. Cette illustration graphique synthétise visuellement les conclusions issues des tableaux d'analyse HAZOP. Elle met en évidence la répartition des scénarios identifiés et cible graphiquement le grand nombre de situations jugées initialement "Inacceptables" avant l'application ou le renforcement des recommandations de sécurité.

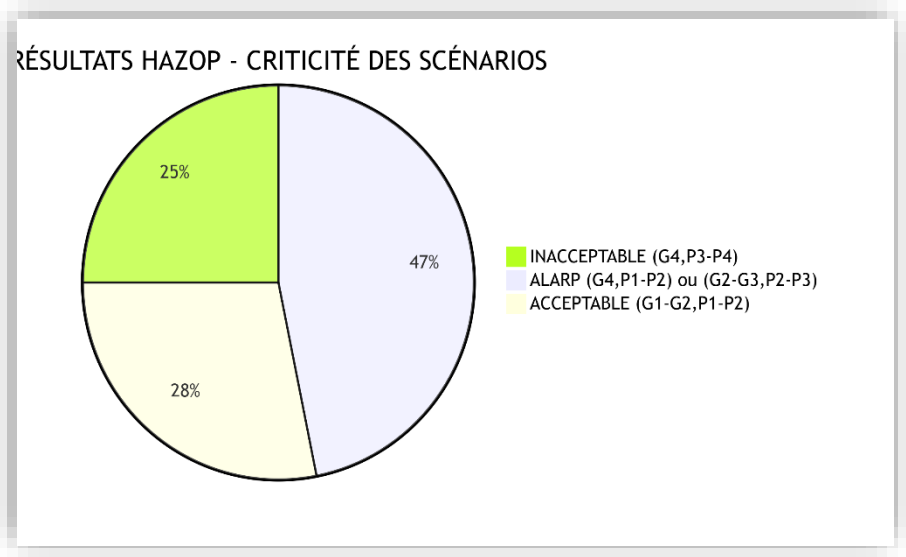


Figure 1. Résultats des tableaux HAZOP.

6. Modélisation par le diagramme de nœud papillon

Le nœud papillon est construit pour l'**Événement Redouté Central (ERC)** le plus critique issu de l'HAZOP : **la perte de confinement du bac S204A suite à un surremplissage et une montée en pression** (scénario combinant les déviations "Trop de débit" et "Trop de niveau" avec une défaillance des barrières de prévention).

6.1. Définition de l'Événement redouté central (ERC)

L'ERC est défini comme suit : "Émission de condensat liquide et de vapeurs inflammables à l'extérieur du bac S204A, suite à un débordement par les évents ou une rupture de la robe du bac, consécutif à un surremplissage non maîtrisé".

Le condensat est un mélange d'hydrocarbures légers (C5+) dont la TVR (Tension de Vapeur Reid) est normalement maintenue basse. En cas de surremplissage, du liquide peut déborder dans la cuvette de rétention, formant une flaque. Les vapeurs peuvent également s'accumuler et, en présence d'une source d'inflammation, conduire à un incendie (feu de cuvette) ou à une explosion (UVCE).

6.2. Partie gauche – Arbre de défaillance (causes)

Le tableau ci-dessous synthétise la partie gauche du Nœud Papillon, mesurant la fréquence des menaces amont et l'efficacité des barrières pour éviter que l'accident ne survienne. Les causes menant à l'ERC sont identifiées à partir de l'HAZOP :

Tableau 10. Causes principales menant à l'ERC.

Code	Cause racine	Fréquence estimée	Barrières de prévention
C1	Défaillance mécanique de la vanne de régulation LV20 (bloquée ouverte)	1.0×10^{-1}/an	BP14 (maintenance préventive), BP1 (report de position)
C2	Défaillance simultanée de la vanne de sortie UV55 (bloquée fermée)	1.0×10^{-2}/an	BP1, BP14
C3	Erreur opérateur : durée de remplissage excessive (non-respect procédure)	1.0×10^{-2}/an	BP10, BP15
C4	Défaillance du système de contrôle de niveau (capteur LIAH défaillant)	5.0×10^{-2}/an	BP14, BP5 (redondance jauge)
C5	Non-détection de l'alarme LAH29 (défaillance ou acquittement sans action)	1.0×10^{-3}/demande	BP14, BP15
C6	Joint plein (platinage) maintenu sur l'évent de respiration après maintenance	1.0×10^{-2}/an (lors des maintenances)	BP10, Check-list de levée de platinage, BP15

Combinaison critique menant à l'ERC :

Le Surremplissage survient si une cause de remplissage excessif (C1 ou C3) ET une cause d'incapacité à évacuer le surplus (C2) ET une défaillance des barrières de détection (C4 ou C5) se produisent simultanément. La probabilité combinée est estimée par la méthode des coupes minimales.

6.3. Partie droite – Arbre d'événements (conséquences)

Le tableau 11 détaille la partie droite du Nœud Papillon, analysant comment les barrières de protection limitent la gravité des conséquences après la défaillance initiale. À partir de l'ERC, l'enchaînement des événements dépend du succès ou de l'échec des barrières de protection :

Tableau 11. Enchaînement des événements sur l'AdE.

Étape	Barrière de protection	Succès (Probabilité)	Échec (Probabilité)
1. Contention de la fuite	Cuvette de rétention (BPr10)	0.99 (contient le liquide)	0.01 (débordement cuvette)
2. Détection de la fuite	Détecteurs de gaz (BPr11)	0.95	0.05
3. Isolement du bac	Fermeture automatique vanne d'alimentation sur LAHH30 (BPr1)	0.99	0.01
4. Évacuation de la surpression	Ligne de banalisation vers torche (BPr8) et PSV957 (BPr6)	0.99	0.01
5. Inflammation	Contrôle des sources d'inflammation (Zone ATEX, BPr15)	Pas d'inflammation : 0.9	Inflammation immédiate : 0.05 Inflammation retardée : 0.05
6. Intervention	Moyens d'extinction (BPr13), POI (BPr14)	Extinction rapide : 0.9	Feu non maîtrisé : 0.1

Scénarios de conséquences issus de l'arbre d'événements :

Tableau 12 Récapitule les trajectoires accidentelles post-perte de confinement (S1 à S5), en associant à chaque séquence sa probabilité annuelle, sa nature physique (incendie, UVCE) et sa criticité.

Tableau 12. Scénarios de conséquences sur l'AdE.

Scénario	Chemin dans l'arbre	Fréquence estimée (/an)	Conséquence	Criticité (G × P)
S1	Remplissage excessif → LAHH30 ferme alimentation → Pas d'inflammation	5.0×10^{-3}	Incident maîtrisé sans conséquence HSE	Acceptable
S2	Surremplissage → Débordement cuvette → Détection gaz → Isolement → Pas d'inflammation	2.0×10^{-4}	Épandage confiné, pollution mineure	ALARP (G2, P2)
S3	Surremplissage → Débordement → Inflammation immédiate → Feu de cuvette → Extinction rapide	1.0×10^{-4}	Incendie confiné, blessures possibles (G3, P2)	ALARP
S4	Surremplissage → Rupture robe bac → Inflammation retardée → UVCE	5.0×10^{-6}	Explosion majeure, victimes multiples (G4, P1)	ALARP
S5	Surremplissage → Échec de toutes les barrières → Feu de cuvette non maîtrisé → Boilover possible si présence d'eau	1.0×10^{-6}	Catastrophe majeure (G4, P1)	ALARP

6.4. Diagramme simplifié du nœud papillon[13]

La figure ci-dessous représente le nœud papillon proposé basé sur les résultats de la méthode HAZOP. Il s'agit de la représentation systémique globale du scénario d'accident central choisi (la perte de confinement

du bac S204A par surremplissage ou surpression). La figure 3 montre, sur la partie gauche, l'arbre des défaillances reliant les causes amont à l'événement central avec leurs barrières de prévention, et sur la partie droite, l'arbre des événements reliant cet événement central aux conséquences majeures potentielles avec les barrières de protection correspondantes.

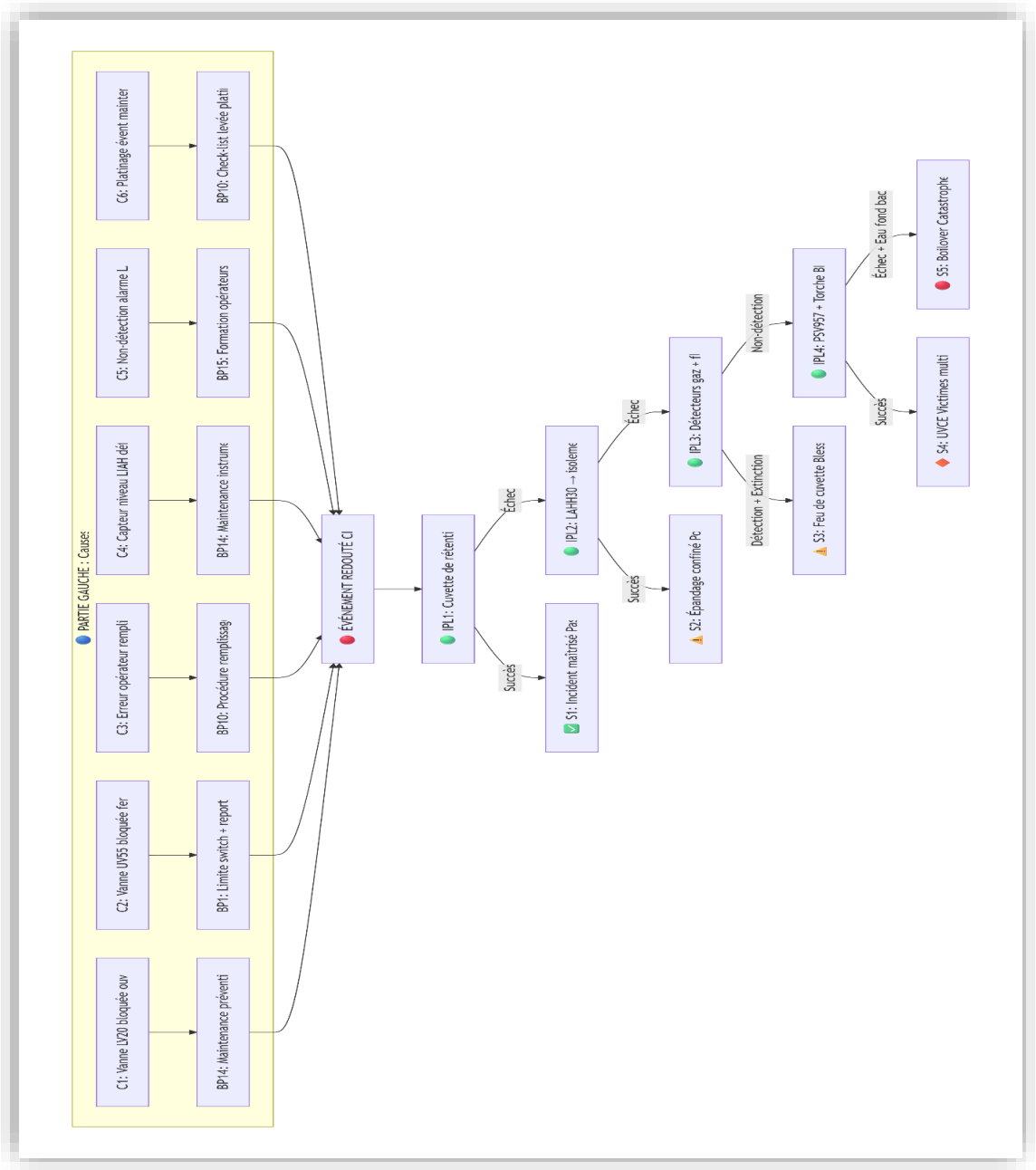


Figure 2. Diagramme de Noeud Papillon du bac de stockage.

7. Évolution des accidents liés à la défaillance des barrières de sécurité

Cette section s'appuie sur l'accidentologie pour démontrer l'importance cruciale de la performance des barrières de sécurité dans les systèmes de stockage de condensat.

7.1. Statistiques issues de l'étude LASTFIRE (Large Atmospheric Storage Tank Fires)

L'étude LASTFIRE, menée en 1997 sur un échantillon de **33 906 bacs de stockage répartis dans le monde**, fournit des statistiques pertinentes pour le système étudié.

Causes de défaillance (fuites hors du bac) selon LASTFIRE :

Ce tableau présente la répartition statistique des causes historiques d'incendies et de défaillances sur les bacs de stockage à l'échelle internationale. Il met en évidence le poids des facteurs initiateurs (tels que la foudre, les défauts de maintenance, la corrosion ou les erreurs d'exploitation), servant ainsi de base factuelle pour justifier le choix des scénarios critiques étudiés dans le document.

Tableau 13. Causes de défaillance du bac selon LASTFIRE.

Cause	Contribution (%)
Fuite de ligne, bride, vanne	21 %
Corrosion du fond	20 %
Surremplissage	19 %
Défaillance du drain	17 %
Fuite au mixer	12 %
Corrosion de la plaque annulaire de fond	5 %
Défaillance du serpentin de vapeur	4 %
Défaillance des pieds du toit flottant	1 %
Inconnues	28 %

Ce graphique illustre la chronologie et l'enchaînement dynamique qui mènent à un sinistre. Il montre visuellement comment la défaillance successive ou simultanée de plusieurs lignes de défense (techniques, humaines ou organisationnelles) crée des brèches de sécurité, permettant ainsi à une simple anomalie de procédé d'évoluer de manière incontrôlée jusqu'à l'accident majeur

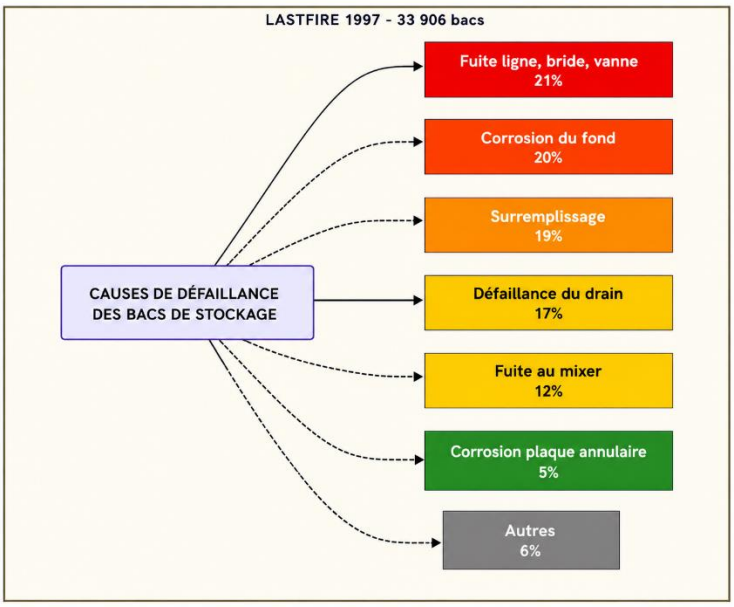


Figure 3. Évolution des accidents liés à la défaillance des barrières

Analyse pour le système S204 :

Le **surremplissage** (19 %) et la **corrosion du fond** (20 %) sont les deux causes majoritaires de défaillance. Ces deux causes ont été identifiées comme critiques dans l'HAZOP du Nœud 4 (déviations "Trop de niveau", "Trop de débit" et "Entraînement d'eau").

7.2. Accidentologie interne – Région de Hassi R'mel

La casuistique interne de la région de Hassi R'mel, portant sur **26 accidents impliquant des substances dangereuses depuis 1991**, révèle les tendances suivantes :

Répartition des accidents par substance :

Ce tableau présente le bilan historique local des accidents industriels recensés dans la région de Hassi R'mel, classés selon la nature chimique de la matière libérée. Il met statistiquement en évidence que le brut et le condensat représentent à eux seuls 50 % des événements (13 cas sur 26), validant ainsi la haute priorité et la criticité de l'étude de sécurité menée sur les bacs S204.

Tableau 14. Répartition des accidents par substance.

Substance	Nombre	Pourcentage
Brut / Condensat	13	50 %
Gaz	10	38 %
GPL	3	12 %

Causes principales des accidents :

Ce tableau analyse l'origine des sinistres recensés à Hassi R'mel en classant les causes profondes. Il met en évidence que les défaillances d'équipements (42 %) et les dérives opératoires (27 %) sont les facteurs déclencheurs majoritaires, confirmant la nécessité de fiabiliser les barrières de sécurité techniques et humaines.

Tableau 15. Causes principales des accidents.

Cause	Pourcentage
Défaillance d'équipement	42 %
Dérive opératoire	27 %
Maintenance / Travaux	12 %
Corrosion	8 %
Autres	11 %

Conséquences des accidents :

Ce tableau récapitule la gravité des impacts générés par l'historique des sinistres à Hassi R'mel, classés par type de dommages (humains, matériels ou environnementaux). Il met en évidence que si les accidents majeurs à létalité multiple restent statistiquement rares sur le site, la récurrence des pertes économiques et des arrêts de production justifie pleinement l'évaluation rigoureuse et le renforcement des barrières de sécurité instrumentées.

Tableau 16. Conséquences des accidents.

Conséquence	Pourcentage
Pollution environnementale	58 %
Incendie	38 %

Fatalité (1 cas en 1991)	4 %

Analyse :

- Le **condensat** est impliqué dans 50 % des accidents, confirmant la criticité du système S204.
- La **défaillance d'équipement** (42 %) et les **dérives opératoires** (27 %) sont les causes profondes majoritaires. Ces deux causes correspondent parfaitement aux scénarios identifiés dans l'HAZOP (vannes bloquées, erreurs humaines de remplissage, capteurs défaillants).
- L'absence d'explosion majeure ayant entraîné des décès multiples depuis 1991 est un indicateur encourageant, mais ne doit pas masquer le potentiel de danger (cf. scénarios UVCE et boilover modélisés dans le nœud papillon).

Aucun accident de type boilover ou UVCE n'a été enregistré sur le site de Hassi R'mel, mais la présence d'eau dans les bacs de condensat (scénario identifié dans l'HAZOP) et la possibilité d'un feu de cuvette prolongé rendent ce phénomène physiquement possible, bien que de probabilité très faible.

7.3. Conclusion sur l'accidentologie

L'accidentologie interne et externe confirme que les barrières de sécurité du système S204 sont sollicitées régulièrement (incidents de pollution, débuts d'incendie), mais qu'elles ont globalement rempli leur rôle jusqu'à présent. Cependant, les causes profondes de défaillance (corrosion, erreur humaine, défaillance d'équipement) restent présentes et nécessitent une évaluation continue des performances des barrières pour éviter qu'un scénario catastrophe ne se produise à l'avenir [14].

8. Évaluation des performances des barrières de sécurité du système choisi selon certains critères

L'évaluation de la performance des barrières de sécurité du système des bacs S204 s'appuie sur une méthodologie qualitative croisée, articulée autour des dérives identifiées par l'HAZOP et de leur structuration systémique dans le diagramme en Nœud Papillon. Cette évaluation est réalisée selon trois critères fondamentaux de sécurité industrielle : l'indépendance, l'adéquation (spécificité) et la robustesse (vis-à-vis du facteur humain).

- 1. Le critère d'indépendance : En transposant les scénarios de l'HAZOP sur les branches du Nœud Papillon, on valide que les lignes de défense sont architecturalement indépendantes pour les dérives critiques (comme le surremplissage). Par exemple, l'alarme de niveau haut (LAH29), qui requiert une action humaine en salle de contrôle, fonctionne de manière totalement autonome vis-à-vis de la Fonction Instrumentée de Sécurité (SIF-1 / LAHH30) qui déclenche l'arrêt d'urgence automatique. Cette indépendance garantit qu'un mode de défaillance unique ne peut pas neutraliser l'ensemble des défenses.
- 2. Le critère d'adéquation et de spécificité : Ce critère vérifie que chaque cause ou conséquence répertoriée possède une barrière directement dimensionnée pour la neutraliser. L'HAZOP montre une parfaite adéquation des barrières mécaniques : face au risque de collapse ou de surpression

thermique, la soupape de respiration (PSV957) offre une réponse technique passive et immédiate. De même, pour le scénario de perte de confinement, la cuvette de rétention (BPr10) est spécifiquement dimensionnée pour contenir le volume maximal du condensat liquide.

- 3. Le critère de robustesse face au facteur humain : Le couplage des deux méthodes met en lumière les limites de performance du système face aux interventions humaines. Alors que les barrières techniques physiques ou automatisées présentent une robustesse élevée, les barrières organisationnelles définies dans l'arbre des causes (procédures de maintenance, check-lists de platinage) sont jugées sensibles et vulnérables aux erreurs opératoires. De plus, l'absence de coupure automatique sur critère de température haute fait reposer la sécurité thermique du bac uniquement sur la vigilance humaine et la performance mécanique des soupapes.

En synthèse, l'analyse de performance par l'HAZOP et le Nœud Papillon démontre que le système S204 dispose d'une excellente indépendance technique et d'une saine adéquation de ses barrières physiques. Toutefois, la performance globale reste fortement tributaire de la gestion des facteurs humains, ce qui justifie les recommandations d'amélioration (Section 10) visant à automatiser et fiabiliser davantage les boucles de sécurité.[6]

9. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats est réalisée en positionnant les scénarios résiduels sur la **grille de criticité (Gravité × Probabilité)** utilisée par SONATRACH.

Rappel de la grille de criticité SONATRACH DP :

Ce tableau présente la matrice réglementaire d'évaluation des risques de l'entreprise, croisant les classes de fréquence et les niveaux de gravité. Il sert de référentiel officiel pour classifier la tolérabilité des scénarios étudiés et définir le seuil à partir duquel l'application de nouvelles barrières devient obligatoire pour ramener le risque à un niveau acceptable

Tableau 17. Rappel de la grille de criticité SONATRACH DP

Gravité \ Probabilité	P1 ($< 10^{-4}$/an)	P2 ($10^{-4} – 10^{-2}$/an)	P3 ($10^{-2} – 10^{-1}$/an)	P4 ($> 10^{-1}$/an)
G4 (Plusieurs décès)	ALARP	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable
G3 (Incapacité/Décès)	ALARP	ALARP	Inacceptable	Inacceptable
G2 (Blessures significatives)	Acceptable	ALARP	ALARP	Inacceptable
G1 (Blessures mineures)	Acceptable	Acceptable	Acceptable	ALARP

Positionnement des scénarios résiduels du nœud papillon sur la grille :

Ce tableau cartographie l'emplacement final des scénarios d'accident après la prise en compte et l'évaluation des barrières de sécurité actuelles. Il permet de vérifier visuellement si le niveau de risque résiduel a été réduit et s'il se situe désormais dans une zone acceptable ou s'il nécessite encore des actions correctives.

Tableau 18. Positionnement des scénarios résiduels du nœud papillon sur la grille.

Scénario	Gravité	Probabilité	Criticité

S1 (Incident maîtrisé)	G1	P3	Acceptable
S2 (Épandage confiné)	G2	P2	ALARP
S3 (Feu de cuvette)	G3	P2	ALARP
S4 (UVCE)	G4	P1	ALARP
S5 (Boilover)	G4	P1	ALARP

Interprétation :

- Aucun scénario n'est classé **Inacceptable** après prise en compte des barrières de protection existantes, ce qui signifie que le système de barrières, dans son ensemble, remplit sa fonction de réduction du risque.
- Les scénarios les plus graves (G4 : UVCE, Boilover) sont ramenés à une probabilité P1 (improbable), ce qui les classe en zone **ALARP**. Conformément au principe ALARP (As Low As Reasonably Practicable), des mesures d'amélioration complémentaires doivent être recherchées si leur coût n'est pas disproportionné par rapport au bénéfice attendu en termes de réduction du risque.
- Le scénario S3 (feu de cuvette) reste en zone ALARP avec une probabilité P2. Cela justifie pleinement les recommandations d'amélioration proposées.
- L'absence de scénario en zone rouge (Inacceptable) ne doit pas conduire à la complaisance. L'analyse LOPA a montré que la robustesse de la situation dépend crucialement du maintien en condition opérationnelle de toutes les couches de protection. Un défaut de maintenance sur une seule barrière peut dégrader significativement le profil de risque.

Principales barrières contribuant au plus fort taux de réduction du risque :

1. **SIF-1 (LAHH30 → isolement automatique)** : facteur de réduction du risque de 190.
2. **Cuvette de rétention** : facteur de réduction du risque de 100.
3. **POI (Plan d'Opération Interne) et moyens d'extinction** : facteur de réduction du risque de 100 [5].

10. Recommandations d'amélioration

Sur la base de l'évaluation des performances des barrières de sécurité réalisée sur le système des bacs de stockage de condensat S204 du MPP1, les recommandations suivantes sont formulées pour améliorer le niveau de sécurité.

10.1 Recommandations techniques (instrumentées et mécaniques)

10.1.1 Recommandation R1 : Améliorer la fiabilité de la mesure de niveau.

- Constat : L'alarme simple LAH29 a une PFD élevée (facteur humain).

- Action : Installer une architecture de vote **2oo3** (2 sur 3) pour les capteurs de niveau critiques des bacs S204. Ceci permettrait d'atteindre un niveau **SIL 3** pour la SIF-1, réduisant la probabilité de défaillance à la demande d'un facteur 10.
- Référence : Norme CEI 61511.

10.1.2 Recommandation R2 : Réduire l'intervalle de test des vannes automatiques.

- Constat : Le PFDavg des vannes ESDV (UV55, etc.) est pénalisé par un intervalle de test d'un an.
- Action : Mettre en place une procédure de **test partiel (partial stroke testing)** semestrielle pour les vannes critiques, sans interrompre la production.
- Bénéfice : Réduction du PFDavg d'un facteur 2.

10.1.3 Recommandation R3 : Installer un clapet anti-retour sur la ligne d'alimentation en condensat.

- Constat : L'HAZOP a identifié un risque de retour de condensat depuis le CSTF vers les bacs S204 (Déviation 2 : Retour de débit).
- Action : Étudier la possibilité d'installer un clapet anti-retour sur la ligne de refoulement des pompes P211A/B/C en aval de la vanne UV80 (recommandation HAZOP n°103).

10.2 Recommandations organisationnelles et humaines

10.2.1 Recommandation R4 : Renforcer la formation des opérateurs.

- Constat : Les erreurs humaines (vannes manuelles, oubli de platinage) ressortent comme une cause significative de risque inacceptable.
- Action : Organiser des sessions de formation et de sensibilisation spécifiques sur les risques de surremplissage, l'importance des check-lists avant/après maintenance, et la conduite à tenir face aux alarmes critiques (LAH, LAHH).

10.2.2 Recommandation R5 : Intégrer la gestion du retour d'expérience.

- Constat : La base de données d'incidents internes montre une récurrence de causes similaires (corrosion, erreur humaine).
- Action : Mettre en place un système formalisé de partage des retours d'expérience (REX) entre les différents modules de traitement (MPP1, MPP3, MPP4) et le CSTF, pour capitaliser sur les enseignements des incidents et presque-accidents.

10.3 Recommandations de maintenance et inspection

10.3.1 Recommandation R6 : Programme d'inspection basé sur le risque (RBI).

- Constat : La corrosion du fond de bac est la 2ème cause mondiale de défaillance (LASTFIRE) et est présente dans l'HAZOP (entraînement d'eau).
- Action : Développer un programme d'inspection RBI pour les bacs S204, avec une fréquence d'inspection interne (mesures d'épaisseur par ultrasons, CND) adaptée à la criticité et à l'historique de corrosion de chaque bac.

10.3.2 Recommandation R7 : Vérification périodique des soupapes de respiration.

- Constat : Les PSV957 et évents sont la dernière barrière contre la suppression/dépression. Leur défaillance (platinage oublié) a été identifiée comme cause possible d'éclatement/implosion.
- Action : Mettre en place un contrôle visuel mensuel et un test de tarage annuel des PSV de respiration, avec une consignation stricte des platinages.

10.3.3 Recommandation R8 : Assurer le nettoyage régulier et périodique des fonds des bacs.

- Constat : L'eau et les boues accumulées favorisent la corrosion.
- Action : Programmer des nettoyages de fond de bac basés sur l'historique de décantation d'eau de chaque bac, et renforcer les purges quotidiennes.

10.4 Recommandations générales issues de l'Étude de Dangers (applicables au CSTF et à l'ensemble du site)

10.4.1 Recommandation R9 : S'assurer que les dimensions de la cuvette de rétention sont suffisantes pour contenir la capacité totale du bac de stockage. Dans le cas contraire, étudier la mise en place d'un système de protection équivalent (fosse déportée).

10.4.2 Recommandation R10 : Vérifier que la salle de contrôle est bien fireproof et blastproof afin d'en protéger les occupants et le cas échéant, prendre les mesures nécessaires afin de la mettre à niveau.

10.4.3 Recommandation R11 : Étudier la pertinence d'enrichir certaines zones critiques en détecteurs de gaz et d'incendie, et de coupler ces détecteurs avec des moyens d'intervention automatiques (type déluge, ESD).

Cette figure sous forme de diagramme ou de logigramme organise visuellement le plan d'action préconisé en fin de chapitre. Elle sépare de manière logique les recommandations techniques instrumentées et mécaniques (comme l'amélioration de la fiabilité des capteurs de niveau ou la réduction des intervalles de test) des recommandations d'ordre organisationnel et opérationnel pour le site de Hassi R'mel.

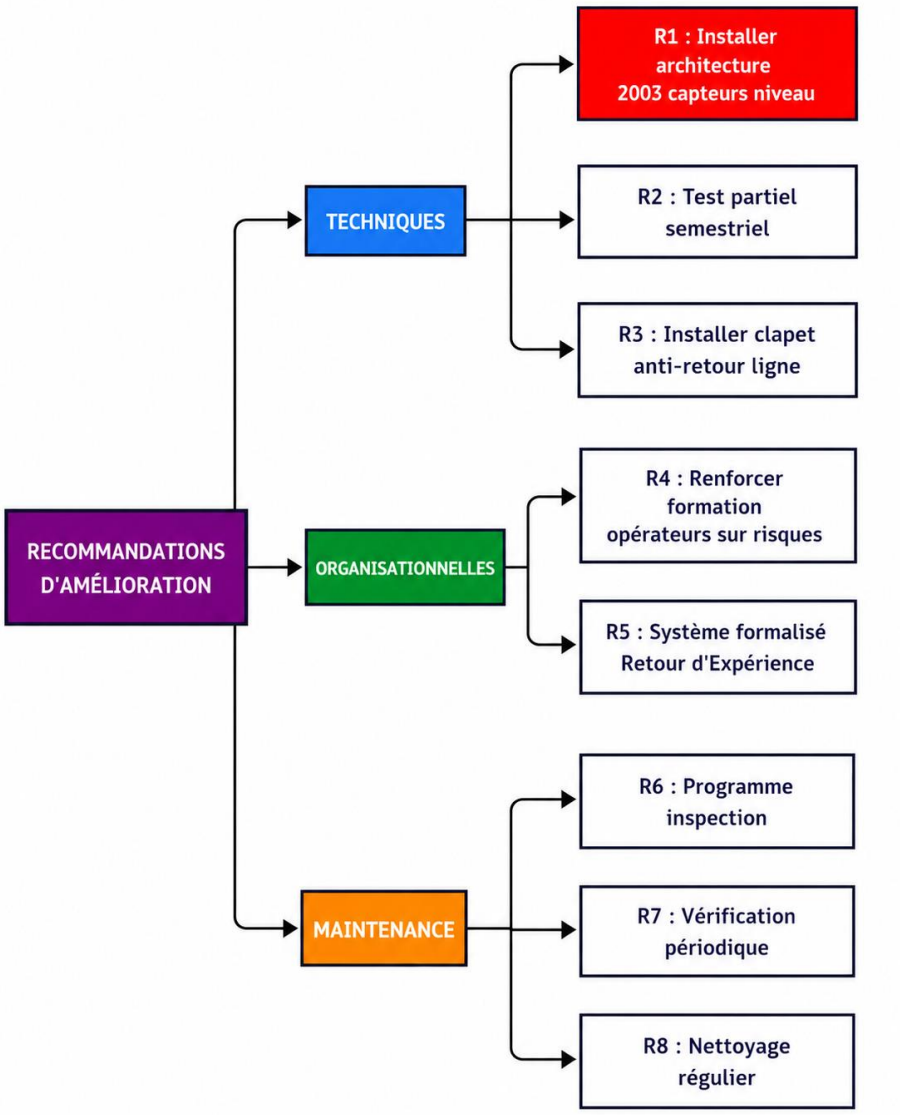


Figure 4. Recommandations d'amélioration.

11. Conclusion

Ce chapitre a présenté une évaluation complète des performances des barrières de sécurité pour le système de stockage de condensat du MPP1 à Hassi R'mel.

L'analyse des risques (HAZOP) a permis d'identifier les événements redoutés, principalement liés au surremplissage, à la corrosion et aux erreurs humaines. La modélisation par nœud papillon a structuré les scénarios d'accident et positionné les barrières de prévention et de protection. L'évaluation quantitative (SIL, LOPA) a montré que les barrières instrumentées atteignent un niveau SIL 2 satisfaisant, et que la combinaison des couches de protection (alarme, SIF, rétention, POI) ramène le risque à un niveau ALARP, bien en deçà des seuils d'acceptabilité.

Cependant, l'accidentologie (LASTFIRE, incidents internes HRM) rappelle que la corrosion, la défaillance d'équipement et l'erreur humaine restent des causes de défaillance récurrentes. La performance des barrières

n'est jamais acquise définitivement ; elle dépend d'une maintenance rigoureuse, de tests périodiques, d'une formation continue du personnel et d'une gestion active du retour d'expérience.

Les recommandations formulées, portant notamment sur l'amélioration de la fiabilité des capteurs de niveau, la réduction des intervalles de test, et le renforcement des procédures de maintenance, constituent des axes d'amélioration concrets et proportionnés pour maintenir et accroître le niveau de sécurité de cette installation stratégique pour SONATRACH.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié les risques liés aux bacs de stockage de condensat S204A/B/C au niveau de l'unité MPP1 de Hassi R'Mel. L'objectif principal était d'identifier les dangers potentiels et d'évaluer l'efficacité des barrières de sécurité mises en place pour prévenir les accidents industriels.

L'application de la méthode HAZOP a permis d'identifier plusieurs scénarios dangereux, notamment le surremplissage, la surpression, la corrosion et les erreurs humaines. L'étude a également montré que les barrières techniques, humaines et organisationnelles jouent un rôle essentiel dans la réduction des risques et la protection des personnes, des installations et de l'environnement.

Les résultats obtenus montrent que certaines situations présentent encore un niveau de risque important et nécessitent des actions d'amélioration. Il est donc recommandé de renforcer la maintenance préventive, d'améliorer le suivi des équipements et de poursuivre la formation du personnel afin d'augmenter le niveau de sécurité des installations.

En conclusion, cette étude a permis de mieux comprendre l'importance des barrières de sécurité dans les systèmes de stockage des hydrocarbures et de proposer des recommandations visant à améliorer la maîtrise des risques industriels et à garantir un fonctionnement plus sûr des installations.

Références

[1] ISO, “ISO 31000:2018 Risk management - Guidelines. International Organization for Standardization.,” 2018.

[2] OREDA.SINTEF, “Offshore Reliability Data Handbook. 6th ed. DNV Technica,” Norway, 2015.

[3] IEC 61882, “Hazard and operability studies (HAZOP studies)-application guide. [IEC 61882],” *Int Electrotech Comm*, 2001.

[4] American Petroleum Institute, “American Petroleum Institute. (2019). API RP 754 – Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries (3rd ed.),” Washington, DC: API Publications., 2019.

[5] Sonatrach Activité, “Etude de danger – Direction Régionale de Hassi R’Mel – Zone Nord,” 2020.

[6] S. Mannan, *Lees’ loss prevention in the process industries*. Butterworth-Heinemann, 2005.

[7] A. S. Markowski and M. Sam Mannan, “ExSys-LOPA for the chemical process industry,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 23, no. 6, pp. 688–696, 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2010.05.011.

[8] Sonatrach, “Internal safety standards for LPG storage and handling,” Algiers, 2020.

[9] E. Fethi, “MSC in Asset Management with HSE Risk assessment and control of major hazard of LNG terminal at Sonatrach plant GL4/Z, Arzew,” The robert gordon university aberdeen, 2006.

[10] DNV.GL, “USER MANUAL SYNERGI™ LIFE : Version 15.2,” 2022.

[11] IEC 62502, “Analysis techniques for dependability – Event tree analysis (ETA). [IEC 62502],” *Int Electrotech Comm*, 2010.

[12] A. Brima, “application de HAZOP et AdD sur le système turbocompresseur,” Batna, 2008.

[13] S. Mannan, *Lees’ Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment And Control: Fourth Edition*. 2012.

[14] PHAST, “PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) is the hazard modeling program for the DNV GL® software.” 2025, [Online]. Available: https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast/.

Résumé

Résumé

Ce mémoire porte sur l'évaluation des performances des barrières de sécurité appliquées aux bacs de stockage de condensat S204A/B/C au niveau du Module Processing Plant 1 (MPP1) de Hassi R'Mel. L'étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse quantitative des risques industriels liés au stockage des hydrocarbures.

La méthodologie adoptée repose principalement sur l'analyse HAZOP, permettant d'identifier les déviations de fonctionnement, leurs causes, leurs conséquences ainsi que les barrières de sécurité existantes. Une classification des barrières techniques, humaines et organisationnelles a été réalisée afin d'évaluer leur efficacité dans la prévention et la protection contre les événements redoutés.

Les résultats ont mis en évidence plusieurs scénarios critiques liés au surremplissage, à la surpression, à la corrosion et aux erreurs humaines. L'étude a également montré l'importance des systèmes instrumentés de sécurité, des soupapes de protection, des procédures opérationnelles et des actions de maintenance dans la réduction des risques. Enfin, des recommandations ont été proposées afin d'améliorer la fiabilité des barrières de sécurité et de renforcer la maîtrise des risques au sein des installations industrielles.

Mot-clés : Évaluation des risques ; Bacs de stockage ; Analyse HAZOP ; Noeud Papillon ; Barrières de sécurité.

Abstract:

This dissertation focuses on the performance evaluation of safety barriers applied to the S204A/B/C condensate storage tanks located at the Module Processing Plant 1 (MPP1) in Hassi R'Mel. The study is part of a quantitative risk assessment approach dedicated to industrial risks associated with hydrocarbon storage.

The adopted methodology is mainly based on the HAZOP analysis, which allows the identification of process deviations, their causes, consequences, and existing safety barriers. Technical, human, and organizational barriers were identified and evaluated according to their effectiveness in preventing hazardous events and mitigating their consequences.

The results highlighted several critical scenarios related to overfilling, overpressure, corrosion, and human errors. The study also demonstrated the significant role of safety instrumented systems, safety valves, operational procedures, and maintenance activities in reducing industrial risks.

Finally, several recommendations were proposed to improve the reliability of safety barriers and strengthen risk control within industrial facilities.

Keywords: Risk Assessment; Storage Tanks; HAZOP Analysis; Bow-Tie Analysis; Safety Barriers.

الملخص

تتناول هذه المذكرة تقييم أداء حواجز السالمة المطبقة على خزانات تخزين المكثفات C/B/S204A بوحدة المعالجة MPP1 بحاسي الرمل، وذلك في إطار التحليل الكمي للمخاطر الصناعية المرتبطة بتخزين المحروقات.

اعتمدت الدراسة على منهجية HAZOP لتحديد االنحرافات التشغيلية وأسبابها ونتائجها، باإلضافة إلى دراسة حواجز السالمة التقنية والبشرية والتنظيمية وتقييم فعاليتها في الوقاية من الحوادث والحد من آثارها.

أظهرت النتائج وجود عدة سيناريوهات خطيرة مرتبطة بارتفاع المستوى والضغط والتآكل واألخطاء البشرية، كما بينت أهمية أنظمة السالمة المؤتمتة وصمامات األمان وإجراءات التشغيل والصيانة في تقليل المخاطر الصناعية.

وفي الختام، تم اقتراح مجموعة من التوصيات الهادفة إلى تحسين موثوقية حواجز السالمة وتعزيز التحكم في المخاطر داخل المنشآت الصناعية.

الكلمات المفتاحية: تقييم المخاطر، خزانات التخزين، تحليل HAZOP) ،)تحليل العقدة الفراشية) Analysis Tie-Bow) أو مخطط الفراشة، حواجز السالمة أو حواجز الامان