

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

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE PETROCHIMIE



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Industries Pétrochimiques

Spécialité : Automatisation et Contrôle

Analyse des risques liés à l'échangeur cryogénique par la méthode

HAZOP

Soutenu le 18/09/2023

Réalisé par :

Encadré par :

❖ Bougherara mohammed elamin

Dr. Metatla

❖ Belherrous abderraouf

Année Universitaire 2022- 2023

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien, et pour les sacrifices qu'ils ont endurés.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre encadreuse, Madame Metatla, pour la confiance qu'elle nous a accordée en acceptant de diriger ce mémoire, pour son aide ainsi que sa compréhension et ses précieux conseils au cours de réalisation de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier Monsieur Menighed ainsi que Monsieur Bougettah pour leur disponibilité et leur aide déterminante dans la réalisation de notre mémoire.

Enfin, nous tenons à témoigner notre gratitude à nos familles et à nos proches pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de ce parcours qui nous ont permis de persévérer et de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel.

Nous présentons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du département d'automatisation et contrôle qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre mémoire.

Dédicases

Nous dédions ce modeste travail avant tout à nos chères mères et nos chers pères,
pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible.

A nos frères et sœurs ainsi qu'à tous nos amis, pour leurs encouragements et tous les
moments partagés.

A nos familles, pour leur accompagnement tout au long de notre parcours
universitaire.

A nos enseignants et collègues de promotion, pour la passion et la rigueur transmises.

A tous ceux qui nous sont chers et qui se reconnaîtront ici.

Que ce mémoire soit le témoignage de notre profonde gratitude et reconnaissance
envers tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Abstract:

This thesis focuses on risk assessment of the main cryogenic heat exchanger in Skikda gas liquefaction plant using HAZOP. Liquefaction exposes equipment to extremely low temperatures and high pressures, creating accident risk. A detailed HAZOP analysis identified deviations from normal operating conditions and potential consequences like equipment damage or loss of containment. Causes, safeguards, and risk levels were evaluated. Recommendations are provided to mitigate unacceptable risks, ensuring adequate safety systems and adherence to industry best practices for safe and reliable operations.

Résumé:

Ce mémoire porte sur l'évaluation des risques du principal échangeur de chaleur cryogénique à Skikda en utilisant HAZOP. La liquéfaction expose l'équipement à des températures très basses et des pressions élevées, créant des risques d'accidents. Une analyse HAZOP détaillée a identifié les écarts aux conditions normales et leurs conséquences potentielles comme l'endommagement d'équipements ou la perte de confinement. Les causes, mesures de sauvegarde et niveaux de risque ont été évalués. Des recommandations sont fournies pour atténuer les risques inacceptables, garantissant des systèmes de sécurité adéquats et le respect des meilleures pratiques pour des opérations sûres et fiables.

المخلص:

يركز هذا البحث على تقييم المخاطر لمبادل الحرارة الباردة الرئيسي في مصنع تسييل الغاز بسكيكدة باستخدام HAZOP. يخلق التسييل خطر حوادث بسبب درجات الحرارة المنخفضة والضغط العالي. حدد تحليل HAZOP الانحرافات عن الظروف الطبيعية ونتائج المحتملة كتلف المعدات أو فقدان الاحتواء. تم تقييم الأسباب والضمانات الأمنية ومستويات المخاطر. تم تقديم توصيات للتخفيف من المخاطر غير المقبولة، مما يضمن نظم أمان كافية والالتزام بأفضل الممارسات لعمليات آمنة وموثوقة.

Sommaire

Introduction générale1

I. Les méthodes d'analyse des risques.....5

a) Introduction:	5
b) Le concept d'analyse de risque :	5
c) Les méthodes d'analyses les risques :	5
1. Analyse préliminaire des risques (APR) :	6
Les principes :	6
Limites et avantages :	7
2. La méthode HAZOP :	7
Description de la méthode:	7
Les avantages et les limites :	8
3. La méthode arbre d'événement :	8
Principe de l'arbre d'événements :	9
Les avantages et les limites :	9
4. La méthode NoeudPapillon :	9
Principe de la méthode de NoeudPapillon :	10
Les avantages et les limites :	11
5. La méthode HIRA :	11
Techniques utilisées pour faire l'analyse des risques :	11
6. L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC) :	12
Historique et domaine d'application :	12
Principe de L'AMDEC :	12
Les étapes de la méthode AMDEC :	13
Les avantages et les limites :	14
7. Arbre de défaillances «AdD» (FaultTree « FT » en anglais):	14
Définition :	14
Formalisme :	14
Modélisation :	15
Méthodologie :	15
Généralités et description de l'arbre de défaillance :	15
Utilités des arbres de défaillances :	16
Représentation de la méthode de l'arbre de défaillances :	16
Méthodologie de la méthode arbre de défaillances :	16
Analyse qualitative :	17
Analyse quantitative :	17

Identification de l'évènement :	18
Examen du système :	18
Construction de L'arbre :	19
Evènement sommet (évènement indésirable) :	19
Evènement intermédiaires :	20
Evènements de base, transfert et conditions :	20
Connecteurs logiques :	20
Symbole graphique :	21
Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance :	23
Sensibilité, Facteurs d'importance :	24
Avantages:	24
Limites:	25
Dépendance entre les événements :	26
Notion d'événements temporisés :	26
Système dégradé :	26
Taille de l'arbre :	26

II. La méthode HAZOP.....29

a) Historique de la méthode HAZOP :	29
b) Définitions.....	30
1. La méthode HAZOP	30
2. Système	31
3. Nœud.....	31
4. Intention	31
5. Déviation.....	31
6. Paramètre	31
7. Mots guides	31
8. Cause	31
9. Conséquences.....	31
10. Protection (barrière de sécurité)	32
c) Membres de l'équipe HAZOP.....	33
1. Ingénieur de projet ou de conception:.....	34
2. Ingénieur des procédés :	34
3. Directeur de la mise en service :	34
4. Ingénieur de conception des systèmes de contrôle :	34
5. Chimiste de recherche :	34
6. Chef d'équipe indépendant :	34
d) Mise en œuvre de l'Hazop.....	34
e) Planification et Durée d'un Hazop	37

f)	Processus HAZOP	38
1.	Document	38
2.	Modes de fonctionnement	38
g)	la matrice utilisée pour l'évaluation du niveau des risques	39
1.	Guide pour l'application des jugements subjectifs	39
2.	Interprétation des niveaux de gravité et de probabilité« Evaluation des potentiels de danger » .	40
	Les catégories de fréquence	40
	Les catégories de conséquences	41
h)	Procédure HAZOP.....	41
	Feuille de travail de la méthode HAZOP	43
i)	Enregistrement HAZOP.....	44
j)	Résultats HAZOP	44
k)	Avantages	44
l)	Limites:	45
m)	Les facteurs de réussite	45

III. Application de la méthode HAZOP sur l'échangeur cryogénique principal 15-MC0547

a)	introduction	47
b)	HAZOP Méthodologie.....	48
c)	Présentation générale du complexe	50
d)	Description du procédé	51
1.	Conditionnement du gaz d'alimentation et système de compression	51
2.	Enlèvement du gaz acide (décarbonatation)	52
3.	Séchage.....	52
4.	Unité d'enlèvement de mercure.....	52
5.	Liquéfaction du gaz naturel	52
6.	Détendeurs	53
7.	Extraction d'hélium	53
8.	Fractionnement.....	53
9.	Réinjection du GPL	53
10.	Stockage du GNL, du gaz de transfert et des évaporats.....	53
11.	Les utilités	54
12.	Circuit du gaz combustible.....	55
13.	Le système torche et brulot.....	55
e)	Application de la méthode HAZOP sur l'échangeur cryogénique principal 15-MC05.....	56
1.	Description détaillée de la section considérée « section liquéfaction du gaz naturel 15 » [14] ...	56
	Principe générale de liquéfaction	56

Principe général du cycle de réfrigération.....	56
Circuit gaz naturel dans la liquéfaction.....	56
Principe de fonctionnement de la tour de lavage.....	56
Echangeur cryogénique principal (MCHE) 15-MC05.....	57
Circulation des fluides	59
. Expander de GNL 15-MJ02	60
Extraction d' HELIUM	60
Extraction d'azote	60
2. Principe de fonctionnement de l'équipement étudiée « échangeur cryogénique 15-MC05 » [13]	60
3. Evaluation des risques sur l'échangeur cryogénique 15-MC05	61
f) L'application de l'HAZOP sur l'échangeur cryogénique 15-MC05	61
g) Recommandations	74

Conclusion générale76

Bibliographie78

Liste des tableaux

Table 1: Symboles des évènements dans les arbres de défaillances [13].....	22
Table 2: Symboles des portes dans les arbres de défaillances [13].	22
Table 3: Les types des déviations des paramètres, et leurs significations	33
Table 4: Interprétation des niveaux de probabilité	40
Table 5: Interprétation des niveaux de gravité	41
Table 6: exemple de feuille de travail HAZOP.	43
Table 7: Feuille de travail de la méthode HAZOP	43
Table 8: Caractéristiques techniques principales de l'échangeur de chaleur cryogénique	59

Liste des figures

Figure 1: exemple de la méthode Nœud de Papillon.	10
Figure 2: <i>La démarche de la méthode AMDEC.</i>	13
Figure 3: Exemple de la méthode Arbre de défaillances [10].	27
Figure 4: Matrice d'évaluation des risques du projet	40
Figure 5: la procédure HAZOP	42
Figure 6: Les principales étapes de la liquéfaction du gaz naturel	51
Figure 7: Schéma de tuyauterie et d'instrumentation de l'échangeur de chaleur cryogénique	58

Liste des abréviations

AMDEC	L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité
AGRU	Acid gaz removal unit
APCI	Air Products and chemicals incorporation
APR	L'Analyse Préliminaire des Risques
AT	Transmetteur d'analyse
BP	Basse pression
De	Durée d'exposition au danger
DNV	Det Norsk Veritas
ESD	Emergency Shut Down
ESDV	Emergency Shut Down valve Flow Alarm Low
FAL	
FALL	Flow Alarm Low Low
FAH	Flow Alarm High
FAHH	Flow Alarm High High
Fe	Fréquence d'exposition au danger
FIC	Flow Indicator Controller
Fs	Fréquence de survenue de l'événement redouté
FT	Flow Transmitter
FV	Flow Valve
G	Gravité
GN	Gaz Naturel
GNL	Gaz Natural Liquéfié
GNL2/K	Nouveau complexe de liquéfaction du gaz naturel de SKIKDA
GNT	Gaz Naturel Traité
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
HAZOP	Analyse de risques des procédés et opérations (<i>HAZard & OPerability study</i>)
HP	Haute pression
HS	Hand switch
HSE	Health and Safety Executive
I	Interlock
Idem	De même
ICI	Imperial Chemical industries

INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
KBR	Kellogg Brown & Root incorporation
LAH	Level Alarm High
LC	Level Controller
LI	Level Indicator
LIC	Level Indicator Controller
LV	Level Valve
MC	Echangeur
MCHE	Main cryogenic heat exchanger
MD	Colonne/ballon
MDEA(a)	Di-éthanol Amine méthylique active
MJ	Pompe/compresseur
MR	Multi réfrigérant
MRL	Multi réfrigérant liquid
MRV	Multi réfrigérant vapeur
MP	Moyenne pression
P	Probabilité
P&ID	Piping & Instrumentation Diagram
PAH	Pressure Alarm High
PAL	Pressure Alarm Low
PALL	Pressure Alarm Low Low
PC	Pressure Controller
PCV	Pressure Controller Valve
PDT	Pressure Differential Transmitter
PDAH/L	Alarme de pression différentielle haute/basse
PFD	Process Flow Diagram
PI	Pressure Indicator
PIC	Pressure Indicator Controller
PP	Probabilité potentielle
PR	Probabilité résiduelle
PRV	Pressure ronifloed valve
PSV	Pressure Safety Valve
PV	Pressure Valve
R	Risque
ROV	Vanne motorisée
SP	Clapet anti-retour

SC	Point d'échantillonnage
TAH	Temperature Alarm High
TAHH	Temperature Alarm High High
TAL	Temperature Alarm Low
TALL	Temperature Alarm Low Low
TI	Temperature Indicator
TIC	Temperature Indicator Controller
TNO	The Netherlands Organization, Department of Industrial Safety – organisme de recherche néerlandais
TV	Temperature Valve
VAH	Vibration Alarm High
XV	Vanne de sécurité (isolement) de type tout ou rien

Introduction générale

La zone industrielle de Skikda est l'un des principaux pôles Hydrocarbures d'Algérie. Le ministère de l'environnement exige une évaluation des risques technologiques générés par les diverses activités présentes sur cette zone conformément à la loi du 19 janvier 2006.

La sécurité, la santé au travail et l'environnement ont toujours constitué une préoccupation majeure du groupe pétrolier SONATRACH. Aujourd'hui plus encore qu'hier, l'accident, avec ses conséquences sur l'homme, l'environnement ou l'outil industriel est inacceptable.

3.1. La liquéfaction du gaz naturel est considérée comme une activité à risque, qui peut être à l'origine d'accident pour l'homme, l'environnement et les installations. Ces risques sont entre autres : incendie, explosion, émanation accidentelle de gaz, déversement accidentel du produit, etc.

L'analyse de sécurité de l'installation consiste à étudier le fonctionnement et les dysfonctionnements de ses composants. Elle permet de définir les procédures de surveillance et d'arrêt à introduire dans le programme de conduite dans un cadre préventif.

La liquéfaction du gaz naturel constitue un élément important dans la chaîne du gaz naturel liquéfié (GNL). Le but de la liquéfaction du gaz naturel est de réduire son volume dans un rapport d'environ 600 à 1 afin de faciliter son transport dans des conditions optimum aussi bien sur le plan économique que sur celui de la sécurité.

Dans le cas du projet « méga train GNL », l'obligation réglementaire nécessite une analyse des risques pour évaluer le niveau de sécurité de l'installation en prenant en considération les barrières de sécurité mises par l'entreprise Kellogg Brown & Root international Inc. (KBR) et le bureau d'études Det Norske Veritas (DNV).

La phase construction étant avancée, une quantité d'information plus importante est disponible pour une étude plus détaillée. S'agissant d'un système thermo-hydraulique, la technique la plus indiquée pour ce faire est la méthode HAZOP. L'objectif est d'évaluer les niveaux de sécurité en phase exploitation.

Le but de mémoire est de réaliser une évaluation des risques de l'échangeur cryogénique principal dans la section de liquéfaction en phase d'exploitation par la méthode HAZOP .

A travers cette mémoire, nous voulons atteindre les objectifs ci-dessous :

- Appliquer l'approche HAZOP ;
- Evaluer le niveau de sécurité de la partie considérée par l'étude ;
- Proposer des recommandations afin de réduire les risques à un niveau acceptable;

Notre travail est structuré autour de trois chapitres suivis d'une conclusion et de recommandations :

- Le chapitre I - offre un aperçu des méthodes courantes d'analyse des risques industriels, en expliquant leurs principes, leurs objectifs et leurs domaines d'application respectifs.
- Le chapitre II - présente en détail d'une méthode d'analyse des risques industriels, la méthode HAZOP. Il en explique les principes, les objectifs, les étapes de mise en œuvre ainsi que les avantages et limites.
- Le chapitre III - partie pratique décrit l'unité étudiée et met en pratique la méthode HAZOP sur l'échangeur cryogénique

Chapitre I

Les méthodes d'analyse des risques

I. LES METHODES D'ANALYSE DES RISQUES.

a) INTRODUCTION:

Les méthodes et les outils classiques de la Sdf ont apporté, dans une démarche qualité d'amélioration continue, la prise en compte des risques (probabilité des dysfonctionnements, gravité selon des indicateurs reflétant les priorités de l'entreprise), exhaustivité et précision de l'analyse, exploitation méthodique des expériences de tous les intervenants (retour d'expérience), facilité d'implication dans la démarche des techniciens à qui ces méthodes sont familières. La figure ci dessous synthétise les différentes méthodes d'analyse des risques .

b) Le concept d'analyse de risque :

Le concept d'analyse de risque pour un projet repose sur la démarche en 5 étapes, il s'agit d'un modèle de référence structurant les points suivants :

- Identification et classification des risques.
- Les conséquences du risque (financier, juridique, humain, ...).
- La gestion du risque (prévention, protection, évitement de risque, transfert).
- Maîtrise interne ou transfert vers un tiers (externalisation, assurance).

c) Les méthodes d'analyses les risques :

Le choix de la méthode ou des méthodes nécessaires pour réaliser l'analyse des risques est primordial. Il n'existe pas une méthode unique miraculeuse qui permettrait à toutes les entreprises de toutes tailles et de tous secteurs d'analyser leurs risques afin de déterminer les mesures de prévention . Il existe donc des méthodes avec des objectifs différents, selon le besoin de l'entreprise dans la mise en place de son système dynamique de gestion des risques.

Les principales méthodes d'analyse les risques :

- L'analyse préliminaire des risques (APR).
- L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC).
- L'analyse des risques sur schémas type HAZOP.
- L'analyse par arbres des défaillances (AdD).
- 3.2. L'analyse par arbres d'évènements (AdE).
- L'analyse par NoeudPapillon.

- L'analyse par la méthode HIRA

1. Analyse préliminaire des risques (APR) :

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode d'usage très général couramment utilisée pour l'identification des risques au stade préliminaire de la conception d'une installation ou d'un projet. En conséquence, cette méthode ne nécessite généralement pas une connaissance approfondie et détaillée de l'installation étudiée

Les principes :

L'Analyse Préliminaire des Risques nécessite dans un premier temps d'identifier les éléments dangereux de l'installation . Ces éléments dangereux désignent le plus souvent :

Des substances ou préparations dangereuses, que ce soit sous forme de matières premières, de produits finis, d'utilités....,

Des équipements dangereux comme, par exemple, des stockages, zones de réception-expédition, réacteurs, fournitures d'utilités (chaudière...),

Des opérations dangereuses associées au procédé.

L'identification de ces éléments dangereux est fonction du type d'installation étudiée.

L'APR peut être mise en œuvre sans ou avec l'aide de liste de risques types ou en appliquant les mots guides Hazop . Il est également à noter que l'identification de ces éléments se fonde sur la description fonctionnelle réalisée avant la mise en œuvre de la méthode.

A partir de ces éléments dangereux, l'APR vise à identifier, pour un élément dangereux, une ou plusieurs situations de danger. Dans le cadre de ce document, une situation de danger est définie comme une situation qui, si elle n'est pas maîtrisée, peut conduire à l'exposition d'enjeux à un ou plusieurs phénomènes dangereux.

Le groupe de travail doit alors déterminer les causes et les conséquences de chacune des situations de danger identifiées puis identifier les sécurités existantes sur le système étudié. Si ces dernières sont jugées insuffisantes vis-à-vis du niveau de risque identifié dans la grille de criticité, des propositions d'amélioration doivent alors être envisagées.

Limites et avantages :

Le principal avantage de l'Analyse Préliminaire des Risques est de permettre un examen relativement rapide des situations dangereuses sur des installations. Par rapport aux autres méthodes présentées ci-après, elle apparaît comme relativement économique en termes de temps passé et ne nécessite pas un niveau de description du système étudié très détaillé. Cet avantage est bien entendu à relier au fait qu'elle est généralement mise en œuvre au stade de la conception des installations.

En revanche, l'APR ne permet pas de caractériser finement l'enchaînement des événements susceptibles de conduire à un accident majeur pour des systèmes complexes. Comme son nom l'indique, il s'agit à la base d'une méthode préliminaire d'analyse qui permet d'identifier des points critiques devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elle permet ainsi de mettre en lumière les équipements ou installations qui peuvent nécessiter une étude plus fine menée grâce à des outils tels que l'AMDEC, l'HAZOP ou l'analyse par arbre des défaillances. Toute fois, son utilisation seule peut être jugée suffisante dans le cas d'installations simples ou lorsque le groupe de travail possède une expérience significative de ce type d'approches .

2. La méthode HAZOP :

La méthode HAZOP s'intègre dans une démarche d'amélioration de la sécurité et des procédés pour une installation existante ou en projet, avec ses avantages :

- Réalisation de l'étude au sein d'un groupe de travail rassemblant différents métiers : sécurité, ingénierie, exploitation, maintenance...
- Méthode d'analyse systématique liée aux installations avec circuits fluides
- Contribution au respect des normes en matière de sécurité.

Description de la méthode:

- Définition du système à étudier
- Prise de connaissance du système
- Eléments spécifiques à la méthode
- Présentation du tableau HAZOP
- Analyse des dysfonctionnements et mise en place de recommandations

- Quand utiliser HAZOP ?
- Application de la méthode sur un cas d'école.

Les avantages et les limites :

L'HAZOP est un outil particulièrement efficace pour les systèmes thermo-hydrauliques. Cette méthode présente tout comme l'AMDE un caractère systématique et méthodique. Considérant, de plus, simplement les dérives de paramètres de fonctionnement du système, elle évite entre autres de considérer, à l'instar de l'AMDE, tous les modes de défaillances possibles pour chacun des composants du système.

En revanche, l'HAZOP ne permet pas dans sa version classique d'analyser les événements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances.

Par ailleurs, il est parfois difficile d'affecter un mot clé à une portion bien délimitée du système à étudier. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une dérive. En effet, les systèmes étudiés sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une dérive survenant dans une ligne ou maille peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendu, il est possible a priori de reporter les implications d'une dérive d'une partie à une autre du système. Toutefois, cette tâche peut rapidement s'avérer complexe.

Enfin, L'HAZOP traitant de tous types de risques, elle peut être particulièrement longue à mettre en œuvre et conduire à une production abondante d'information ne concernant pas des scénarios d'accidents majeurs.

3. La méthode arbre d'événement :

L'arbre d'événements illustre graphiquement les conséquences potentielles d'un accident qui résulte d'un événement initiateur (une défaillance spécifique d'un équipement ou une erreur humaine). Une analyse par arbre d'événements (AAE) prend en compte la réaction des systèmes de sécurité et des opérateurs à l'événement initiateur lors de l'évaluation des conséquences potentielles de l'accident. Les résultats de l'AAE sont des séquences accidentelles; c'est-à-dire un ensemble de défaillance ou d'erreurs qui conduisent à l'accident. Ces résultats décrivent les conséquences potentielles en termes de séquence d'événements (succès ou défaillance des fonctions de sécurité) qui font suite à un événement initiateur. Une analyse par arbre d'événements est bien adaptée pour étudier des procédés complexes qui ont plusieurs barrières de protection ou procédures d'urgence en place pour réagir à un événement initiateur spécifique.

Principe de l'arbre d'événements :

L'ADE évalue le potentiel d'accident résultant d'une défaillance d'un équipement ou d'un dérangement de procédé (événement initiateur). À la différence de l'analyse par arbre de panne (une approche déductive) l'AAE est un raisonnement inductif où l'analyste commence par un événement initiateur et développe la séquence probable d'événements qui conduisent aux accidents potentiels, en tenant compte tant du succès que de la défaillance des barrières de sécurité au fur et à mesure que l'accident progresse. Les arbres d'événements fournissent une façon systématique d'enregistrer les séquences d'accidents et de définir la relation entre les événements initiateurs et la séquence d'événements qui peut résulter en accidents.

Les arbres d'événements sont bien indiqués pour analyser les événements initiateurs qui pourraient conduire à une variété de conséquences. Un arbre d'événements met en évidence la cause initiale d'accidents potentiels et fonctionne à partir de l'événement initiateur jusqu'aux effets finaux. Chaque branche d'un arbre d'événements représente une séquence séparée d'accident qui est, pour un événement initiateur donné, un ensemble de relations entre les barrières de sécurité.

Les avantages et les limites :

L'analyse par arbre d'événements est une méthode qui permet d'examiner, à partir d'un événement initiateur, l'enchaînement des événements pouvant conduire ou non à un accident potentiel. Elle trouve ainsi une utilité toute particulière pour l'étude de l'architecture des moyens de sécurité (prévention, protection, intervention) existants ou pouvant être envisagés sur un site. A ce titre, elle peut être utilisée pour l'analyse d'accidents a posteriori. Cette méthode peut s'avérer lourde à mettre en œuvre. En conséquence, il faut définir avec discernement l'événement initiateur qui fera l'objet de cette analyse.

4. La méthode NoeudPapillon :

Principe de la méthode de NoeudPapillon :

Le noeudpapillon utilisé dans de nombreux secteurs industriels a été développé par la compagnie Shell. L'approche est de type dit arborescente ce qui permet de visualiser en un coup d'œil les causes possibles d'un accident, ses conséquences et les barrières mises en place. L'accident non désiré (au centre) peut être le résultat de plusieurs causes possibles telles que la perte de confinement d'une substance toxique, une explosion, une rupture de canalisation, un emballement de réaction, une brèche dans un réservoir, une décomposition d'une substance ,etc. Cet outil permet d'illustrer le résultat d'une analyse de risque détaillée

(de type AMDEC,HAZOP ou What-if par exemple) donc plus complexe qu'une analyse préliminaire de risques.

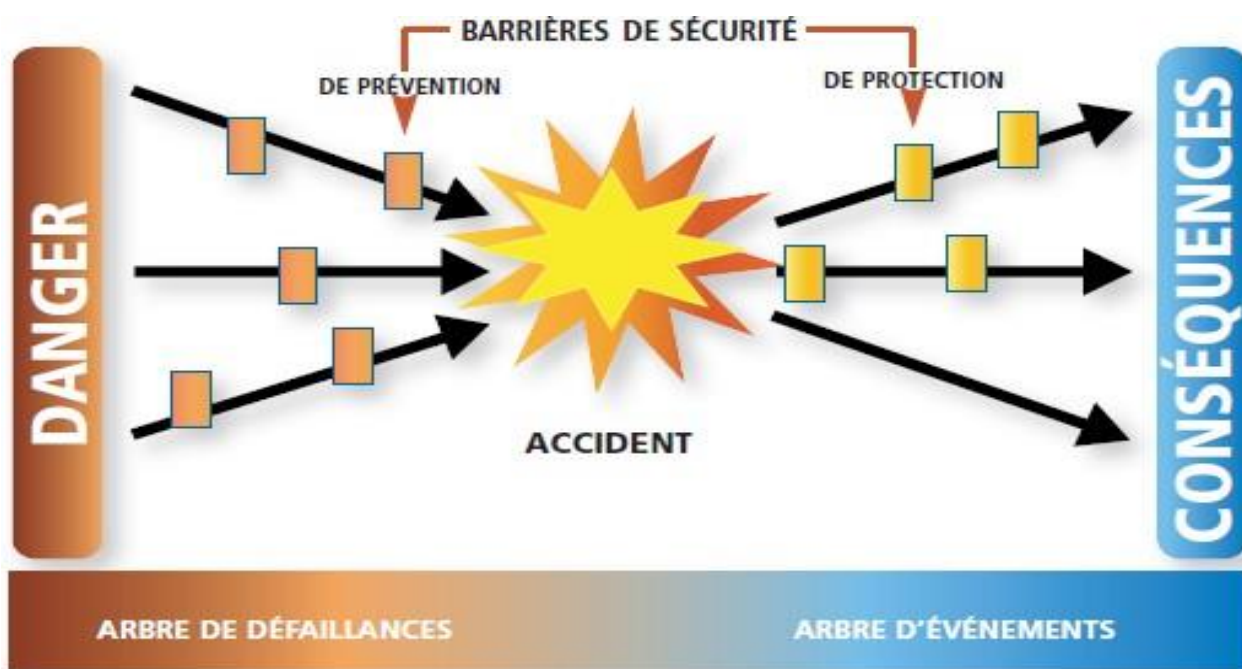


Figure 1: exemple de la méthode Noeud de Papillon.

La partie gauche du noeud représente l'identification des dangers, des causes possibles d'accident et des divers enchaînements ou combinaisons (flèches noires) pouvant engendrer l'accident non désiré. Entre ces causes possibles et l'accident, des barrières dites de prévention(rectangles orange) doivent être installées.

La partie droite du nœud représente les conséquences possibles de l'accident. Par exemple, lors de la rupture d'une canalisation ou d'une brèche dans un réservoir, il peut en résulter la formation d'une flaque ou d'un nuage. Entre cet accident et les récepteurs, des barrières de protection doivent être installées pour réduire les effets sur ces récepteurs.

Donc, le nœud papillon reflète les scénarios d'accident qui peuvent survenir et les mesures prises pour les prévenir ou en réduire la probabilité ainsi que celles prises pour en réduire les conséquences. On parle de barrières de prévention et de barrières de protection. Les barrières de protection abaissent le niveau de gravité des conséquences et celles de prévention abaissent la probabilité. À l'aide d'une matrice (du type utilisé dans une analyse préliminaire des risques) où on établit notre zone d'acceptabilité, l'effet des barrières est visible et peut rendre tolérable une situation qui était au départ inacceptable.

Les avantages et les limites :

Le Nœud Papillon offre une visualisation concrète des scénarios d'accidents qui pourraient survenir en partant des causes initiales de l'accident jusqu'aux conséquences au niveau des éléments vulnérables identifiés. De ce fait, cet outil met clairement en valeur l'action des barrières de sécurité s'opposant à ces scénarios d'accidents et permet d'apporter une démonstration renforcée de la maîtrise des risques. En revanche, il s'agit d'un outil dont la mise en œuvre peut être particulièrement coûteuse en temps. Son utilisation doit donc être décidée pour des cas justifiant effectivement un tel niveau de détail.

5. La méthode HIRA :

HIRA : En anglais c'est l'acronyme : ***Hazard Identification Risk***

Assessment. En français : identification des dangers et évaluation des risques.

Techniques utilisées pour faire l'analyse des risques :

Sur terrain, la commission doit observer les tâches des postes à analyser, impliquer les travailleurs par des interviews, prendre en compte les retours d'expérience au cours de la rédaction de l'analyse des risques. Après la finalisation de l'HIRA principale (Analyse des risques des postes de travail) le retour de l'information aux travailleurs des postes concernés est obligatoire moyennant les fiches des en subtilisation aux risques des postes de travail. Chaque responsable hiérarchique doit communiquer et expliquer aux personnels sous sa responsabilité les résultats de l'analyse des risques.

6. L'analyse des modes de défaillance de leur effet et de leur criticité (AMDEC) :

Historique et domaine d'application :

L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) a été employée pour la première fois dans le domaine de l'industrie aéronautique durant les années 1960. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres secteurs d'activités tels que l'industrie chimique, pétrolière ou le nucléaire.

De fait, elle est essentiellement adaptée à l'étude des défaillances de matériaux et d'équipements et peut s'appliquer aussi bien à des systèmes de technologies différentes (systèmes électriques, mécaniques, hydrauliques...) qu'à des systèmes alliant plusieurs techniques.

Principe de L'AMDEC :

Recenser les risques potentiels d'erreur (ou les modes de défaillance) et en évaluer les effets puis en analyser les causes. L'AMDEC est d'identifier et de hiérarchiser les modes potentiels de défaillance susceptibles de se produire sur un équipement, d'en rechercher les effets sur les fonctions principales des équipements et d'en identifier les causes. Pour la détermination de la criticité des modes de défaillance, l'AMDEC requiert pour chaque mode de défaillance la recherche de la gravité de ses effets, la fréquence de son apparition et la probabilité de sa détectabilité. Quand toutes ces informations sont disponibles, différentes méthodes existent pour déduire une valeur de la criticité du mode

de défaillance. Si la criticité est jugée non acceptable, il est alors impératif de définir des actions correctives pour pouvoir corriger la gravité nouvelle du mode de défaillance (si cela est effectivement possible), de modifier sa fréquence d'apparition et d'améliorer éventuellement sa détectabilité.

Les étapes de la méthode AMDEC :

La méthode s'inscrit dans une démarche en huit étapes :



Figure 2: La démarche de la méthode AMDEC.

Les avantages et les limites :

L'AMDEC s'avère très efficace lorsqu'elle est mise en œuvre pour l'analyse de défaillances simples d'éléments conduisant à la défaillance globale du système. De par son caractère systématique et sa maille d'étude généralement fine, elle constitue un outil précieux pour l'identification de défaillances potentielles et les moyens d'en limiter les effets ou d'en prévenir l'occurrence.

Comme elle consiste à examiner chaque mode de défaillance, ses causes et ses effets pour les différents états de fonctionnement du système, l'AMDEC permet d'identifier les modes communs de défaillances pouvant affecter le système étudié. Les modes communs de défaillances correspondent à des événements qui de par leur nature ou la dépendance de certains composants, provoquent simultanément des états de panne sur plusieurs composants du système. Les pertes d'utilités ou des agressions externes majeurs constituent par exemple, en règle générale, des modes communs de défaillance.

Dans le cas de systèmes particulièrement complexes comptant un grand nombre de composants, l'AMDEC peut être très difficile à mener et particulièrement fastidieuse compte tenu du volume important d'informations à traiter. Cette difficulté est décuplée lorsque le système considéré comporte de nombreux états de fonctionnement. Par ailleurs, l'AMDEC considère des défaillances simples et peut être utilement complétée, selon les besoins de l'analyse, par des méthodes dédiées à l'étude de défaillances multiples comme l'analyse par arbre des défaillances par exemple.

7. Arbre de défaillances «AdD» (FaultTree « FT » en anglais):

Définition :

Un arbre de défaillances (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'Ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statique.

Formalisme :

Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'évènements qui permettent la réalisation d'un évènement indésirable prédéfini (appelé communément évènement redouté « ER »). La représentation graphique met donc en évidence les relations causes à effet

Modélisation :

Cette technique est complétée par un traitement mathématique qui permet la combinaison des défaillances simples ainsi que de leur probabilité d'apparition. Elle est basée sur l'algèbre de Boole relative à la théorie des ensembles. Elle permet ainsi de quantifier la probabilité d'occurrence d'un évènement indésirable. Egalement appelé *évènement redouté* (ER).

Méthodologie :

L'arbre de défaillance est formé de niveaux successifs d'évènements qui s'articulent par l'intermédiaire des portes (initialement logique). En adoptant cette représentation et la logique déductive (allant des effets vers les causes) et booléenne, il est possible de remonter d'effet sans causes de l'évènement indésirable à des évènements de base indépendants entre eux et probabilistes.

Généralités et description de l'arbre de défaillance :

Lorsqu'il s'agit d'étudier les défaillances d'un système, l'arbre de défaillance s'appuie sur une analyse dysfonctionnelle d'un système à réaliser préalablement : un analyse des modes de défaillances et de leurs effets (AMDE). Cette méthode inductive allant des causes aux effets apparaît donc comme préalable à la construction d'un arbre de défaillance puisque l'identification des composants et de leurs modes de défaillance est généralement utilisée au dernier niveau d'un arbre.

L'analyse par arbre de défaillance et le diagramme de fiabilité sont des méthodes pratiques à condition que les évènements de base soit faiblement dépendant. Dans le cas contraire, ces techniques deviennent caduques et il est nécessaire d'employer une technique plus appropriée reposant sur un modèle dynamique comme un processus de MARKOV.

Utilités des arbres de défaillances :

Les arbres de défaillances sont utilisés dans l'ingénierie de sûreté des industries « à risque » et peuvent être utilisés comme un outil d'évaluation de la conception, ils permettent d'identifier les scénarios conduisant à des accidents dans les phases amont du cycle de vie

d'un système et peuvent éviter des changements de conception autant plus coûteux qu'ils sont tardifs . Ils peuvent aussi être utilisés comme un outil de diagnostic, prévoyant la ou les défaillances des composants la ou les plus probables lors de la défaillance d'un système.

Représentation de la méthode de l'arbre de défaillances :

- La ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire.
- Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées.
- Les relations sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET ».

Méthodologie de la méthode arbre de défaillances :

Démarche: L'arbre de défaillance est une méthode déductive ,qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un évènement unique intitulé évènement redouté .Le point de départ de la construction de l'arbre est l'évènement redouté lui-même (également appelé évènement du sommet). Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifier. A partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau inférieur.

La démarche est la suivante :

- Pour chaque évènement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des évènements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. Des opérateurs

logiques (portes) permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux.

- Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des évènements en combinaison d'évènements de niveaux inférieurs, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de probabilité d'occurrence de l'évènement analysé.

Ces évènements non décomposés de l'arbre sont appelés évènements élémentaires (ou évènements de bases). Notons que :

- a) Il est nécessaire que les évènements soient indépendants entre eux.
- b) Leurs probabilité d'occurrence doit pouvoir être quantifiée (condition nécessaire seulement dans le cas où l'arbre est destiné à une analyse quantitative).
- c) Contrairement à l'approche inductive de l'AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'évènement redouté. La construction de l'arbre de défaillance est une phase importante de la méthode car sa complétude conditionne celle de l'analyse qualitative ou quantitative qui sera réalisée par la suite.

Analyse qualitative :

L'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés :

1. L'identification des scénarios critiques susceptibles de conduire à l'évènement redouté. Par l'analyse des différentes combinaisons de défaillances menant à l'évènement sommet, l'objectif est ici d'identifier les combinaisons les plus courtes appelées coupes minimales.
2. La mise en œuvre d'une procédure d'allocation de barrières. Ce deuxième type d'exploitation qualitatif permet d'allouer un certain nombre de barrières de sécurité (technique ou d'utilisation) en fonction de la gravité de l'évènement redouté et des contraintes normatives éventuelles.

Analyse quantitative :

Une étude probabiliste peut avoir deux objectifs :

1. L'évaluation rigoureuse de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.
2. Le tri de scénarios critiques (en partant des coupes minimales de plus fortes probabilités).

Ces calculs ne peuvent se concevoir que si chaque évènement élémentaire peut être probabilisé à partir d'une loi soigneusement paramétrée et de la connaissance du temps de mission associé à l'évènement redouté et/ou à l'aide de données issues du retour d'expérience.

Identification de l'évènement :

L'identification de l'évènement redouté est absolument essentielle à l'efficacité et à la pertinence de la méthode. Il correspond le plus souvent à un évènement catastrophique en termes humain, environnemental ou économique. Il peut s'avérer nécessaire par fois de

caractériser l'évènement redouté pour chacune des missions du système étudié. Il existe plusieurs méthodes permettant de procéder à l'identification des évènements redoutés.

L'analyse préliminaire des risques (APR), est utilisée dans la plupart des industries.

Examen du système :

Lors d'une analyse fiabiliste d'un système, il est toujours difficile de délimiter précisément les contours de l'étude. L'analyste doit pour cela se poser certain nombre de questions incontournable du type :

1. Quelles sont les intentions de l'analyse ?
2. Quelles sont les limites ?
3. S'agit-il de maîtriser une prise de risque relative à la sécurité des personnes ou de comparer différents dispositifs ?
4. L'objectif est-il de démontrer la conformité à des normes officielles et/ou à des spécifications imposées par le client ?

Avant d'entamer la construction de l'arbre de défaillance proprement dite, les analystes chargés de l'étude doivent acquérir au préalable une très bonne connaissance de

l'ensemble du système et de sa fonction. Ils doivent s'appuyer pour cela sur l'expérience des ingénieurs et techniciens chargés des opérations sur le terrain.

Il est également nécessaire de délimiter précisément l'étude à différents niveaux :

5. Natures des évènements pris en compte ;
6. Equipements impliqués ou non dans la fonction du système ;
7. Importance de l'environnement, etc.

Afin d'être complet et rigoureux, l'examen du système doit couvrir obligatoirement chacun des thèmes suivants :

1. La description du système (éléments et sous-systèmes inclus dans l'étude et éléments exclus).
2. La définition de la mission (spécification du système , phase de diverses missions, procédure de maintenance et de réparation, reconfiguration possible...)
3. L'analyse de l'environnement ;
4. L'identification des évènements à prendre en compte: étendue donnée à l'étude (prise en compte des résultats des erreurs humaines, des problèmes de transport de pièces/ personnel,...).

Construction de L'arbre :

Cette construction est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025**.

Evènement sommet (évènement indésirable) :

La première étape réside dans la définition de l'évènement à étudier d'une façon explicite et précise, cet évènement est appelé sommet, ou encore évènement redouté. Cette étape est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse. L'arbre de défaillance se veut être une représentation synthétique ; le libellé de l'évènement devra être bref, mais aussi évocateur que possible dans la boîte qui le représente dans l'arbre, on lui associant un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'évènement. Cette remarque est aussi valable pour tous les éléments qui vont figurer dans l'arbre.

Evènement intermédiaires :

L'évènement sommet étant défini, il convient de décrire la combinaison d'évènements pouvant conduire à cet évènement sommet. Les évènements intermédiaires sont des évènements moins globaux. Une fois un évènement définis, ils seront liés à l'évènement sommet via un connecteur. Ces évènements intermédiaires peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres évènements intermédiaires plus détaillés.

Evènements de base, transfert et conditions :

Il est possible de prendre en compte des évènements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces évènements sont appelés évènements non développés. Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée. Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page. Les évènements de bases sont les évènements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage ; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel...) d'un élément du système.

L'apparition de certains évènements (de base ou autres) peut avoir une conséquence à certaines conditions. Nous sommes donc conduits à introduire dans l'arbre des conditions

dont la réalisation conditionne l'enchaînement. Ces conditions interviennent dans la construction de l'arbre comme des évènements intermédiaires, à l'exception que ces conditions ne sont plus décomposées donc « de base ».

Connecteurs logiques :

Les connecteurs (portes) logiques sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU. Les connecteurs fonctionnent comme suit :

- OU : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent ;
- ET : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements

en entrée/inferieur surviennent/sont présents ;

- K/N : c'est un vote majoritaire : l'évènement en sortie/superieur survient si au moins K (c'est un entier qui sert à paramétrer le comportement de la porte) parmi les N évènements en entrée / inferieur surviennent /sont présents .Cette porte généralise les deux précédentes : une porte Ou est une porte1/Net une porte ET est une porte N/N .

L'utilisation exclusive des trois connecteurs mentionnés ci-dessus permet de rester dans le cadre des arbres de défaillances cohérents ,et c'est en pratique ce qui est fait le plus souvent. Dans certaines situations ,il est nécessaire d'introduire des non cohérences avec des connecteurs NON,OU exclusif (réalisé si une et une seule de ses entrées est réalisée) ...etc. mais cela rend le traitement mathématique plus complexe. Enfin, il peut être pratique à des fins descriptives d'utiliser des connecteurs plus complexes, comme des connecteurs de vote conditionnels... Ces connecteurs permettent de traduire des comportements particuliers qu'il est possible de rencontrer dans certaines architectures. Au même titre, une dimension temporelle peut être nécessaire pour traduire le comportement d'un système, pour cela il existe des connecteurs **ET** séquentiels prenant en compte le séquencèrent des évènements, des connecteurs **SPARE** prenant en compte des lots de rechanges, etc. L'utilisation de ces connecteurs peut conduire à des modèles dont la signification mathématique est ambiguë et sont interprétée différemment suivant les outils informatiques dans lesquels ils sont saisis.

Symbole graphique :

Les symboles de base utilisés dans les arbres de défaillance sont classés en plusieurs types :

- Evènements ;
- Portes ;
- Symboles de transfert.

(Dans les logiciels permettant d'éditer des arbres de défaillance son pourra constater des variations mineures). Les différents symboles utilisés sont regroupés dans les tableaux 1.1 et 1.2.

Table 1: Symboles des évènements dans les arbres de défaillances..

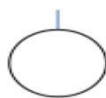
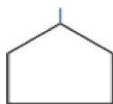
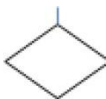

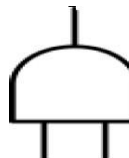
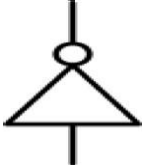

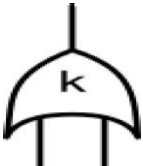
Symbole	Nom	Description
	Evènement de base	Evènement du plus bas niveau pour le quel la Probabilité d'apparition ou d'information de fiabilité est disponible
	Evènement Maison	Evènement qui doit se produire avec certitude lors de la production ou de la maintenance .On peut aussi le définir comme un évènement non- probalisé , que l'on doit choisir de mettre 1 ou 0 avant tout traitement de l'arbre. Ce type d'évènement permet d'avoir plusieurs variantes d'un arbre sur un seul dessin, en modifiant la logique de l'arbre selon la valeur choisie par l'utilisateur
	Evènement non développé	Le développement de cet évènement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information.

Table 2: Symboles des portes dans les arbres de défaillances.

Symbole	Nom	Description	Nombre d'entrées
	OU (OR)	L'évènement de sortie apparait si au moins un des évènements d'entrées apparait	>1
	ET (AND)	L'évènement de sortie apparait si tous les évènements apparaissent	>1

	NON (NOT)	L'évènement de sortie apparait si l'évènement d'entrée n'apparait pas. L'état logique de la sortie est l'inverse de celui d'entrée.	=1
	OU Exclusif (XOR)	L'évènement de sortie apparait si un seul évènement d'entrée apparait.	>1
	Vote Majoritaire	L'évènement de sortie apparait si au moins K évènements d'entrées apparaissent ($K < n$)	>1

Les principaux traitements que l'on peut faire à partir de la fonction booléenne sont les suivants :

- L'énumération des coupes minimales
- Le calcul des facteurs d'importance structurelle .Très peu utilisés en pratique ,ils visent à donner des indications du même ordre que les facteurs d'importance calculés avec des probabilités, lorsque celles-ci ne sont pas disponibles.

Une grande variété d'algorithmes permettant de faire ces traitements.

Résumé des règles importantes de la construction de l'arbre de défaillance :

1. Partir de l'évènement redouté (sommet de l'arbre),
2. Imaginer les évènements intermédiaires possibles expliquant l'évènement sommet,
3. Considérer chaque évènement intermédiaire comme un nouvel évènement sommet,
4. Imaginer les causes possibles de chaque évènement au niveau considéré,
5. Descendre progressivement dans l'arbre jusqu'aux évènements de base

Il est important de ne pas considérer immédiatement les évènements de bases (panne d'un composant par exemple).

Sensibilité, Facteurs d'importance :

Les composants constitutifs d'un système peuvent avoir une importance plus ou moins grande pour ce système . Un composant correspondant à un point unique de défaillance sera bien entendu plus important qu' un composant de caractéristiques équivalentes mais mis en parallèle avec d'autres composants. Sur un système de très petite taille, l'identification de ces composants importants peut se faire par une simple lecture des coupes. Mais pour un système complexe et sûr dont les coupes sont d'ordre élevé, cette lecture est impossible. C'est pourquoi des facteurs d'importance ont été introduits a fin d'établir une hiérarchie des composants. L'importance d'un composant pouvant varier suivant les objectifs recherchés, plusieurs facteurs d'importance ont été créés. Voici cinq facteurs d'importance parmi les plus utilisés :

- a. Birnbaum (aussi appelé facteur d'importance marginal)
- b. Critique
- c. Diagnostic
- d. Facteur d'augmentation de risque
- e. Facteur de diminution de risque

Attention, ces différents facteurs d'importance ne vont pas toujours dans le même "sens", il peut être difficile d'identifier formellement les composants à améliorer (en les rendant plus fiables, mieux maintenus...). C'est pourquoi il est conseillé de ne pas se fier à un seul facteur d'importance. En conclusion nous pouvons citer les avantages et limites de la Méthode "Arbre de Défaillances" comme suit :

Avantages:

L'analyse par arbre de défaillances est la plus couramment utilisée dans le cadre d'études de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité des systèmes. Elle présente en effet un certain nombre d'avantages non négligeables par rapport aux autres méthodes, à savoir :

1. Son aspect graphique tout d'abord, caractéristique particulièrement importante, constitue un moyen efficace de représentation de la logique de combinaison des défaillances. Il

participe largement à la facilité de mise en œuvre de la méthode et à la compréhension du modèle. Ainsi, il est un excellent support de dialogue pour des équipes pluridisciplinaires.

2. Le principe de l'arbre est basé sur une méthode déductive permet à l'analyste de se focaliser uniquement sur les événements contribuant à l'apparition de l'événement redouté.

3. Une fois la construction de l'arbre terminée, deux modes d'exploitation sont possibles :

- l'exploitation qualitative servant à l'identification des combinaisons d'événements critiques, la finalité étant de déterminer les points faibles du système;
- l'exploitation quantitative permettant de hiérarchiser ces combinaisons d'événements suivant leur probabilité d'apparition, et estimer la probabilité de l'événement sommet, l'objectif étant tant de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention de l'événement redouté.

Par opposition aux méthodes de simulation, l'approche analytique offerte par l'arbre de défaillances a l'avantage de pouvoir réaliser des calculs rapides (avantage tout à fait relatif au vu de l'évolution permanente de l'informatique) et exacts.

La méthode permet d'estimer la probabilité non seulement de l'événement redouté, mais aussi celle des portes intermédiaires, à partir de celle des événements de base. Il est également possible de faire de la propagation d'incertitude sur les données d'entrée, et du calcul de facteurs d'importance.

La taille de l'arbre de défaillances est proportionnée à la taille du système étudié, et pas exponentielle en fonction de cette taille.

Limites:

L'utilisation de l'arbre de défaillances devient inefficace ou difficilement applicable lorsque les caractéristiques suivantes apparaissent :

Dépendance entre les événements :

Les calculs de probabilité d'occurrence effectués par le biais de l'arbre de défaillances sont basés sur une hypothèse d'indépendance des événements de base entre eux. Par exemple, la probabilité d'apparition d'un événement de base ne peut pas dépendre de l'apparition d'autres événements de base.

Notion d'événements temporisés :

L'arbre de défaillances ne rend pas compte de l'aspect temporel des événements. Il ne peut donc considérer ni les dépendances fonctionnelles, ni les états passés. De plus, il ne permet pas de prendre en compte un ordre imposé dans lequel des événements doivent se produire pour induire une défaillance.

Système dégradé :

L'arbre de défaillances est binaire. Un événement se produit ou ne se produit pas, mais aucune notion de capacité ou d'efficacité ne peut intervenir. Par exemple, une vanne sera considérée comme ouverte ou fermée, mais sans pouvoir déterminer d'état intermédiaire.

Taille de l'arbre :

La taille n'est pas une limite en soi. Néanmoins dès qu'elle augmente de manière significative, l'arbre doit être divisé en sous arbres, et la lisibilité ainsi que la compréhension du modèle deviennent alors plus difficiles.

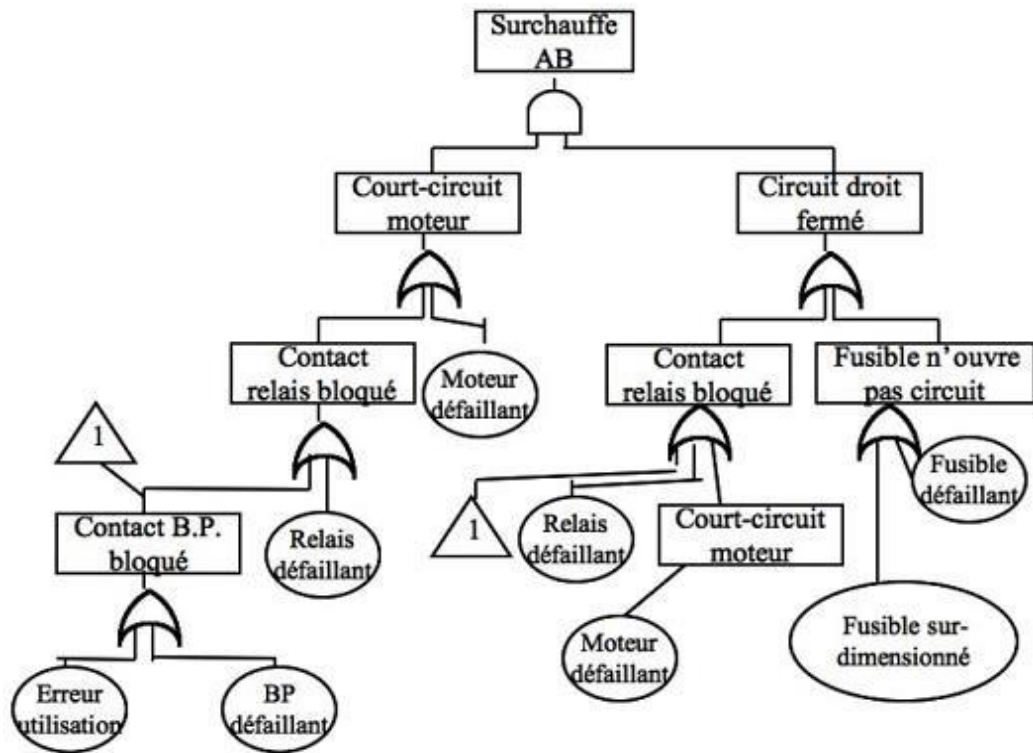


Figure 3: Exemple de la méthode Arbre de défaillances.

Chapitre II

La méthode HAZOP

II. LA METHODE HAZOP

a) HISTORIQUE DE LA METHODE HAZOP :

La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study), développée dans les années 1960 par Imperial Chemical Industries (ICI), une entreprise chimique britannique, s'est avérée essentielle pour l'examen des risques associés aux procédés chimiques complexes. Confronté aux limites des méthodes d'analyse de risque traditionnelles axées sur les défaillances techniques, ICI a conçu cette approche systémique fondée sur l'analyse des écarts des paramètres opérationnels par rapport aux intentions de conception. Par la suite, cette méthode a été formalisée dans un guide publié en 1977 par le Health and Safety Executive (HSE) du Royaume-Uni, l'organisme gouvernemental responsable de la réglementation en matière de risques industriels majeurs.

La méthode HAZOP a rapidement acquis une renommée mondiale pour l'identification des risques dans les industries de procédés, tant en Europe qu'à l'échelle internationale. Au cours des années 1980, son application s'est étendue à d'autres secteurs industriels et à diverses phases du cycle de vie des installations. Des adaptations ont également été élaborées pour analyser des systèmes complexes, tels que les interfaces homme-machine ou les logiciels de contrôle. Avec l'évolution des réglementations vers une approche plus systémique de la gestion des risques, HAZOP est devenue une méthode fondamentale pour l'analyse et la réduction des risques industriels.

Les principes et la procédure de la méthode HAZOP ont été normalisés dans les années 1980 et 1990 par des guides publiés par l'American Institute of Chemical Engineers (AIChE), le Center for Chemical Process Safety (CCPS) et la Commission électrotechnique internationale (CEI). Aujourd'hui, cette méthode est reconnue et adoptée à l'échelle internationale. Elle est référencée dans de nombreux cadres, dont la norme CEI 61511 sur la sécurité fonctionnelle des systèmes instrumentés de sécurité.

Cependant, la méthode HAZOP présente certaines limitations qui ont conduit au développement de variantes et de méthodes complémentaires. Parmi celles-ci, on peut citer HAZOP-LOPA (Layer of Protection Analysis) pour l'évaluation quantitative des risques, SAFOP (Simplified Analysis of Flowsheets) pour les analyses préliminaires et SHAZOP (Simultaneous HAZOP) pour l'analyse des interactions entre systèmes. Néanmoins, l'approche HAZOP demeure une référence pour

l'identification systématique des écarts dans les procédés chimiques et pétrochimiques. Les évolutions de cette méthode pionnière témoignent de son adaptation constante aux risques émergents et à la complexité croissante des installations industrielles.

Ainsi, au cours de ces cinquante dernières années, la méthode HAZOP s'est solidement établie en tant qu'outil de référence pour la gestion des risques, guidant l'évolution des pratiques d'analyse des dangers vers des approches plus holistiques et préventives. Son application rigoureuse par des équipes pluridisciplinaires permet d'exploiter au mieux les connaissances et l'expérience collectives afin de renforcer la sécurité des procédés industriels.

b) DEFINITIONS

1. La méthode HAZOP

une approche structurée et systématique visant à examiner les processus et les opérations dans le but d'identifier les dangers potentiels ainsi que les problèmes opérationnels. Cette méthode repose sur l'utilisation d'un ensemble de mots-guides pour déceler les écarts par rapport aux spécifications de conception. L'étude est réalisée par une équipe multidisciplinaire au cours d'une série de réunions au cours desquelles chaque aspect du processus est minutieusement analysé. Au sein de cette équipe, les causes, les conséquences et les mesures de précaution existantes sont déterminées pour chaque déviation envisagée. Les solutions recommandées pour résoudre les problèmes identifiés sont consignées.

Conformément à la norme CEI 61882, les caractéristiques principales de la méthode HAZOP sont les suivantes :

- Approche qualitative et systématique basée sur l'utilisation de mots-guides.
- Analyse menée par une équipe pluridisciplinaire.
- Examen méthodique du processus, point par point.
- Identification des écarts par rapport aux intentions de conception.
- Détermination des causes et des conséquences associées à chaque déviation.
- Identification des mesures de précaution existantes.
- Enregistrement des problèmes identifiés et des solutions recommandées.

Cette norme propose des recommandations détaillées concernant la planification, la mise en œuvre, la documentation et le suivi d'une étude HAZOP.

2. Système

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, conçus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un intervalle de temps donné. Pour chaque système, il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir : la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer.

3. Nœud

Est un emplacement spécifique dans le process où la déviation par rapport à l'intention du design est évaluée. Exemples : réacteurs, séparateurs, échangeurs de chaleur, pompes, compresseurs, pipes, etc.

4. Intention

Définit comment la partie, la section du process, etc, est sensée opérer.

5. Déviation

Écart entre les paramètres d'exploitation et les conditions du design.

6. Paramètre

Le paramètre pertinent pour les conditions du process (pression, température, composition, etc.).

7. Mots guides

Simple mots ou locutions qui sont utilisées pour qualifier l'intention pour guider et stimuler la réflexion en vue d'identifier les déviations.

Mot guide + Paramètre = Déviation

8. Cause

Les raisons qui font que la déviation a lieu. Une fois qu'une déviation est vue comme ayant une cause réaliste, concevable elle est considérée comme significative.

Plusieurs causes peuvent être identifiées pour une même déviation. Il est souvent recommandé de commencer par la cause qui engendre la plus mauvaise conséquence.

9. Conséquences

Résultats des déviations quand elles surviennent. Plusieurs conséquences peuvent provenir d'une même cause comme une conséquence peut avoir plusieurs causes.

10. Protection (barrière de sécurité)

Qui aident à réduire la probabilité d'occurrence de la déviation ou mitiger ses conséquences. Il y a des protections qui :

- Identifient les déviations (détecteurs, alarmes, etc.)
- Compensent les effets de la déviation (systèmes de contrôle automatique, etc.)
- Préviennent l'occurrence des déviations (gaz inerte dans les stockages de substances inflammables, etc.)
- Préviennent l'escalade de la déviation (ESD, etc.)
- Relayer le procédé des déviations dangereuses (PSV, événement)

Table 3: Les types des déviations des paramètres, et leurs significations

Type de déviation	Mot guide	Exemples d'interprétation
Négative	Ne pas faire	Aucune partie de l'intention n'est remplie
Modification quantitative	Plus	Augmentation quantitative
	Moins	Diminution quantitative
Modification qualitative	En plus de	Présence d'impuretés- Exécution simultanée d'une autre opération/étape
	Partie de	Une partie seulement de l'intention est réalisée
Substitution	Inverse	S'applique à l'inversion de l'écoulement dans les canalisations ou à l'inversion des réactions chimiques
	Autre que	Un résultat différent de l'intention originale est obtenu
Temps	Plus tôt	Un événement se produit avant l'heure prévue
	Plus tard	Un événement se produit après l'heure prévue
Ordre séquence	Avant	Un événement se produit trop tôt dans une séquence
	Après	Un événement se produit trop tard dans une séquence

c) MEMBRES DE L'EQUIPE HAZOP

Une analyse des dangers et de l'exploitabilité (Hazop) est menée par une équipe pluridisciplinaire comprenant plusieurs rôles clés. Dans le contexte d'une conception nouvelle, la composition habituelle de l'équipe est la suivante

1. Ingénieur de projet ou de conception:

Il s'agit généralement d'un ingénieur en mécanique, chargé de veiller à ce que les coûts restent dans les limites approuvées. L'ingénieur de projet vise à minimiser les changements tout en identifiant les risques potentiels inconnus ou les problèmes opérationnels, mettant ainsi l'accent sur une conception rentable.

2. Ingénieur des procédés :

Généralement, il s'agit d'un ingénieur chimiste qui a mis au point le schéma du processus et en connaît les subtilités.

3. Directeur de la mise en service :

Souvent un ingénieur chimiste, responsable du lancement et de l'exploitation de l'usine. Il est motivé pour préconiser des changements qui améliorent l'exploitabilité.

4. Ingénieur de conception des systèmes de contrôle :

Les usines modernes étant dotées de systèmes de contrôle et de déclenchement sophistiqués, les études Hazop nécessitent souvent l'intégration d'instruments supplémentaires, ce qui relève de la compétence de cet ingénieur.

5. Chimiste de recherche :

Engagé lorsqu'une nouvelle chimie est impliquée dans le processus.

6. Chef d'équipe indépendant :

Un spécialiste des techniques Hazop plutôt qu'un expert en procédés. Le chef d'équipe veille au respect de la procédure et possède la capacité de diriger des personnes qui ne sont pas directement responsables devant lui. Ce rôle exige une attention méticuleuse aux détails, ainsi que la capacité à équilibrer des points de vue contradictoires. Le chef d'équipe peut également intégrer les points de vue du service de sécurité si nécessaire ; dans le cas contraire, un représentant du service de sécurité doit être présent. Le rôle du chef d'équipe consiste notamment à lancer les discussions sur chaque élément de la ligne ou de l'usine et à expliquer ou à faire expliquer son objectif.

d) MISE EN ŒUVRE DE L'HAZOP

L'ensemble de l'équipe doit comprendre un éventail diversifié de connaissances et d'expériences afin d'offrir une perspective globale. Si la conception de l'usine fait intervenir plusieurs entités, l'équipe Hazop devrait comprendre des représentants de l'entrepreneur et du client, ce qui pourrait nécessiter la duplication de certaines fonctions.

Pour les usines pilotées par ordinateur, en particulier les installations de traitement par lots, l'ingénieur logiciel doit être membre de l'équipe Hazop. En outre, l'équipe devrait comprendre au moins une personne maîtrisant la logique informatique. L'absence d'une telle expertise empêche un dialogue constructif et nuit à la confiance dans la maîtrise du processus par l'ingénieur logiciel et dans le respect des exigences de conception.

Bien que l'équipe partage l'objectif commun d'assurer une usine sûre et opérationnelle, les contraintes individuelles varient. Les concepteurs, notamment l'ingénieur responsable des considérations de coût, s'efforcent de maintenir les dépenses à un niveau peu élevé. Les responsables de la mise en service cherchent à assurer un démarrage en douceur de l'installation. Ce conflit d'intérêts inhérent nécessite une évaluation minutieuse des avantages et des inconvénients de chaque proposition avant qu'une décision ne soit prise d'un commun accord. Cependant, une personnalité dominante au sein de l'équipe peut provoquer un déséquilibre, en risquant d'orienter le résultat vers des considérations économiques. Les chefs d'équipe efficaces s'efforcent de rectifier ces divergences.

Si l'équipe se trouve dans une impasse, le chef d'équipe doit proposer de reporter la question pour un examen externe. Des retards peuvent survenir pour demander l'avis d'un expert ou pour mener des recherches supplémentaires. Dans certains cas, une estimation quantitative rapide du risque peut être réalisée au cours de la réunion.

En règle générale, les points de vue convergent vers un consensus. En cas de divergence et d'intransigeance des membres de l'équipe, le chef d'équipe devrait suggérer de reporter les discussions sur la question litigieuse, en recommandant de rédiger une note décrivant les avantages et les inconvénients des différentes solutions et lignes de conduite potentielles.

L'idée que faire partie d'une équipe Hazop est une tâche banale qui ne nécessite pas de connaissances ou d'expertise spécialisées est trompeuse. Les membres de l'équipe possèdent des esprits créatifs et libres, capables de suggérer des moyens nouveaux et imaginatifs de prévenir les accidents. Dans une étude Hazop, le fait de proposer des écarts, des causes, des conséquences ou même des solutions apparemment farfelues peut inciter les autres à envisager des écarts et des solutions potentielles similaires mais plausibles.

L'un des traits distinctifs des membres d'une équipe efficace est leur amalgame mental de fragments de connaissances accumulées au fil des ans. Ces personnes peuvent se souvenir de cas où une situation similaire à celle qui fait l'objet de la discussion a entraîné un incident ailleurs. Il n'est pas nécessaire qu'ils se souviennent des détails, mais ils peuvent attirer l'attention de l'équipe sur des considérations potentielles qui méritent d'être approfondies.

Il convient de noter qu'à l'exception du chef d'équipe, les membres de l'équipe sont des experts du processus. A ce stade, ils sont immergés dans le processus depuis un ou deux ans. Hazop n'est pas une technique conçue pour intégrer de nouvelles perspectives dans la résolution de problèmes. Il s'agit plutôt d'une méthodologie qui exploite systématiquement les connaissances et l'expérience des experts en processus afin de minimiser les risques d'oubli.

La complexité des installations modernes rend difficile, voire impossible, la prévision des défaillances potentielles sans un examen systématique de la conception. Peu d'accidents sont dus au manque de connaissances des membres de l'équipe de conception ; la plupart des erreurs de conception résultent de l'incapacité à appliquer efficacement leurs connaissances. L'Hazop permet d'examiner méticuleusement la conception, ligne par ligne, espace par espace, afin d'identifier les éléments manquants.

L'équipe doit être habilitée à approuver rapidement la plupart des modifications. Les progrès sont entravés si chaque modification doit être approuvée par un personnel absent.

Certaines entreprises préconisent des rapports Hazop très détaillés, soulignant qu'ils peuvent être consultés à l'avenir si la conception est remise en question. Bien que ce point de vue soit valable, la charge de travail supplémentaire qui en découle est considérable et, dans la pratique, la plupart des rapports Hazop sont rarement, voire jamais, consultés une fois que l'usine est opérationnelle. Plusieurs logiciels facilitent désormais l'enregistrement en temps réel des résultats des études Hazop. Des copies des actions convenues et de leur justification sont immédiatement accessibles après la réunion, ce qui évite d'avoir à les réécrire ou à les saisir à nouveau. Les informations peuvent être projetées sur un grand écran pour que tous les membres de l'équipe les examinent et confirment leur accord. Ces programmes incitent également l'équipe à examiner les écarts courants et leurs causes habituelles. Les experts dans ce domaine affirment que ces programmes favorisent des réunions plus efficaces, des listes d'actions précises et moins de malentendus.

Quelques semaines après l'étude Hazop, le chef d'équipe doit réunir l'équipe, évaluer les progrès et distribuer le formulaire de rapport avec la colonne "Suivi" remplie.

Bien que la technique Hazop présente un intérêt considérable, les individus sont rarement enthousiastes à l'idée d'y participer, car elle implique une évaluation méticuleuse de chaque écart sur chaque ligne. Il est important d'éviter d'exacerber ce problème avec des procédures bureaucratiques qui mettent l'accent sur une documentation excessive.

e) PLANIFICATION ET DUREE D'UN HAZOP

La réalisation d'une analyse Hazop et sa durée sont conditionnées par diverses considérations chronologiques et logistiques. Avant tout, il est essentiel que l'ensemble des diagrammes de ligne, accompagnés des schémas de processus et d'instrumentation, soit achevé. Cette condition sine qua non étant remplie, l'analyse Hazop peut alors être envisagée. Toutefois, afin de garantir une démarche rigoureuse et efficace, il est préconisé d'entamer l'analyse dès que les conditions le permettent, de préférence avant d'entamer la phase de conception détaillée. Il convient de noter que cette "fenêtre d'opportunité" est temporellement limitée, d'où la nécessité de planifier les réunions en amont pour maximiser le temps disponible. Il est impératif d'éviter le piège de retarder l'analyse en attendant la finalisation des diagrammes linéaires, pour ensuite devoir jongler avec la disponibilité des membres de l'équipe.

Dans le contexte d'une analyse Hazop sur une installation existante, la première étape cruciale consiste à vérifier et mettre à jour les schémas de ligne, garantissant ainsi leur exactitude. Effectuer une analyse Hazop sur la base de schémas de ligne erronés serait une entreprise vaine, comparable à entreprendre un voyage avec un horaire ferroviaire datant de dix ans en arrière.

La durée d'une session Hazop varie en fonction de la complexité de l'élément principal étudié au sein de l'installation (par exemple, alambic, four, réacteur, réchauffeur, etc.). Si le processus est similaire à une installation existante, la session requiert généralement 1,5 heure par élément. En revanche, pour un processus nouveau, cette durée peut s'étendre à 3 heures par élément. Bien entendu, il est à noter que les équipes moins expérimentées mettent généralement plus de temps que celles ayant déjà acquis une expertise significative dans cette démarche.

Les sessions de travail Hazop sont généralement planifiées pour une durée maximale de 3 heures, avec des rencontres programmées 2 ou 3 jours par semaine. Cette répartition temporelle vise à préserver la capacité de l'équipe à mener à bien d'autres tâches et à éviter un épuisement prématuré de la créativité, qui tend à décliner après trois heures de travail consécutives. En cas de nécessité de réunir des membres d'équipes distantes, il pourrait être nécessaire de prévoir des sessions de travail plus étendues, par exemple, des séances quotidiennes étalées sur une semaine. Toutefois, il est conseillé de résister à la tentation de prolonger les sessions de travail au-delà de 8 heures par jour pendant une semaine, car cela risque de détériorer la qualité de l'attention et de la réflexion. Il convient de rappeler que ce sont les résultats substantiels de l'analyse Hazop qui revêtent une importance primordiale, plutôt que le nombre d'heures investies dans le processus.

Pour les projets d'envergure, l'analyse Hazop peut s'étaler sur plusieurs mois, même avec plusieurs équipes travaillant simultanément sur différentes sections de l'installation. Ainsi, deux options se présentent : (a)

retarder la phase de conception détaillée et de construction jusqu'à la finalisation de l'analyse Hazop ; ou (b) poursuivre la phase de conception détaillée et de construction tout en s'exposant à la possibilité de devoir ultérieurement ajuster la conception en fonction des résultats de l'analyse Hazop.

Idéalement, une planification devrait permettre de privilégier l'approche (a). Cependant, dans les situations où l'achèvement est urgent, l'approche (b) pourrait s'avérer incontournable.

Par ailleurs, l'analyse Hazop préliminaire peut constituer une option stratégique. Cette démarche, consistant à mener une analyse sur le schéma de traitement avant même le démarrage de la conception détaillée, s'avère nettement plus expéditive que l'analyse des diagrammes linéaires.

Des études Hazop menées conjointement par des équipes industrielles et universitaires ont souligné l'importance de consacrer du temps initial à l'explication et la contextualisation de l'analyse. Cela permet de réduire la durée globale de l'analyse elle-même. Ces études ont également mis en évidence que les cas complexes ou intéressants peuvent requérir plus de temps et que les équipes moins expérimentées ont tendance à adopter des approches rigides, engendrant des retards. Par exemple, les équipes ont généralement tendance à discuter des causes possibles d'une déviation avant d'aborder les conséquences, comme si l'existence même de causes possibles déterminait la pertinence des conséquences. Cependant, les équipes expérimentées sont plus souples et peuvent parfois privilégier une approche inverse.

f) PROCESSUS HAZOP

1. Document

Comme base de l'étude HAZOP les informations suivantes doivent être disponibles:

- Diagrammes de flux de processus ;
- Schémas des tuyaux et d'instrumentation (P & ID) ;
- Schémas d'implantation ;
- Description du procédé, logique de régulation et des sécurités ainsi que les systèmes de sécurité et les consignes opératoires ;
- Instructions de fonctionnement provisoire ;
- Bilans énergétiques et de matière et les fiches réactions ;
- Fiches de données des équipements, des produits et les procédures de démarrage et d'arrêt d'urgence.

2. Modes de fonctionnement

Les modes de fonctionnement de l'usine devraient être envisagés pour chaque nœud:

- Le fonctionnement normal ;
- Réduction des opérations de débit ;
- Routine de démarrage ;
- Arrêt de routine ;
- D'arrêt d'urgence ;
- Mise en service ;
- Modes de fonctionnement spéciaux.

g) LA MATRICE UTILISEE POUR L'EVALUATION DU NIVEAU DES RISQUES

1. Guide pour l'application des jugements subjectifs

La matrice choisie dans notre travaille est celle utilisé pour l'étude de danger du projet

		P: Probabilité				
		1	2	3	4	5
G : Gravité	1	Bas	Bas	Bas	Bas	Bas
	2	Bas	Bas	Bas	Moyen	Moyen
	3	Bas	Moyen	Moyen	Moyen	Elevé
	4	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Elevé
	5	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé	Elevé

 Risque acceptable

 Risque tolerable


 Risque inacceptable

Figure 4: Matrice d'évaluation des risques du projet

2. Interprétation des niveaux de gravité et de probabilité « Evaluation des potentiels de danger »

Les catégories de fréquence

La connaissance du procédé de production et l'historique des accidents survenus au site ainsi que les données parvenues de sites similaires doivent être utilisés pour une classification de fréquence d'occurrence appropriée. La fréquence peut être exprimée quantitativement et qualitativement. Ces catégories doivent être définies par l'exploitant du site en question.

Table 4: Interprétation des niveaux de probabilité

Echelle de probabilité	1	2	3	4	5
Appréciation quantitative (par unité et par an)	$< 10^{-5}/ \text{an}$	entre 10^{-4} et 10^{-5}	entre 10^{-3} et 10^{-4}	Entre 10^{-2} et 10^{-3}	$> 10^{-2}/ \text{an}$
Appréciation qualitative	« événement possible mais extrêmement peu probable » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations.	« événement très improbable » : s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité.	« événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations.	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives.

			significative de sa probabilité		
--	--	--	---------------------------------------	--	--

Les catégories de conséquences

La sévérité des conséquences peut être exprimée qualitativement. Les conséquences en termes de morts, blessures, atteinte à la santé, atteinte à l'environnement et aux installations, peuvent être exprimés en utilisant des définitions.

Ces catégories doivent être définies par l'exploitant du site en question.

Table 5: Interprétation des niveaux de gravité

gravité	Personnes	environnement	Valeurs matérielles
1	Blessure légère. blessure avec premier soins.	Léger dégât à l'environnement.	Dégâts faibles. Influence réduite sur la production.
2	Blessure entraînant une perte de temps. Traitement médical.	Dégât environnementaux locaux pendant une courte période.	Dégâts moyens. Influence moyenne sur la production.
3	Handicap permanent. Hospitalisation prolongée.	Durée pour restitution des ressources écologique inférieure à 2 ans.	Dégâts considérables. Influence considérable sur la production
4	Un décès.	Durée pour la restitution des ressources écologique à 2-5 ans	Dégâts graves. Longs arrêts de production
5	Plusieurs décès.	Durée pour la restitution des ressources écologique supérieures à 5ans	Démolition de l'usine ou de grandes parties de celle-ci. Très longs arrêts de production

h) PROCEDURE HAZOP

- Diviser le système en sections (par exemple : des réacteurs, stockage)
- Choisir un nœud d'étude (c.-à-ligne, un navire, une pompe, d'exploitation instruction)

- Décrire l'intention de conception
- Sélectionner un paramètre de processus
- Appliquer un guide-mot
- Déterminer la cause (s)
- Évaluer les conséquences et problèmes en utilisant la grille de criticité
- Recommander des mesures: Qu'est-ce? Quand? Qui?
- Enregistrer les informations :
 - Listes des composants critiques LCC
 - Listes par effet de défaillances LED
- Répétez la procédure (de l'étape 2).

La procédure HAZOP peut être illustrée comme suit:

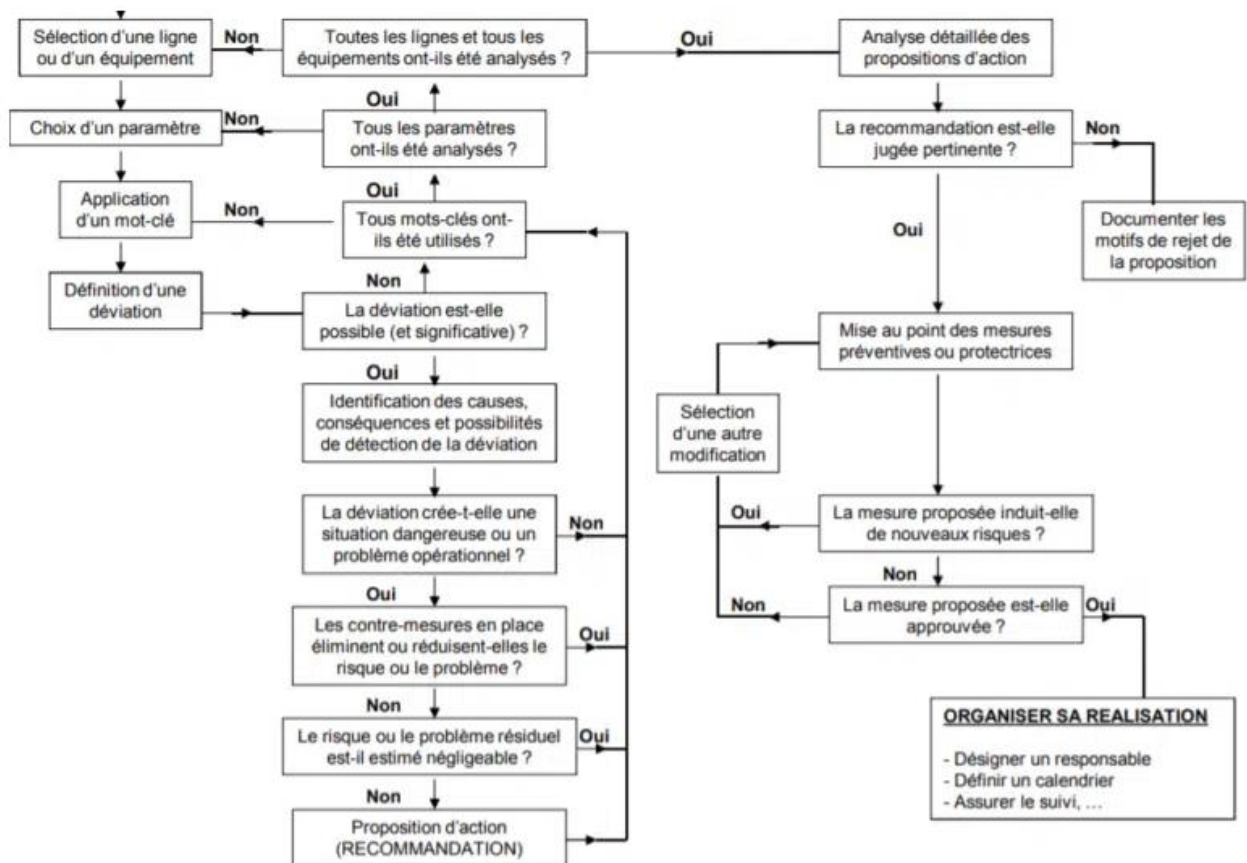


Figure 5: la procédure HAZOP

FEUILLE DE TRAVAIL DE LA METHODE HAZOP

Table 6: exemple de feuille de travail HAZOP.

Date								
Ligne ou équipement								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
N°	Mot clé	Paramètre	déviation	Causes	Conséquences	Détection	Protection	Actions d'amélioration

Table 7: Feuille de travail de la méthode HAZOP

HAZOP de l'unité :										
Circuits :										
Feuille d'analyse n°				Paramètre :				Valeur du design :		
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)				recommandations	Réévaluation du risque (R)	Observations
				PP	PR	G	R			

i) ENREGISTREMENT HAZOP

- Les conclusions atteintes durant l'étude devraient entièrement enregistrées.
- Le rapport HAZOP représente typiquement le seul enregistrement compréhensif de l'étude HAZOP.
- La sélection des éléments à inclure dans le rapport devrait être arrêtée d'un commun accord durant la phase planification de l'étude.
- Il est particulièrement important d'enregistrer les détails suffisants à même de permettre aux personnes qui n'ont pas assisté aux réunions de comprendre parfaitement les problèmes potentiels soulevés.

j) RESULTATS HAZOP

Amélioration du système ou les opérations :

- Réduction des risques et une meilleure intervention ;
- Les opérations plus efficaces ;

Amélioration des procédures :

- L'ordre logique ;
- Exhaustivité ;
- Prise de conscience générale entre les parties prenantes ;
- Constitution de l'équipe.

k) AVANTAGES

- Examen systématique
- Étude pluridisciplinaire
- Utilise l'expérience opérationnelle
- Les couvertures de sécurité ainsi que des aspects opérationnels
- Solutions aux problèmes identifiés peuvent être indiquées
- Considère les procédures opérationnelles
- Couvre les erreurs de l'homme
- Étude menée par une personne indépendante
- Les résultats sont consignés

l) LIMITES:

- Dans certains cas, cette méthode peut être perçue comme point faible puisqu'elle ne peut pas traiter les défaillances complexes faisant intervenir plusieurs processus.
- HAZOP permet difficilement d'analyser les événements résultant de la combinaison simultanée de plusieurs défaillances
- Il est par fois difficile d'affecter un mot guide à une portion bien délimitée du système étudié. Cela complique singulièrement l'identification exhaustive des causes potentielles d'une déviation
- Le système étudié sont souvent composés de parties interconnectées si bien qu'une déviation survenant dans une ligne ou maille peut avoir des conséquences ou à l'inverse des causes dans une maille voisine et inversement. Bien entendue, il est possible a priori de reporter les implications d'une déviation d'une partie à une autre du système. Tout fois cette tache peut rapidement s'avérer complexe

m) LES FACTEURS DE REUSSITE

- Précision des dessins et des données utilisées comme base pour l'étude.
- L'expérience et les compétences du chef d'équipe HAZOP.
- Les compétences techniques et des idées de l'équipe.
- Capacité de l'équipe d'utiliser l'approche HAZOP comme une aide à repérer les écarts, les causes et conséquences.
- Capacité de l'équipe à maintenir un sens de la mesure, en particulier lors de l'évaluation de la gravité des conséquences potentielles.

Chapitre III

Application de la méthode HAZOP sur L'Echangeur cryogénique principal 15-MC05

III. APPLICATION DE LA METHODE HAZOP SUR L'ECHANGEUR CRYOGENIQUE PRINCIPAL 15-MC05

a) INTRODUCTION

L'évaluation des risques est une étape cruciale pour garantir la sécurité des installations industrielles, en particulier celles qui manipulent des produits potentiellement dangereux, comme les usines de traitement de gaz naturel. L'objectif de cette étude est d'effectuer une analyse approfondie des risques au sein de la section de liquéfaction du gaz naturel du projet méga train de GNL à Skikda.

L'équipement sélectionné pour une analyse détaillée est l'échangeur cryogénique principal 15-MC05, qui occupe une place centrale dans le processus de liquéfaction. La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) est utilisée pour évaluer les risques liés à cet équipement critique et pour s'assurer de l'adéquation des mesures de sécurité mises en place.

L'industrie du gaz naturel liquéfié (GNL) fait appel à des procédés complexes qui fonctionnent dans des conditions de température et de pression extrêmement rigoureuses. Des températures cryogéniques pouvant atteindre -160°C sont employées pour liquéfier le gaz naturel, tandis que les pressions de stockage et de transport peuvent dépasser les 100 bars. La combinaison de fluides cryogéniques et de pressions élevées engendre des risques significatifs qui doivent être identifiés et atténués afin d'assurer la sécurité et la fiabilité des opérations. L'une des étapes cruciales dans la gestion de ces risques consiste à réaliser une évaluation systématique des risques associés aux unités de traitement du GNL.

Ce chapitre présente une étude des dangers et de l'exploitabilité (HAZOP) appliquée à l'échangeur de chaleur cryogénique principal (MCHE) du nouveau méga train de GNL GL2K au complexe de Skikda en Algérie. L'étude HAZOP analyse méthodiquement les déviations potentielles des paramètres clés dans le but d'identifier les dangers, les causes, les conséquences et les mesures de protection existantes. Cette étude génère également des recommandations visant à réduire les niveaux de risque. La réalisation d'une étude HAZOP est considérée comme une pratique exemplaire dans l'industrie des installations cryogéniques de GNL, en conformité avec des normes telles que l'API RP 581 et la NFPA 59A [1,2].

Le complexe de Skikda abrite actuellement un unique train de GNL (GL1K) d'une capacité de 4,5 millions de tonnes métriques par an. Un incident catastrophique survenu en 2004 a entraîné la

destruction de trois trains de liquéfaction, actuellement remplacés par un méga train moderne dont la capacité de production et l'efficacité ont été optimisées. Le nouveau train GL2K intègre la technologie de dernière génération et est en conformité avec les normes et codes internationaux.

Le méga train se compose de plusieurs unités de traitement, parmi lesquelles le traitement des gaz d'alimentation, la liquéfaction et le stockage des produits. Le cœur du processus de liquéfaction réside dans le MCHE, où des réfrigérants tels que le propane et le réfrigérant mixte (MR) sont utilisés pour condenser le gaz naturel à des températures cryogéniques. L'échangeur 15-MC05, au cœur de cette étude HAZOP, assure le refroidissement et la liquéfaction du gaz naturel d'alimentation en utilisant des boucles de réfrigération doubles dans une configuration à plaques d'aluminium brasées multi-passages. Par la suite, le gaz liquéfié est soumis à un traitement pour éliminer les hydrocarbures lourds et répondre aux spécifications finales du produit GNL.

b) HAZOP METHODOLOGIE

L'approche HAZOP implique une équipe pluridisciplinaire qui analyse systématiquement chaque section du processus pour identifier les écarts potentiels par rapport au comportement attendu [3]. Cette méthode offre une manière structurée et systématique d'explorer les risques liés aux procédés, ce qui est particulièrement adapté aux systèmes cryogéniques complexes tels que les installations de GNL. Les directives du CCPS et de l'AICHE recommandent l'application de la méthode HAZOP aux processus de liquéfaction de GNL en raison des risques associés à des accidents majeurs [4].

L'objectif de l'HAZOP est d'examiner méticuleusement toutes les déviations crédibles des paramètres clés et d'analyser leurs causes, conséquences, mesures de protection et solutions au sein du système MCHE. Il s'agit d'un outil exhaustif pour l'identification des dangers et l'évaluation des risques. Parmi les paramètres clés examinés figurent la température, la pression, le débit, la composition, la contamination, la perte d'utilités, etc. Les causes typiques incluent la perte de refroidissement, le blocage ou la restriction du débit, les changements de composition, les défaillances de vannes, les problèmes liés au système de contrôle et les incidents externes. Les conséquences peuvent aller d'une efficacité réduite à des dommages catastrophiques aux équipements, voire à la perte de confinement.

Grâce à une analyse approfondie des causes, des conséquences et des mesures de protection déjà en place, l'équipe HAZOP est en mesure d'évaluer les niveaux de risque et de déterminer où des couches de protection supplémentaires ou des mesures d'atténuation pourraient s'avérer nécessaires. L'équipe formule également des recommandations concrètes pour faire face aux risques jugés inacceptables. Ces recommandations peuvent impliquer la révision des hypothèses de conception, l'ajout de

systèmes de secours, la mise en place de procédures plus sécurisées, l'intégration d'instruments supplémentaires, l'amélioration des processus d'inspection et de maintenance, ainsi que l'installation de protections physiques telles que des digues ou des murs anti-explosion.

L'étude HAZOP est menée par une équipe disposant d'une expertise interfonctionnelle en lien avec le processus GNL, couvrant notamment les domaines de l'ingénierie, des opérations, de la maintenance et de la sécurité. La participation active du personnel ayant une connaissance pratique des procédés est essentielle pour identifier les écarts et les causes réalistes, évaluer les conséquences et proposer des mesures de protection fondées sur l'expérience opérationnelle. Au besoin, d'autres spécialistes peuvent être consultés pour apporter un éclairage sur des aspects tels que la corrosion, la conception mécanique, le contrôle des procédés, les facteurs humains et la gestion des alarmes.

Un facilitateur guide l'équipe à travers chaque section du P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) en utilisant des mots guides pour examiner systématiquement les déviations potentielles [3]. Dans le contexte du MCHE, cela implique d'examiner chaque entrée, sortie, flux de recyclage et composant majeur. Des enregistrements détaillés sont conservés pour documenter les résultats et les recommandations. Une fois l'analyse achevée, les recommandations sont consignées dans un système de suivi des actions pour assurer leur mise en œuvre efficace.

La réalisation d'une étude HAZOP avant la finalisation de la conception détaillée offre l'avantage d'optimiser l'élimination ou la minimisation des risques. Cependant, cette méthode peut également être appliquée avec succès à tout moment du cycle de vie de l'installation pour identifier des opportunités d'amélioration. Une revalidation périodique de l'HAZOP est préconisée par la NFPA 59A et l'API RP 581 afin de prendre en compte l'évolution des conditions au fil du temps [1,2]. Ce processus d'amélioration continue permet de réduire les risques au niveau le plus bas possible.

L'analyse HAZOP présentée dans ce chapitre constitue une étude de cas éclairante quant à l'application de cette technique à un système de liquéfaction de GNL dans un contexte réel. Bien que l'analyse soit spécifiquement liée au méga train de Skikda, les concepts et les principes démontrés peuvent être étendus à tout processus cryogénique complexe. Cette étude souligne l'importance vitale des analyses HAZOP dans l'identification des déviations potentielles propres aux procédés des usines de GNL, ainsi que dans la découverte de dangers critiques pouvant passer inaperçus. Dans l'ensemble, l'étude HAZOP illustre les meilleures pratiques de l'industrie en matière d'atteinte de niveaux élevés d'intégrité de sécurité dans la conception et l'exploitation de telles installations à haut risque.

c) PRESENTATION GENERALE DU COMPLEXE

La Société nationale pour la recherche, la production, le transport et la commercialisation des hydrocarbures (Sonatrach) a prévu la construction d'un nouveau train GNL dans les limites géographiques de l'actuel complexe Skikda GL1.K. Le nouveau train GNL remplace les trois trains de liquéfaction, détruits en 2004 par un incendie et une explosion, dont la capacité de production pouvant atteindre 4.5 million de tonnes métriques par an. Le projet consiste en particulier en ce qui suit :

- Construction d'un nouveau train GNL intégré dans le complexe GL1.K existant ;
- Installation d'un nouveau réservoir de stockage GNL, d'un réservoir de stockage de propane, d'un nouveau réservoir de stockage de butane et d'une sphère de stockage de gas-oil, le tout intégré dans le complexe GL1.K existant ;
- Réalisation des modifications nécessaires pour produire du propane et du butane dans le train 10 afin de remplacer la production Bu/pro actuelle ;
- Désaffectation, démontage, dépose, stockage et enlèvement des deux réservoirs de stockage GNL existants du Pôle 1 du complexe GL1.K ; et
- Modification des réseaux-torches existants.

Aujourd'hui, la grande majorité des usines de liquéfaction dans le monde utilisent le procédé APCI (Air Product and Chemicals Incorporation).

Le nouveau train GNL utilise le procédé de liquéfaction APCI, qui comprend principalement de:

- Une boucle de réfrigération (pré refroidissement) au propane qui sert à refroidir environ 2/3 du réfrigérant principal et Pré refroidir le gaz naturel traité avant leur entrée dans l'échangeur principal cryogénique.
- Une boucle de réfrigération au réfrigérant mixte (MR), son rôle est de refroidir et liquéfier le gaz naturel dans l'échangeur principal cryogénique.
- Une boucle externe de réfrigération au propane, qui sert à pré refroidir environ 1/3 du réfrigérant principal et assurer la réfrigération pour les échangeurs de l'unité de fractionnement.
- Un échangeur principal de type bobiné pour la liquéfaction. Cet échangeur est constitué d'une calandre en aluminium et de plusieurs faisceaux de tubes en aluminium enroulés autour d'un noyau central (mandrin).

d) DESCRIPTION DU PROCEDE

Le nouveau projet méga train de liquéfaction du gaz naturel GL2K de skikda, porte sur les sections ci-dessous :

- Train GNL ;
- Unité de fractionnement ;
- Infrastructures or site comprenant : stockage GNL, le propane, le butane et l'essence ;
- Production d'électricité, traitement d'eau, réseau-torche et système d'eau incendie ;
- Sous-station électrique, chambre d'instrument de terrain, bâtiment pour la commande à vitesse variable, bâtiment de commande résistant aux explosions et bâtiment pour le laboratoire.

Le Nouveau Train de GNL n'utilise pas d'eau de mer (sauf pour le réseau incendie). Il n'utilise pas de la vapeur. Les échangeurs (rebouilleurs et réchauffeurs) utilisent de l'huile comme fluide de chauffage. Cette huile est elle-même chauffée par les gaz d'échappement de la turbine d'entraînement du compresseur principal de propane, ainsi par un four.

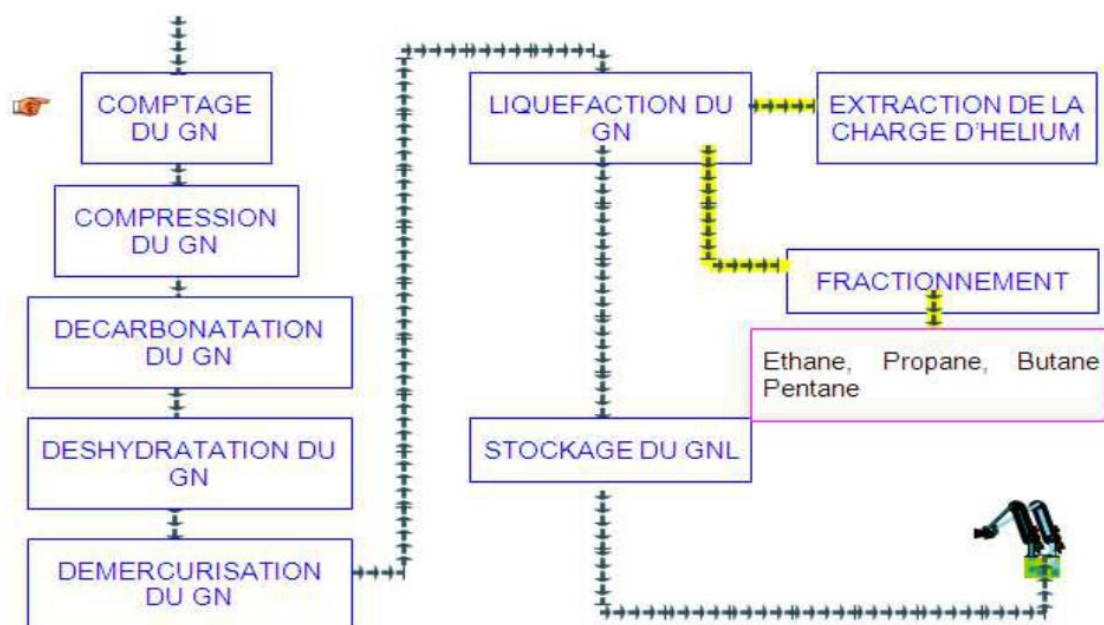


Figure 6: Les principales étapes de la liquéfaction du gaz naturel

1. Conditionnement du gaz d'alimentation et système de compression

La charge en gaz naturel pour le complexe arrive par gazoduc des champs de Hassi R'Mel. La zone de conditionnement de l'alimentation de l'usine est conçue pour supprimer les contaminants

solides et liquides, pour mesurer le gaz d'alimentation et pour mettre le gaz à la pression requise par l'usine de traitement GNL en aval.

Une prise de gaz d'alimentation (en amont de séparateur pour le compresseur de gaz d'alimentation) permet de répondre à la demande totale de gaz combustible de l'unité GNL.

2. Enlèvement du gaz acide (décarbonatation)

Une unité d'enlèvement du gaz acide (AGRU) est prévue pour retirer le CO₂ de l'alimentation en gaz brut, placé en aval de l'unité de conditionnement. Ce processus sera effectué via absorption chimique dans un solvant pauvre « une solution aqueuse de di-éthanol-amine méthylique activé (MDEA(a)) ». L'eau condensée entraînant les vapeurs d'amine seront récupérés dans l'unité de séchage et renvoyés vers le ballon de reflux de régénérateur de solvant.

3. Séchage

L'unité de séchage située en aval de l'AGRU, sert à enlever l'eau du gaz d'alimentation afin d'éviter le gel d'eau dans les sections cryogéniques de l'unité de liquéfaction.

Le gaz d'alimentation des sécheurs subira un pré-refroidissement pour réduire la teneur en eau, qui sera éliminée au niveau d'un séparateur, ceci réduit la charge sur les sécheurs à tamis moléculaire.

4. Unité d'enlèvement de mercure

Le gaz sec traité en provenance des déshydrateurs est filtré avant d'être envoyé à l'unité d'enlèvement de mercure.

Le gaz de d'alimentation passe dans l'absorbeur de mercure qui contient un lit de charbon actif imprégné de soufre, ce qui réduit la teneur en mercure du gaz à moins de 5 ng/Nm³.

5. Liquéfaction du gaz naturel

Le flux de méthane refroidi depuis le MCHE, une combinaison de vapeur de distillat de tête de la tour de lavage, de distillat de tête du déméthaniseur et de réinjection du GPL, est le principal composant du GNL et il est envoyé vers le MCHE pour la liquéfaction.

Le flux GNL qui quitte le MCHE traverse le détendeur de GNL où la pression est réduite. Le produit GNL est ensuite envoyé vers le ballon de détente à hélium GNL. Depuis le ballon de détente à hélium/GNL, le produit GNL liquide est envoyé d'abord dans le rebouilleur du rectificateur d'azote où la majorité de l'azote du GNL est retirée. Le GNL s'écoule ensuite en bas de rectificateur d'azote dans l'aspiration des pompes GNL qui envoient le GNL vers le nouveau réservoir de stockage.

6. Détendeurs

Deux détendeurs liquides sont installés sur le courant du produit GNL et MR lourd qui quitte le MCHE. Cette unité produit l'électricité qui, associée à l'alimentation électrique externe qui alimente les circuits de distribution locaux pour le nouveau train GNL.

7. Extraction d'hélium

Le GNL du haut du MCHE passe au travers du détendeur liquide et est détendu brusquement dans le ballon de détente d'hélium/GNL ou le courant GNL et le courant de vapeur riche en hélium sont séparés. Le courant riche en hélium est envoyé vers une nouvelle usine à hélium ou l'hélium (et un peu d'azote) est extrait et liquéfié.

8. Fractionnement

L'unité de fractionnement retire les hydrocarbures plus lourds du gaz d'alimentation qui auront un impact sur les caractéristiques du produit GNL, et qui présentent le risque de congélation dans l'échangeur de chaleur cryogénique principal (MCHE).

L'unité de fractionnement comprend les colonnes de distillation suivantes :

- Déméthaniseur ;
- Dé-éthaniseur ;
- Dépropaniseur ;
- Débutaniseur ; et
- Déisopentaniseur.

Après le traitement, le gaz est pré-refroidi dans des condenseurs à propane (BP, MP, HP), et envoyé vers la colonne de lavage, là où les hydrocarbures lourds C_2^+ sont retirés du gaz naturel d'alimentation.

Les fonds de tour de lavage sont envoyés vers l'unité de fractionnement pour produire l'éthane, le propane, le butane, l'appoint de réfrigérant, la réinjection et le produit requis. Le condensat (ou essence naturelle) est envoyé en tant que produit.

9. Réinjection du GPL

Le butane sortant du débutaniseur est refroidi, puis mélangé avec l'éthane et le propane issus de l'unité de fractionnement, pour être réinjecter dans le circuit GNT dans le MCHE.

10. Stockage du GNL, du gaz de transfert et des évaporats

- Un bac de stockage de GNL de 150 000 m³. Il est du type confinement intégral avec une structure extérieure en béton armé précontraint à toit suspendu et une cuve interne en acier à 9% de nickel

Les gaz d'évaporation des bacs (boil off) et de retour des méthaniers durant le chargement sont repris par des compresseurs et envoyés dans le réseau Fuel Gas et/ou recyclés à l'entrée de l'unité de liquéfaction du Nouveau Train de GNL.

- Un bac de stockage de propane de capacité totale de 66 000 m³ (type confinement intégral).
- Un bac de stockage de butane de capacité totale de 66 000 m³ (type confinement intégral).
- Une unité de réfrigération de GPL (propane et butane).

Cette unité reçoit :

- Les gaz d'évaporation des bacs de propane et de butane du Nouveau Train . Ce boil off est liquéfié puis est renvoyé au stockage au Nouveau Train.
- Le retour gaz des navires GPL durant les chargements. Ce boil off est liquéfié puis est renvoyé au stockage au Nouveau Train.
- Le butane et le propane chauds venant de la Raffinerie de Skikda (RA-1/K). Ces produits sont sous-refroidis puis renvoyés au stockage dans les bacs du Nouveau Train de GNL.
- Une sphère de stockage de gazoline de capacité totale de 3 760 m³.

11. Les utilités

Ces installations fournissent les utilités nécessaires au fonctionnement du Nouveau Train de GNL.

- L'énergie électrique :
 - 5 Diesel Générateur d'une puissance unitaire de 1,8 MW.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique nécessaire pour le démarrage et pour l'arrêt sécurisé des installations.

- 5 turbo générateurs (turbines à gaz entraînant des alternateurs) d'une puissance unitaire de 25 MW.

Ces équipements servent à fournir l'énergie électrique pour tous les consommateurs du Nouveau Train de GNL et, après raccordement, aux installations existantes (GL-1/K).

- 6 sous stations pour la distribution électrique.
- La production d'air instrument et d'air service comprenant :
 - 3 compresseurs d'une capacité unitaire de 3300 Nm³/heure, munis d'une batterie de sècheurs et de ballons de recette associés.

Cette unité produit de l'air instrument sec pour les besoins de l'instrumentation (vannes, positionneurs, etc.) ainsi que de l'air service non séché pour les besoins utilitaires des installations (nettoyage par exemple).

- La production d'eau potable à partir du réseau d'eau industrielle (de barrage) fournie par le complexe GL-1/K. Cette eau est traitée dans un package spécial pour être amenée aux conditions sanitaires exigées avant sa mise à la consommation.

NB : Le reste des utilités est fourni par le complexe GL-1/K existant

- L'azote qui sera utilisé durant les opérations de mise sous atmosphère inerte des installations lors des opérations de maintenance ou de préparation de démarrage.
- L'eau déminéralisée, utilisée pour les circuits de réfrigération de l'huile des machines tournantes et pour la préparation et le maintien de la concentration de la solution MDEA utilisée pour la décarbonatation du gaz naturel.

12. Circuit du gaz combustible

Le combustible (Fuel Gaz) qui alimente les turbines à gaz des générateurs électriques et des compresseurs du train de liquéfaction a pour origine :

- Le ballon de flash de flash GNL en fin de liquéfaction.
- Un appoint de gaz naturel
- Le retour de Fuel Gaz de l'usine HELISON mitoyenne.

13. Le système torche et brûlot

- Une torche recevant les effluents gazeux des unités du Nouveau Train de GNL et du complexe existant. La hauteur de cette torche est de 150 m. Elle est montée sur un seul derrick comprenant 3 futs (2 pour le Nouveau Train : torche chaude/torche froide et 1 pour les unités existantes de GL-1/K).
- Une torche basse pression (torche confinée) recevant le torchage de boil off du nouveau Train de GNL et du complexe GL-1/K existant.
- Un brûlot recevant les liquides torchés à partir du Nouveau Train de GNL et du complexe existant.

e) APPLICATION DE LA METHODE HAZOP SUR L'ECHANGEUR CRYOGENIQUE PRINCIPAL 15-MC05

1. Description détaillée de la section considérée « section liquéfaction du gaz naturel 15 » [14]

Principe générale de liquéfaction

On liquéfie un gaz en abaissant sa température ou en augmentant sa pression. Dans la pratique, pour liquéfier le gaz naturel, on combine les deux moyens. Plus la pression est élevée moins basse est la température à atteindre pour liquéfier ce gaz. Donc, on augmente suffisamment sa pression puis on enlève de la chaleur.

L'extraction de cette chaleur est obtenue par le biais d'un fluide réfrigérant qui « s'auto refroidit » par détente, après avoir lui-même été pré-refroidi par un autre fluide réfrigérant ce réfrigérant est par la suite circulé à contre courant dans un échangeur cryogénique où il va extraire la chaleur contenue dans le gaz naturel.

Principe général du cycle de réfrigération

Le cycle de réfrigération simple suit le processus suivant :

- Le réfrigérant est comprimé et sa température s'élève.
- Ce gaz comprimé est ensuite refroidi et condensé à pression constante (aux pertes de charge près)
- Le liquide obtenu est détendu dans une vanne provoquant un début de vaporisation
- Dans l'échangeur, il échange de la chaleur avec le fluide à réfrigérer (le gaz naturel) et est vaporisé avant d'être aspiré par le compresseur.

Circuit gaz naturel dans la liquéfaction

Le gaz naturel traité sortant du démercuriseur est pré-refroidi au propane avant son entrée à la tour de lavage. Les produits de fond de la tour de lavage 15-MD01 sont dirigés vers le fractionnement. Les produits de tête constitués en majorité de méthane, sont envoyés à l'entrée de l'échangeur principal.

Principe de fonctionnement de la tour de lavage

La colonne de lavage 15-MD01 est alimentée au niveau du 4^{ème} plateau par le gaz naturel pré-refroidi à -35°C dans les échangeurs 15-MC01/02/03 par la boucle principale de propane.

Le rebouillage est assuré à 82 °C par un rebouilleur à huile chaude 15-MJ01/A. Le reflux provient du liquide à -55 °C retournant du bout chaud de l'échangeur principal. Les produits de fond (C2+) alimentent le fractionnement.

Les produits de tête (85% de méthane) à -40 °C sont dirigés vers le bout chaud de l'échangeur principal cryogénique.

Echangeur cryogénique principal (MCHE) 15-MC05

Rôle : Refroidir et condenser la charge de gaz naturel.

Description : Cet échangeur est de type bobiné à faisceau et calendrier en aluminium. Il comporte trois faisceaux principaux.

- Le faisceau gaz naturel / GNL.
- Le faisceau MR vapeur.
- Le faisceau MR liquide.

Sur le plan process, il est divisé en trois parties :

- Le bout chaud ou partie inférieur, là où commence le refroidissement du gaz naturel dans l'échangeur.
- Le bout médium, là où commence le refroidissement du GNL revenant de la tête du ballon 15-MD02 (ballon de reflux de la tour de lavage) et où se fait la détente du MR liquide venant de l'expander 16-MJ06.
- Le bout froid ou partie supérieure, là où se termine la liquéfaction du gaz naturel et où s'effectue, à travers la 16-CRV-1035, la détente du MR, auparavant liquéfié et sous refroidit.

CHAPITRE III APPLICATION DE LA METHODE HAZOP SUR L'ECHANGEUR CRYOGENIQUE PRINCIPAL 15-MC05

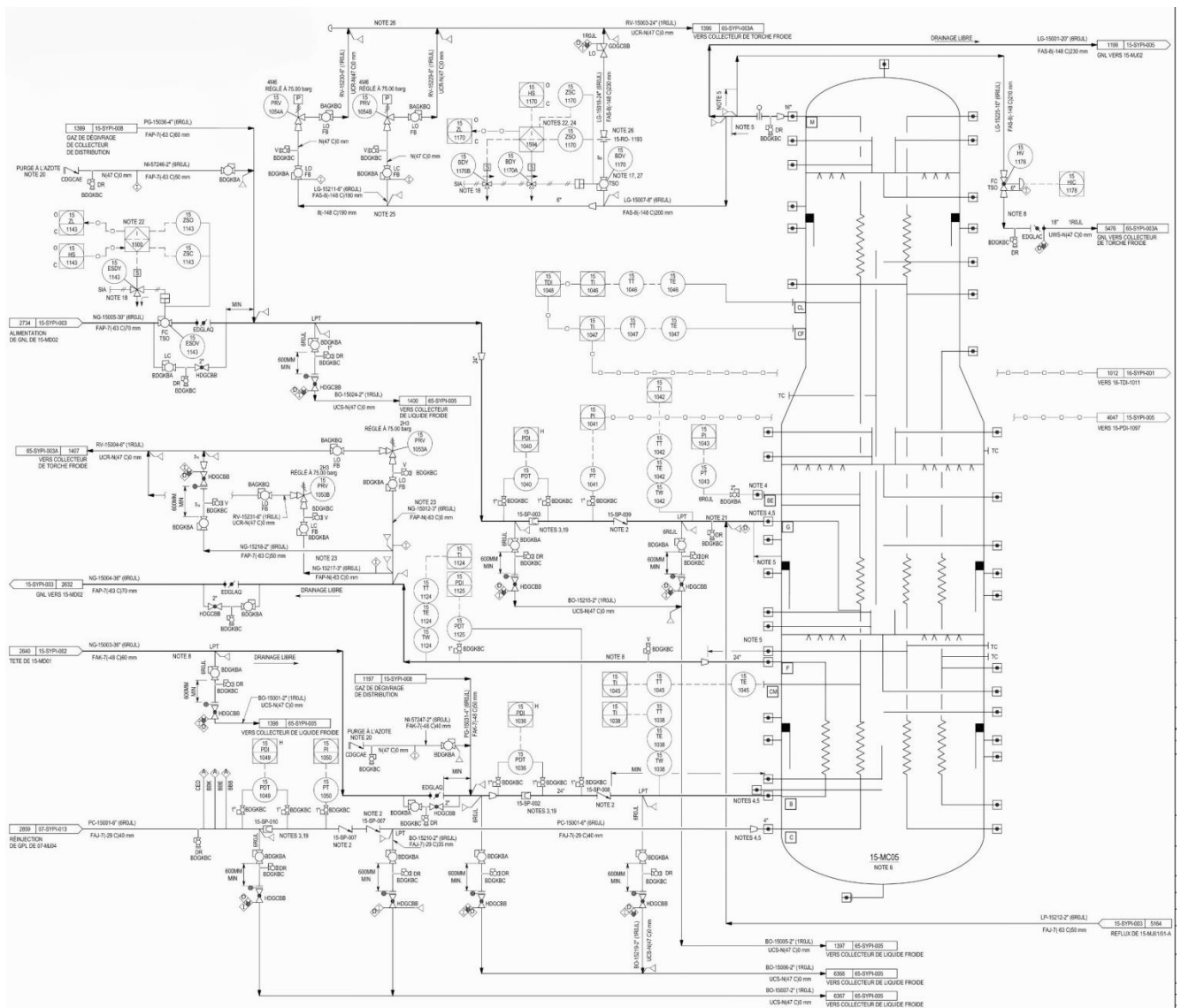


Table 8: Caractéristiques techniques principales de l'échangeur de chaleur cryogénique

	coté GNL	Coté MR
DIAM INT : HAUT ×T/T	2763 mm/14859 mm	2763 mm/14859 mm
DIAM INT : BAS×T/T	4603 mm/33749 mm	4603 mm/33749 mm
PRESSION MAXIMALE NOMINALE	75 bar	10.3 bar
TEMPERATURE MAXIMALE NOMINALE	66 C/-176 C	66 C/-176 C
MATEREAU DE CONSTRUCTION	AL	AL

Circulation des fluides

Gaz naturel : Le gaz naturel sortant en tête de la tour de lavage à une température de -40°C entre par le bas au bout chaud de l'échangeur principal 15-MC05.

Il circule de bas en haut de l'échangeur puis est progressivement refroidit puis condensé par :

- Le MR liquide venant de l'expander 16-MJ06, détendu coté calandre et circulant à contre courant de haut en bas.
- Le MR liquide/vapeur détendu dans la vanne 16-CRV-1035 coté calandre circulant à contre courant de haut en bas.

MR liquide : Le MR liquide venant du fond du ballon séparateur 16-MD08 entre par le bas de l'échangeur et circule coté tube vers le haut. Le MR liquide ressort de l'échangeur, est détendu dans l'expandeur 16-MJ06 puis dans la vanne 16-FV-1037B, vers la calandre de l'échangeur et circule de haut en bas pour refroidir le gaz naturel, MR vapeur est s'auto-refroidir. Il est aussi refroidit par le MR qui circule coté calandre depuis la tête de l'échangeur vers le bas.

MR vapeur : Le MR vapeur venant de la tête du ballon séparateur 16-MD08 entre par le bas de l'échangeur et circule coté tube vers la tête de l'échangeur. Le MR ressort liquide à -146°C de l'échangeur et détendu dans la vanne 16-CRV1035 vers la calandre de l'échangeur et circule de haut en bas pour refroidir le gaz naturel, le MR liquide et s'auto-refroidir.

Nb : Tout le MR détendu coté calandre retourne à l'état vapeur par le bas de l'échangeur principal, vers l'aspiration du compresseur MR 16-MJ01.

. Expander de GNL 15-MJ02

Rôle : Effectuer la détente du GNL sortant de l'échangeur principal de 44.9 bar eff à 20.8 bar eff, et récupérer de l'énergie électrique sur le générateur intégré.

Expander 15-MJ02 est monté dans un ballon vertical avec un générateur intégré sur un arbre commun qui produit une puissance nominale de 1.059 Mw.

Extraction d' HELIUM

Le produit GNL à partir de l'expander 15-MJ02 est séparé de l'hélium dans le ballon de flash 15-MD03, de 21bar à 4.4 bar.

Le débit de vapeur riche en hélium (7.9 mol %) est envoyé vers le 15-MC06 dans lequel il est chauffé puis envoyé vers l'aspiration du compresseur d'hélium riche 15-MJ05 ; pour l'envoyer vers HELISON.

Le débit liquide à partir du 15-MD03 alimente le désazoter 15-MD04.

Extraction d'azote

Dans le ballon 15-MD04 le GNL est séparé du gaz riche en azote (40% azote, 60% méthane).

Ce gaz (0.26 bar eff), récupéré en tête du 15-MD04, est envoyé vers le compresseur de fuel gas du train après avoir été réchauffé dans le 15-MC06 et le 15-MC11 (refroidisseur de gaz de régénération des sécheurs).

Le produit GNL en fond du ballon est envoyé au bac de stockage 71-MF01 par les pompes 15-MJ03/A à une pression de 6 bar eff et une température de -160.35°C.

2. Principe de fonctionnement de l'équipement étudiée « échangeur cryogénique 15-MC05 » [13]

La partie supérieure de la Tour de lavage est une colonne de distillation qui sert à enlever les hydrocarbures lourds.

Comme le flux de vapeur combinée s'élève dans la section supérieure de la colonne de lavage, il est lavé des hydrocarbures lourds par un flux de liquide froid venant du Ballon de Reflux de la Tour de lavage 15-MD02 et ce, avant de quitter la Tour pour entrer dans le faisceau chaud 15-MC05 du MCHE.

Le gaz naturel est partiellement condensé dans le faisceau chaud du MCHE 15-MC05. Un retour en GPL à partir du fractionnement peut être ajouté au flux de gaz naturel à l'entrée du MCHE pour augmenter la quantité de liquide présent dans le flux d'alimentation à la sortie du faisceau chaud.

Ensuite, le flux d'alimentation sort du MCHE vers le Ballon de reflux de la Tour de lavage 15-MD02, où les liquides sont séparés pour retourner à la partie supérieure de la Tour.

La température du ballon de reflux est contrôlée en by-passant le faisceau chaud du MCHE avec du gaz d'alimentation.

Le gaz du Ballon de Reflux de la Tour de lavage retourne au MCHE où il est rejoint à l'intérieur du MCHE par un flux de réinjection de l'unité de fractionnement.

Le flux combiné est encore refroidi et liquéfié dans le faisceau Médian du MCHE et subit ensuite un refroidissement final dans le faisceau froid du MCHE.

Le flux de gaz naturel liquéfié (GNL) sortant du MCHE 15-MC05 est détendu dans l'Expander du GNL à une pression d'environ 20 bar.

3. Evaluation des risques sur l'échangeur cryogénique 15-MC05

Le choix d'une technique doit se faire d'une façon appropriée au système considéré. Dans notre cas nous allons appliquer la technique particulièrement indiquée aux systèmes thermo hydrauliques en l'occurrence HAZOP.

Cette méthode présente un caractère systématique et méthodique ; c'est une technique créative qui a largement prouvé qu'elle était efficace et économique à long terme. De plus, HAZOP est une technique compréhensive, identifie les causes, considère les conséquences, inclut les barrières de sécurité, considère les procédures opératoires, couvre les erreurs humaines et dont les résultats sont enregistrés. C'est une technique complète. Elle identifie tous les dangers relatifs au process, elle est rigoureuse et enfin structurée.

Les documents utilisés dans cette approche sont les suivants :

- Les plans d'implantation
- Les PFD et les P&D
- Manuels opératoire de l'unité.
- Les diagrammes cause et effet
- Manuel opératoire du principal échangeur de chaleur cryogéniques Project LNG skikda APCI

f) L'APPLICATION DE L'HAZOP SUR L'ECHANGEUR CRYOGENIQUE 15-MC05

Dans le cadre de ce projet, la société Sonatrach suit les directives émises par Kellogg Brown & Root (KBR) concernant l'utilisation de nombres naturels pour coder les valeurs de Probabilité

Potentielle (PP), Probabilité Résiduelle (PR), Gravité (G) et Risque (R) calculé. Bien qu'il soit d'usage courant d'exprimer ces valeurs en puissances de 10, KBR préconise l'usage de nombres naturels de 1 à 5 par souci de simplicité. Cette codification facilite la lecture et l'utilisation de la matrice de criticité des risques.

Conformément aux bonnes pratiques en vigueur, Sonatrach a appliqué les normes NF EN 60812 pour l'analyse des modes de défaillances et de leurs effets, ainsi que le référentiel OCDE pour l'évaluation des risques chimiques dans le cadre de ce travail d'analyse des risques sur l'échangeur cryogénique principal du nouveau complexe de liquéfaction de gaz naturel GL2/K.

1

Circuit : Tour de lavage 15-MD01+ligne GNT du reflux 1^{er} passe

Feuille d'analyse n° 01

Paramètre : Température

Valeur du design : -38.99 °C

Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)				recommandations	Réévaluation du risque	observations
				PP	PR	G	R			
Température très haute	1-Rebouillage excessif dans la tour de lavage 15-MD01 : Défaillance de la régulation 15TIC1064 (1).	-Perturbation sur le process : 1.1. Entraînement d'une coupe C5+ dans le circuit de tête de la tour de lavage. 1.2. Bouchage du 15-MC05. Produit hors spécification. 1.3. Montée en pression du circuit GNT. 1.4. Montée en pression du MR coté calandre.	-15TAH1436 + action de l'opérateur. -15PRV1024A/B. -15PAH1017 + action de l'opérateur.	5	1	3			(1) 15TIC 1064 régulations de la température de la tour de lavage 15-MD01 : ouverture excessive de la vanne 15-FV1061 de l'échangeur à l'huile 15-MC15.	

1 CHAPITRE III

Température très haute (suite)	2-Défaillance du programme de régénération des sécheurs ou erreur opératoire(2). Et défaillance des 15-MC01/02/03(3).	2.1. Choc thermique. 2.2. Possibilité de fragilisation des tubes par le choc thermique. 2.3. Produit hors spécification. Idem 1	-15TAH1217 + action de l'opérateur. -15TAH1004 + action de l'opérateur. Idem 1	1	1	4		Considérer l'activation de l'Interlock I-1500 si le GNT provient à une température très élevée.		(2)Ne pas procéder au shilling. (3)*Par fermeture d'une ou des trois vannes d'alimentation en propane 15LV15/07/20. *Provenance du gaz chaud vers le 15-MC05.
--------------------------------	---	--	--	---	---	---	--	---	--	---

1 CHAPITRE III

Feuille d'analyse n°02 Paramètre : Pression		Valeur du design : 60.67 bar a								
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)				Recommandations	Réévaluation du risque (R)	Observations
				PP	PR	G	R			
Pression très haute	1-Arrêt de soutirage du GNL (4). 2- Idem feuille d'analyse n°1 (1)	1.1. Produit hors spécification. 1.2. Montée en pression du circuit MR(5). 1.3. Perturbation ou arrêt de la production. 1.4. Possibilité de formation d'hydrates.	-15PAH1017 + action de l'opérateur. -15PRV1024A /B. -I-1530 (6). -15PIC1063(7): 15PAH1063+ action de l'opérateur. -I-0110 : 01PAHH1030. -01PIC1017 (8).	5	1	3				(4) par fermeture de la vanne 15FV1057A/B du refoulement de l'expander 15-MJ02. (5) vaporisation excessive du MR. (6)Ouverture de la vanne de bypass 15FV1057C de l'expander. (7) ouverture de la vanne 15PV1063 vers torche froide. (8) réduction de la vitesse du compresseur.

1 CHAPITRE III

Pression très basse	3-Déclanchement du compresseur 01MJ01.	<p>3.1. Retour du GNT de la deuxième passe vers la première.</p> <p>3.2. Perturbation des paramètres process (GNT) (9).</p> <p>3.3. Température basse du MR à l'aspiration du compresseur 16-MJ01/BP.</p> <p>3.4. Vaporisation des lourds et risque de bouchage au niveau du 15-MC05.</p> <p>Note1.</p>	<p>-15PAL1017 + action de l'opérateur.</p> <p>-Clapet anti-retour 15-SP-008.</p> <p>-16FFIC1037 (10).</p> <p>-15FIC1057 : Réduction du débit GNL (11).</p> <p>-15PALL1263.</p>	5	2	2				<p>(9) à cause de :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Baisse de débit GNT. -Sur refroidissement du GNL. <p>(10) Réduction de débit du MR :</p> <p>*MRL : au niveau de l'expander 16-MJ06</p> <p>15FV1037A/B.</p> <p>(11) En agissant sur les vannes 15FV1057A/B.</p> <p>-Note1 : on ne peut pas atteindre la dépression (mise sous vide) des circuits puisque en aval du 15-MC05, le ballon d'extraction d'hélium est éprouvé à une pression de 3.5 bars.</p>
	4-Fermeture de la vanne 15KV1101/1102 d'entrée des sécheurs 13-MD02A/B/C.	Idem 3.	Idem 3.	5	1	2				

1 CHAPITRE III

	5-Pas d'alimentation en reflux du 15-MD01 : *Fuite au niveau de la pompe 15-MJ01	5.1. Baisse de pression au niveau du 15-MD01. 5.2. Contamination de l'environnement due aux vapeurs d'hydrocarbures 5.3. Incendie/VCE 5.5. Blessures/mort d'homme.	-Détecteur de gaz. -Détecteur de flamme. -vannes d'urgence d'isolation des fuites. -Buildings blast-proof*.	5	1	3				*Mesures agissant sur le niveau de gravité
--	---	---	--	---	---	---	--	--	--	--

Feuille d'analyse n° 03		Paramètre : débit				Valeur du design : 45970 kmole/hr				
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)				Recommandations	Réévaluation du risque (R)	Observations
				PP	PR	G	R			
Débit très haut	1-Ouverture de la vanne 15FV1057C de bypass de l'expander 15-MJ02.	1.1. Produit hors spécification (12). 1.2. Température basse à l'aspiration du compresseur	-I-1550 : *15TIC1056 (13). *15TAH1056 + action de l'opérateur.	5	2	1				(12) GNL sortant à température élevée. (13) en cascade avec la régulation de débit 15FIC1057 qui ferme la vanne 15FV1057A/B de

1 CHAPITRE III

		MR 16-MJ01/02/03.								refoulement de l'expander 15-MJ02.
Débit très bas	2-Déclanchement du compresseur GN 01-MJ01	2.1. Sous-produit hors spécification.	-15FIC1057 (14): 15FAH1057+ action de l'opérateur.	5	4	1				(14) fermeture des vannes de refoulement de l'expander GNL 15-MJ02 et ouverture de la vanne de bypass 15FV1057C.
	3-Fermeture de la vanne d'entrée des sécheurs.	Idem 2	- 15FIC1057 (14): 15FAH1057+ action de l'opérateur.	5	3	1				
Pas de Débit	4-Fermeture de la vanne 15ESDV1277 par défaillance.	4.1. Chute de pression des circuits (15). 4.2. retour du gaz de la deuxième passe vers la première. 4.3. Déclanchement de l'échangeur 15-MC05 4.4 Cavitation de 15MJ01/A 4.5. Arrêt de la production.	-Clapet anti-retour 15-SP-008. -I-1550 : déclanchement du 15 MC05. -I-1500 : déclanchement de la section 15. -I-0000 : déclanchement de toute l'unité.	5	1	3				(15) jusqu'à 3.5 bars.

1 CHAPITRE III

Feuille d'analyse n° 04		Paramètre : niveau		Valeur du design : /				recommandat ions	Réévaluatio n du risque (R)	Observations
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)						
				PP	PR	G	R			
Niveau très haut	1-Défaillance de la régulation de niveau 15LIC1011 au niveau de la tour de lavage 15-MD01.	1.1. Entrainement des lourds. 1.2. Produit hors spécifications (16). 1.3. Bouchage de l'échangeur 15-MC05. 1.4. Perturbation de liquéfaction.	-15HIC1011 : Ouverture manuelle de la vanne 15LV1011 vers torche froide (17). -15LAH1011+ action de l'opérateur. -15AT1018.	5	2	2			(16) GNL lourd. (17) en basculant le switch 15-HS-1011.	
Niveau très bas	2-Défaillance de la régulation de niveau 15LIC1011 au niveau de la tour de lavage 15-MD01.	2.1. Montée en pression dans la tour de lavage et au niveau de la première passe (18). 2.2. Mauvais échange thermique au niveau du 15-MC05/1 ^{ère} passe.	-15LAL1011+ action de l'opérateur. -15LALL1012. -I-1510 : Fermeture de la vanne 15ESDV1013.	5	1	2			(18) Passage du gaz vapeur vers le fractionnement à pression haute.	

1 CHAPITRE III

Feuille d'analyse n° 05								Paramètre : composition du GNT			
								Valeur du design : H ₂ O < 1ppm / Hg < 5ng/Nm ³ / CO ₂ < 50ppm			
Dérive	Causes	Conséquences	Barrières de sécurité existante	Niveau du risque (R)				recommandations	Réévaluation du risque (R)	Observations	
				PP	PR	G	R				
Teneur élevée en CO ₂	Défaillance au niveau de la décarbonatation	-Réduction de la performance du 15-MC05. -bouchage au niveau du bout médian de 15-MC05(deuxième passe). -Corrosion de l'équipement. -Possibilité de déclenchement du train GNL.	13-AT-1008 : Transmetteur d'analyse du CO ₂ . 13-AI-1008 : Alarme de présence du CO ₂ dans le GNT.	5	3	3		Considérer l'activation de l'Interlock I-1391 si la teneur en CO ₂ dépasse la norme			
Teneur élevée en H ₂ O	Défaillance au niveau de la déshydratation.	-Réduction de la performance du 15-MC05. -bouchage au niveau du bout chaud de 15-MC05 (première passe). -Possibilité de déclenchement du train GNL.	13AT1100 : Transmetteur d'analyse du H ₂ O. 13-AI-1100 : Alarme de présence du H ₂ O dans le GNT.	5	3	3		Considérer l'activation de l'Interlock I-1391 si la teneur en H ₂ O dépasse la norme			

1 CHAPITRE III

Teneur élevée en Hg	Défaillance au niveau de la Démercurisation.	<p>-A température ambiante, et en présence d'humidité, l'Hg attaque les tubes en aluminium du faisceau GNT/GNL par la corrosion par piqure.</p> <p>-Fuite des tubes dans la calandre au niveau de l'échangeur principal 15-MC05.</p>	<p>-14-SC-001 *.</p> <p>-14PDAH1003+ action de l'opérateur.</p>	3	2	4		<p>-Mettre des procédures pour la maintenance préventive.</p> <p>-Associer une action automatique à l'alarme 15PDAH1003.</p>		*Point d'échantillonnage.
---------------------	--	--	---	---	---	---	--	--	--	---------------------------

Chapitre-III-Partie pratique

Les principales conclusions auxquelles nous sommes parvenus sont les suivantes:

- Des risques ont été jugés acceptables mais dont il est nécessaire de s'assurer qu'ils demeurent à ce niveau (Principe de l'amélioration continue). Il s'agit de la majorité des situations
- Des risques ont été jugés tolérables pour lesquels il s'agit d'apporter des mesures correctives agissant sur la probabilité et /ou la gravité e.g. présence de contaminants dans le GNT
 - Des risques jugés inacceptables qu'il s'agit de ramener au moins dans la zone d'acceptabilité, que nous n'avons pas rencontrés dans cette étude de cas mais qui pourraient très probablement apparaître dans d'autres nœuds

g) RECOMMANDATIONS

Des recommandations ont été ainsi faites pour remédier les risques, il s'agit de :

1 /Considérer l'activation de l'interlock I-1500 si le GNT est à une température très élevée dû à une défaillance dans la section 15.

2/Considérer l'activation de l'interlock I-1391 si la teneur en CO₂ dépasse les normes, ainsi pour la présence du H₂O dans le GNT qui peut provoquer un bouchage dans la section cryogénique et engendrer un très bas débit dans le circuit GNT/GNL. Ce risque peut être atténué en associant une action automatique à l'alarme 13AI1110.

3/ Considérer les mesures suivantes si la teneur en Hg dépasse les normes, couplé à la présence d'humidité dans le GNT qui peut provoquer des corrosions ainsi que des fuites au niveau du calandre et infliger des dégâts à l'équipement dans le circuit GNT/GNL :

- Associer une action automatique à l'alarme 15PDAH1003.
- Mettant des procédures pour la maintenance préventive.

En effectuant notre étude HAZOP, nous avons constaté que le niveau de sécurité du projet est suffisamment élevé pour maîtriser les risques engendrés par les perturbations de fonctionnement de l'unité.

Des mises à jour seront nécessaires pour notre étude, dans le cadre de l'amélioration continue durant l'exploitation du complexe GL2/K.

Chapitre-III-Partie pratique

Cette étude nous a permis d'élever notre niveau de connaissances par rapport au fonctionnement du complexe et à la technique HAZOP. La généralisation de l'étude HAZOP à tout le complexe avec une participation des personnels des différentes structures (process, maintenance, HSE, etc.) amènerait une meilleure maîtrise des installations .

Conclusion générale

Notre mise en situation académique, nous a permis de nous familiariser avec le personnel et les installations; ceci nous facilitera notre insertion dans notre activité professionnelle.

L'état d'avancement du projet méga train du GNL ainsi que la disponibilité des outils nécessaires et suffisants, nous ont permis d'effectuer une évaluation de risques sur la section liquéfaction 15 « Echangeur cryogénique principal 15-MC05 ».

Une étude HAZOP nécessite une bonne compréhension du procédé de liquéfaction du gaz naturel et l'expérience du personnel dans ce domaine; avec l'identification du niveau de sécurité jugé approprié à cette activité.

La technique HAZOP nous a permis d'identifier les déviations possibles de paramètres par rapport à l'intention de design, les causes de ces déviations et leurs conséquences ainsi que leurs criticités. Elle a permis également de situer les mesures de protection existantes et enfin de proposer des recommandations.

Indubitablement, il est impératif de situer un accident dans son contexte technologique spécifique. De nombreux de ces incidents impliquant des échangeurs cryogéniques auraient pu être prévenus si les meilleures pratiques en conception, en construction, en maintenance, et en exploitation avaient été rigoureusement appliquées, en plus de la mise en œuvre et du respect de normes de sécurité robustes.

En conséquence, la gestion des accidents afférents aux échangeurs cryogéniques s'intègre dans une approche globale de la gestion des risques, qui constitue un pilier essentiel au sein de toute entreprise. La gestion des risques pour une installation vise à identifier, analyser, et réduire au maximum les risques potentiels, ou à les maintenir dans des limites acceptables. Ainsi, la gestion des risques détient une place centrale dans le succès d'une entreprise, que cela concerne la protection des individus, des biens, de l'environnement, ou encore la préservation de la réputation de l'entreprise en termes de qualité.

De plus, le processus d'analyse des risques sert à se prémunir contre les événements majeurs en établissant toutes les mesures de protection requises pour élaborer une stratégie de prévention des incidents ou de réduction de leurs conséquences. L'étude présentée dans ce mémoire aborde les

risques inhérents à l'exploitation des échangeurs cryogéniques en utilisant la méthode d'analyse des risques HAZOP sur un échangeur cryogénique. Cette initiative nous a permis de :

- Identifier les origines possibles et les conséquences potentielles des accidents liés à l'exploitation d'installations industrielles telles que les échangeurs cryogéniques.

- Mettre en lumière les dispositifs de sécurité en place ou envisageables pour faire face à ces risques.

- Cibler les risques les plus prégnants et formuler des améliorations visant à renforcer la fiabilité du processus actuel et du système de sécurité.

En somme, l'efficacité de cette analyse découle essentiellement de la collaboration au sein d'un groupe pluridisciplinaire, permettant ainsi de dresser un inventaire exhaustif et d'identifier tous les risques associés à l'installation, tout en maintenant une approche objective et exhaustive.

Bibliographie

Bouzeria N, Identification et évaluation des risques de l'activité de la manutention au sein de l'entreprise portuaire de Bejaïa (EPB) Cas des Dockers Professionnels 2012-2013

Hilde Vandekerckhove, Rilana Picard, Isabelle Rozenbaum, l'analyse des risques, 2006.

www.inrs.fr/demarche/risques-industriels.html - août 2023

DEBRAY.B, CHAUMETTE.S, DESCOURIERE.S, TROMMETER.V – Méthode d'analyse des risques générés par une installation industrielle – 2006.

www.itm.lu - juillet 2023

Boukhrissi.M, AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) appliquée à la STEP d'Ain El Houtz, 2014/2015.

ean-Pierre.D, François.F, Didier.G, Jean-Louis.G, André.L, Yves.M, Jean-Paul.P - Méthode d'analyse des risques - 2017.

http://gpp.oiq.qc.ca/analyse_par_arbre_d_evenements.htm - août 2023

Rahmani A. et Bouchali T - Modélisation et Simulation Thermo-hydraulique d'un Générateur de Vapeur Industriel en Régime Transitoire par le Code RELAP5/Mod3.2 -thèse de Doctotat – 2007 - Université d'Annaba

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbrededéfaillance>. - août 2023

J. P. Ylén, M. Paljakka, T. Karhela, J. Savolainen & K. Juslin - Experiences on Utilising Plant Scale Dynamic Simulation in Process Industry - Proceedings 19th European Conference on Modelling and Simulation - 2005

Boiler Design, Maintenance and Safety Study Guide, Boiler Design and Construction, American Trainco Inc., SGB001 306, 2006.

M.R. Khajavi, A. R. Abdolmaleki, N. Adibi, S. Mirfenderesk - Failure Analysis of Bank Front Boiler Tubes, Engineering Failure Analysis, Vol.14, pp.731- 738, 2007.

A. BERRAR - Gestion des risques par l'analyse préliminaire au sein de complexe GL1/K SONATRACH SKIKDA - mémoire de master – 2017 - Université d'ANNABA.

ROYER, M - HAZOP: une méthode d'analyse des risques-Principe – techniques de l'ingénieur – 2009.

Dunjó, J., Fthenakis, V., Vilchez, J. A., & Arnaldos, J - Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review - *Journal of hazardous materials*, volume 173, issue(1-3), pages 19-32.

Hyatt, N - *Guidelines for process hazards analysis (PHA, HAZOP), hazards identification, and risk analysis* – 1^{ère} édition - CRC press.

Debray, B., Chaumette, S., Descouriere, S., & Trommeter, V - Méthodes d'analyse des risques générés par une installation industrielle - *Rapport Omega*, 7, 91 - 2006.

CEI - études de danger et d'exploitabilité (étude HAZOP)_guide d'application - 2001.

Kletz, T. A - *Hazop and Hazan: Identifying and Assessing Process Industry Hazards* – 4 ème édition - IChemE.

Benhanachi, H - Optimisation du programme de TRIP par détecteur de gaz à barrière -thèse d'ingénieur - 2017 - INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE, école de boumerdès

DOCUMENT KBR : description des fonctions de contrôle et de sécurité unité 15 –liquéfaction.

Les PFD ,les P&D, Manuels opératoire de l'unité, Les diagrammes cause et effet.

Manuel opératoire du principal échangeur de chaleur cryogéniques Project LNG skikda.