



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnel en Génie
Mécanique

Spécialité : Energétique

Option : Froid, Chauffage et Climatisation

Thème :

**Etude des performances énergétiques d'un
système de liquéfaction de gaz naturel :
Contribution à l'analyse de risques.**



Encadré par :

Pr. MOHAMMEDI Kamal

Dr. ZOUAOUI Salah

Présenté par :

M. AZIZI Abdenour

M. BOUALLAM Youcef

Remerciements

Mener à bien un projet de mémoire est un exercice difficile, exige un fort investissement, mais apportant nécessairement en retour, un sentiment de satisfaction du à l'accomplissement réussi d'un travail.

De ce fait, remercier, c'est le plaisir de se souvenir de tous ceux qui, par leurs encouragements, leurs disponibilité, leurs amitiés et leurs compétences ont su créer un cadre de recherche nous ayant permis de finaliser notre travail.

Nous tiendrons à exprimer nos sincères reconnaissances au Professeur MOHAMMEDI K., d'avoir accepté d'orienter et de dirigé avec beaucoup de compétences et de sympathie ce travail, ne ménageant ni son temps, ni ces conseils judicieux.

Les plus profonds remerciements, respect et reconnaissance vont à notre Co-promoteur Monsieur ZOUAOUI S., pour son suivi, pour ces conseils, sa disponibilité, son travail constructif, sa générosité dans son partage de savoir et d'expérience.

Nous tiendrons aussi à remercier très sincèrement Monsieur GOURINE CHAREF et DJALLAL, des ingénieurs au niveau de département technique, du complexe GL2/Z d'Arzew pour leurs lucidités, gentillesses et disponibilités, et leurs soutiens qu'ils nous ont apportés.

Nous tiendrons à remercier ensuite Mr SAMAH, Docteur au département Génie Mécanique de l'université Mouloud Mammeri d'avoir accepté de présider le jury.

Nous tiendrons à remercier aussi Mr BOUMRAR, Maitre de conférence au département Génie Mécanique de mouloud Mammeri et Mr MEDJKANE, Maitre assistant au département Génie Mécanique de l'université Mouloud Mammeri, membre de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui m'ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mon frères AZIZ et toute ma famille: «AZIZI ».

A tous mes chers amis qui m'ont toujours soutenu.

Sans oublié mon binôme BOUALLAM avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude.

AZIZI ABDENOUR

Dédicaces

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui m'ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents. A mes frères et sœurs et toute ma famille: «BOUALLAM».

A tous mes chers amis qui m'ont toujours soutenu.

Sans oublier mon binôme ABDENOUR avec qui j'ai élaboré mon projet de fin d'étude.

BOUALLAM YUCEF

Table des matières

Liste des tableaux	V
Liste des figures	VI
Nomenclature	VIII
Liste des acronymes	IX
Introduction générale	1

Chapitre I : Présentation du complexe GL2/Z

I.1. Historique.....	3
I.2. Fonction de l'usine GL2/Z.....	3
I.3. Situation géographique du complexe.....	4
I.4. Description de l'usine.....	5
I.4.1. Zone Utilités.....	7
I.4.2. Zone process.....	7
I.4.2.1. Démercurisation.....	9
I.4.2.2. Décarbonatation.....	9
I.4.2.3. Déshydratation.....	9
I.4.2.4. Section séparation.....	9
I.4.2.5. Section liquéfaction.....	9
I.4.2.6. Section compression.....	10
I.4.2.7. Section fractionnement.....	10
I.4.3. Zone de stockage et chargement.....	11
I.5. Chargement et Installation d'Expédition.....	12
I.6. Conclusion.....	12

Chapitre II : La section liquéfaction et les boucles MCR, PROPANE

II.1. Introduction.....	13
II.2. Différents procédés de liquéfaction.....	13
II.2.1. Procédé en CASCADE.....	13
II.2.2. Procédé MCR pré-refroidi au Propane.....	15

II.3. Section liquéfaction au complexe GL2/Z.....	15
II.3.1. Description générale de la section de liquéfaction.....	16
II.3.2. Rôle et spécifications des équipements.....	16
II.4. La boucle MCR.....	17
II.4.1. Rôle de la boucle MCR.....	17
II.4.2. Description générale de la boucle MCR.....	17
II.5. La boucle propane.....	19
II.5.1. Rôle de la section.....	19
II.5.2. Description.....	19
II.5.3. Circuit de transfert.....	20
II.5.4. Rôle des équipements.....	22
II.6. Conclusion.....	22

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

Problématique.....	23
III.1. Introduction.....	24
III.2. Simulation.....	24
III.2.1. Logiciels de simulation des procédés.....	24
III.2.2. Présentation de HYSYS.....	24
III.2.3. Fonctionnement de HYSYS.....	25
III.2.4. Choix du modèle thermodynamique.....	26
III.2.5. Méthodologie de la simulation.....	28
III.3 Représentation de l'échangeur principale.....	28
III.4. Données de la simulation « cas design ».....	29
III.4.1. Validation de la simulation.....	30
III.4.2. Analyse des résultats.....	30
III.5. Résultats de la simulation.....	31

III.5.1: Etude de la variation de la température du GNL	
sortie de l'échangeur principal.....	31
III.5.2. Etude de la variation des puissances consommées par les deux compresseurs (MCRI et MCRII) en fonction de la composition MCR.....	32
III.5.3. Etude de la variation de la température du MCR sortie échangeur principal (X16-C) en fonction de la composition du MCR.....	33
III.5.4. Etude de la variation du COP en fonction de la composition du MCR.....	33
III.6. Impact de la variation de la composition MCR sur le cycle.....	34
III.7. Conclusion.....	38

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Notion de risque et danger.....	39
IV.2.1. Définition du danger.....	39
IV.2.2. Définition du risque.....	39
IV.3. Les phénomènes dangereux associés aux GNL.....	40
IV.3.1. Les UVCE.....	40
IV.3.2. Les BLEVE.....	41
IV.3.3. Le Roll-Over.....	42
IV.3.4. Fuite de GNL dans l'eau <<effet de TRP>>.....	42
IV.4. Autre dangers associés au GNL.....	43
IV.4.1. Stockages GNL.....	43
IV.4.2. Transport.....	43
IV.5. Historique sur les accidents industriels.....	43
IV.6. Gestion du risque.....	44
IV.6.1. Le processus de gestion du risque.....	44
IV.6.2. Avantages de la gestion du risque.....	46
IV.7. Les méthodes d'analyse du risque.....	46
IV.8. Choix des méthodes d'analyse des risque utilisés dans notre étude.....	46

IV.9. Conclusion.....	46
-----------------------	----

Chapitre V : Analyse de risques sous ALOHA

V.1. Introduction.....	47
V.2. Présentation de logiciel CAMEO-ALOHA.....	47
V.2.1. Définition.....	47
V.2.2. Ce que fait ALOHA.....	47
V.2.3. Principales limitations d’ALOHA.....	48
V.3. Conditions météorologiques et environnement.....	49
V.3.1. Températures.....	49
V.3.2. Vents.....	50
V.3.3. Ensoleillement.....	50
V.3.4. Humidité.....	50
V.3.5. Situation géographique du site.....	50
V.4. Etude de cas.....	51
V.4.1. l’Analyse préliminaire des risques (APR).....	51
V.4.2. Choix de la matrice de criticité.....	52
V.5. Modélisation avec ALOHA.....	56
V.5.1. Description de l’incident.....	56
V.5.2. Hypothèses de départ.....	56
V.5.3. Source de la fuite.....	57
V.5.4. Résultat et discussion.....	58
V.5.4.1. Modélisations de la concentration des flammes.....	58
V.5.4.2. Modélisations des radiations thermiques.....	59
V.5.4.3. Modélisations de la surpression.....	60
Conclusion générale	61

Références bibliographiques

Annexe

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Composition du gaz d'alimentation de GL2/Z	5
Tableau I-2 : Composition de calcul du MCR	10
Tableau III-1 : Composition du gaz naturel traité entrant l'échangeur principal	29
Tableau III-2 : paramètres de marche introduit au simulateur	30
Tableau III-3 : Tableau comparative de la simulation cas design avec cas réel	30
Tableau III-4 : Compositions réelles du MCR, pour chaque cas simulé.....	31
Tableau III-5 : Tableau récapitulative des résultats	34
Tableau III-6 : Composition du MCR étudié	35
Tableau IV-1 : Quelques accidents causés par fuites sur pipes, en Algerie et dans le monde	44
Tableau V-1 : Conditions atmosphériques du site d'Arzew.....	51
Tableau V-2 : Echelle de cotation de la probabilité	52
Tableau V-3 : Echelle de cotation de la gravité.....	53
Tableau V-4 : Matrice de criticité	53
Tableau V-5 : L'APR utilisé dans notre étude	55

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Situation géographique	4
Figure I-2 : Composition du GN a l'entrée de l'usine GL2/Z.....	6
Figure I-3 : Les zones de complexe GL2/Z.....	6
Figure I-4 : Schéma synoptique d'un train de liquéfaction	8
Figure I-5 : Schéma du procédé d'un train de liquéfaction.....	8
Figure I-6 : Zone de procédé	11
Figure I-7 : Zone de stockage GNL pour le chargement.....	12
Figure II-1 : Cycle de carnot.....	13
Figure II-2 : Section liquéfaction	16
Figure II-3 : Schéma de la boucle MCR	19
Figure II-4 : Schéma de la boucle propane	22
Figure III-1 : Interface HYSYS.....	25
Figure III-2 : Schéma (PFD) représentatif de la boucle MCR et section liquéfaction.....	27
Figure III-3 : Vaiation de la température du GNL sortie de l'échangeur principal X16-C.....	31
Figure III-4 : Puissance consommée par le compresseur MCRI en fonction de la composition du MCR.....	32
Figure III-5 : Puissance consommée par le compresseur MCRII en fonction de la composition du MCR.....	32
Figure III-6 : Variation de la température du MCR sortie X16-C en fonction de la composition du MCR.....	33
Figure III-7 : Variation du COP en fonction de la composition du MCR.....	34
Figure III-8 : Variation de la température de sortie du GNL d'échangeur principale	35
Figure III-9 : Variation de la puissance de compression MCRI (en Kw)	36
Figure III-10 : Variation de la puissance de compression MCRII (en Kw).....	36
Figure III-11 : Variation de la température d'aspiration du copresseur MCRI.....	37
Figure III-12 : Variation du COP en fonction de la composition du MCR.....	37
Figure IV-1 : Exemple de risque professionnel à droite et quotidien à gauche	40
Figure IV-2 : Processus de gestion de risque	45
Figure V-1 : Processus de simulation des déversements et dispersion	48
Figure V-2 : Conditions météorologique sur ALOHA.....	49

Figure V-3 : Variation interannuelle de températures sur Arzew	49
Figure V-4 : Rose des vents sur Arzew	50
Figure V-5 : Emplacement du complexe dans le site industriel d'Arzew	51
Figure V-6 : lieu présumé de l'incident	56
Figure V-7 : Distance de sécurité en terme de présence de gaz LIE.....	58
Figure V-8 : Distance de sécurité en terme de flux thermique.....	59
Figure V-9 : Distance de sécurité en terme de surpression	60

Nomenclatures

Symboles	Significations	Unités
a	Pression de cohésion	KPa.dm ⁶ /mol ²
b	Le covolume.	m ³ /mol
C	Constante calculé	/
COP	Coefficient de performance.	/
H	L'enthalpie du gaz.	KJ/h
$\dot{m}$	Le débit massique.	kg/h
P	La pression.	Bar
Q	La quantité d'énergie reçue par GNL.	KJ/h
R	La Constante des gaz parfaits.	J/k.mol
S	La section en mètres carrés.	m ²
T	La température.	°C
V	Le volume.	m ³
W	Le travail consommé par le compresseur	KW

Liste des Acronymes

Abréviations	Significations
ALOHA	Areal Locations Of Hazardous Atmospheres.
APR	L'Analyse Préliminaire des Risques.
BP	Basse Pression.
CLD	Cold.
EDM	Eau de mer.
FG	Fluide frigorigène.
GP1/Z	Gaz du pétrole d'Arzew (Complexe 1).
GPL	Gaz du Pétrole Liquéfié.
GL1/K	Gaz liquéfié de Skikda (Complexe 1).
GL1/Z	Gaz liquéfié d'Arzew (Complexe 1).
GL2/Z	Gaz liquéfié d'Arzew (Complexe 2).
GL3/Z	Gaz liquéfié d'Arzew (Complexe 3).
GL4/Z	Gaz liquéfié d'Arzew (Complexe 4).
GN	Gaz naturel.
GNL	Gaz Naturel Liquéfié.
HYSYS	HYGIENE SYSTEME & SERVICES.
HP	Haute pression.
JT	Joule Thomson.
LIE	limite inférieure d'explosivité.
LII	Limites inférieure d'inflammabilité.
LSI	Limite supérieur d'inflammabilité.
LV	Level valve.
MEA	Mono-éthanol-amine.
MCR	Multi composant réfrigérant.
PFD	Process Flow Diagram.
PV	vanne de contrôle pression.
PR	PENG-ROBINSON.
SONATRACH	l'entreprise nationale de transformation, canalisation et commercialisation des hydrocarbures (groupe SONATRACH).
TV	Température valve.

Introduction générale

Introduction Générale :

L'industrie énergétique occupe une partie dominante en termes d'investissements, de production et des relations géopolitiques dans le monde. Le gaz naturel est considéré comme une source d'énergie qui joue un rôle très important dans l'industrie moderne.

En effet, l'Algérie est devenue parmi les premiers pays exportateur mondial de gaz.

La liquéfaction de gaz naturel est un procédé de base pour transporter le maximum de GNL en diminuant son volume d'environ 600 fois et cela pour pouvoir faciliter son transport.

Le GL2/Z est une importante installation de liquéfaction de gaz naturel qui produit le GNL, du propane, du butane et de Gazoline elle présente un essor économique important pour l'Algérie.

Les unités de liquéfaction de gaz naturel sont des secteurs à haut risque, pour minimiser ce risque des nouvelles politiques doivent être traduites sur terrain, par des programmes et des actions qui visent à traduire l'incidence de ces activités sur les deux dimensions du développement durable, à savoir : l'environnement et la société, ceci doit essentiellement viser l'infériorisation de l'occurrence de l'accident majeur.

Les principaux objectifs de ce mémoire sont :

- Faire une description détaillée sur le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL2/Z d'Arzew.
- Présenter la procédure générale de la section liquéfaction de GN au complexe GL2/Z et définir le rôle des deux boucles MCR, PROPANE dans le procédé de liquéfaction.
- Faire une simulation de la boucle MCR étudiée (les données design relevées sur site) par le code de calcul HYSYS.
- Faire une analyse des performances énergétique de la boucle MCR en comparant les résultats obtenus par simulation et ceux de design puis étudier leurs impacts sur la boucle.
- Faire connaissance sur les différents risques liés au gaz naturel liquéfié et la méthode de gestion de ses risques.
- Identifier les différents risques de la conduite propane à l'entrée de ballon 153F par la méthode d'APR.
- Faire une simulation d'un incident (fuite de propane) avec le code de calcul ALOHA et interpréter les résultats.

Pour cela, un stage pratique a été réalisé au sein du complexe GL2/Z (SONATRACH d'Arzew) ce qui nous a permis la collecte des données nécessaires aux simulations.

Le présent travail comprend V chapitres :

- Dans le premier, présentation du complexe GL2/Z.
- Dans le deuxième, une description de la section liquéfaction de GN et les deux boucle MCR, PROPANE.
- Dans le troisième chapitre simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS.
- Dans le quatrième, généralités sur l'analyse des risques liés au GNL.
- Dans le dernier chapitre une analyse des risques sous le logiciel ALOHA.

En fin nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Présentation du complexe $GL_2/\mathbb{Z}$

I. PRESENTATION DU COMPLEXE GL2/Z :**I.1. Historique :**

Le complexe GL2/Z est une unité de production de la SONATRACH. Il a été réalisé par la société Pullman Kellogg en 1978 et a commencé à produire du GNL dès 1981. Il transforme 41.25 millions de m³/jour de gaz naturel provenant des puits de HASSI R'MEL.[2]

- Signature de contrat 09 février 1976.
- Lancement engineering 15 avril 1976.
- Pose de la première pierre 21 février 1978.
- Début de montage mécanique 01 juillet 1981.
- Première expédition de GNL 20 juillet 1981.

- **Date de mise en service :**

a) Zones Utilités :

- Achèvement mécanique : 26 novembre 1980.
- Production vapeur / électricité : 27 juillet 1980.
- Production des utilités : 25 janvier 1981.

b) Zone process (train 100) :

- Achèvement mécanique : 14 octobre 1981.
- Première production GNL : 29 juillet 1981.

c) Zone de Stockage et chargement :

- Première production de juillet 1981.
- Production cumulée GNL 1533000 m³ 11 septembre 1981.

I.2. Fonction de l'usine GL2/Z :

Le complexe GL2/Z a été conçu pour liquéfier le gaz naturel provenant des champs gaziers de HASSI R'MEL, avec possibilité d'extraction du propane, du butane et de la gasoline. Le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) est pompé et chargé dans des méthaniers spécialement conçus pour le transport cryogénique pour être expédié vers l'étranger.[3]

Le complexe GL2/Z comporte Six trains de liquéfaction indépendants fonctionnant en parallèle. La production des utilités nécessaires au fonctionnement des trains est comme suit :

L'air de service, l'azote, l'eau potable, l'eau de mer, l'électricité et la vapeur d'eau. Pour cela le complexe dispose de :

- 01 chaudière basse pression d'une capacité de 50 T/h.
- 09 chaudières de procédé à haute pression d'une capacité de 122 T/h.
- 06 chaudières de procédé à haute pression d'une capacité de 400 T/h.
- 04 turbogénérateurs d'une capacité de 20MW chacun.

- 03 chaudières utilités d'une capacité de 90 T/h.
- 06 unités de dessalement d'une capacité de 45 T / h chacune.
- 01 station de pompage d'eau de mer.
- Une unité d'air de 5100 m³/h.
- 06 pompes de 32000m³/h chacune.

I.3. Situation géographique du complexe :

Le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL2/Z est situé à BETHIOUA, implanté en bordure de la mer et à une distance de 40 Km à l'ouest d'Oran. Il s'étend sur une superficie de 72 hectares au sein de la zone industrielle d'Arzew. Il est limitrophe du complexe GL3/Z et KAHRAMA à l'Est et le complexe de liquéfaction de gaz naturel GL1/Z à l'Ouest, au Nord par la mer et au sud par le village de BETHIOUA.

Son emplacement au bord de la mer lui permet d'utiliser son eau comme source d'alimentation pour le refroidissement des équipements telles que les chaudières et les échangeurs, la production d'eau distillé et la lutte anti -incendie, et facilite le transport du GNL dans des méthaniers via ses postes de chargement.



Figure I.1: Situation géographique

a- Conditions Climatiques :

- Pression barométrique : 758 mm Hg.
- Températures :
 - ✓ Température moyenne maximale : 28.5 °c.
 - ✓ Température moyenne minimale : 9.6 °c.
- Elévation : 20 mètres au dessus du niveau de la mer.
- Humidité relative : 76%.

b- Conditions Spécifiques :

- Atmosphère saline : Oui.
- Agressivité de l'air : Forte.
- Vent de sable : Très Faible.
- Gel : Très Peu.
- Poussière : Oui.

I.4. Description de l'usine :

L'usine de liquéfaction de gaz naturel d'Arzew (GL2/Z) comprend 6 trains de liquéfaction indépendants fonctionnant en parallèle. Le gaz naturel d'alimentation est également distribué à chacun des trains par un réseau de canalisation. Le débit de gaz naturel distribué est d'environ 1.500.000 m³/h pour les 6 trains soit en moyenne 250.000 m³/h / train. Dans chaque train, le gaz naturel d'alimentation est traité pour éliminer le gaz carbonique et la vapeur d'eau ; il est ensuite réfrigéré et distillé pour en extraire les hydrocarbures lourds et il est finalement liquéfié à -162°C.

Une fois liquéfié, le gaz naturel est envoyé par pompage dans trois réservoirs de stockage sous une pression de 1,03 bar absolu, qui desservent l'ensemble des six trains. Il est prévu que chaque train de liquéfaction produira en moyen 8 400 m³/h de GNL.

Les réservoirs de stockage ont une capacité de 100 000 m³ chacun et la capacité totale de stockage correspond à la production de 5 journées complète de l'ensemble des 6 trains. Chaque méthanier a une capacité moyenne de 125.000 m³ et lorsque ces réservoirs sont préparés, le chargement s'effectue en 12h30' à raison d'un débit de chargement de 1.000 m³ GNL/h.[2]

Tableau I-1 : Composition du Gaz d'Alimentation de GL2/Z :

COMPOSANTS	CH ₄	C ₂ H ₆	N ₂	C ₃ H ₈	He	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂
% MOLAIRES	84,52%	7,77%	5,90%	1,52%	0,20%	0,04%	0,03%	0,02%

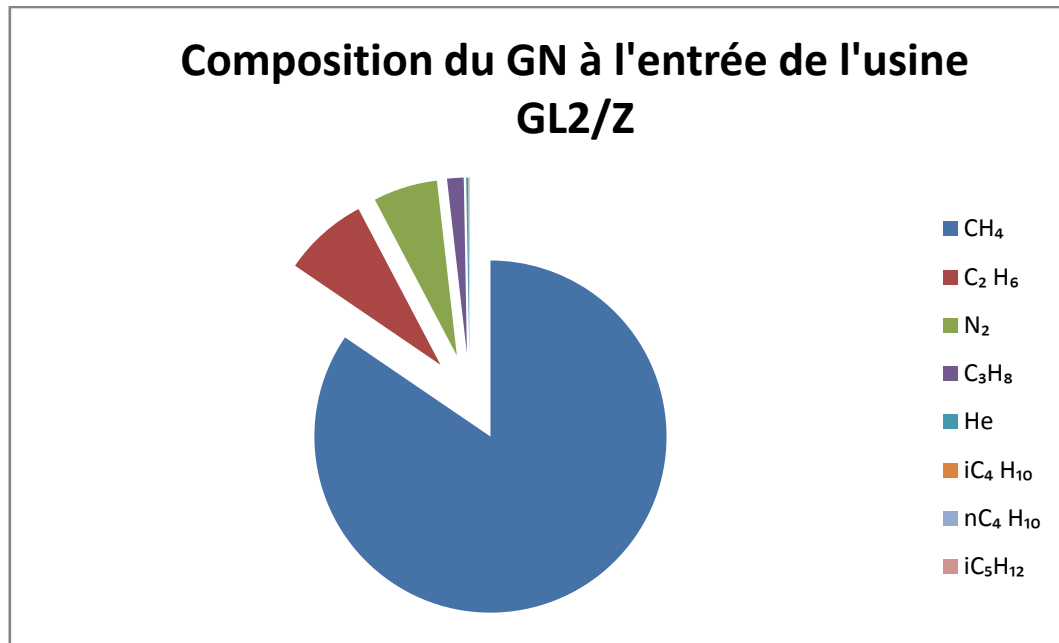


Figure I.2 : Composition du GN à l'entrée de l'usine GL2/Z.

L'usine est composée de trois zones :

- Zone des utilités.
- Zone du procédé.
- Zone de stockage et de chargement.

Le complexe GL2/Z comprend 3 zones essentielles:

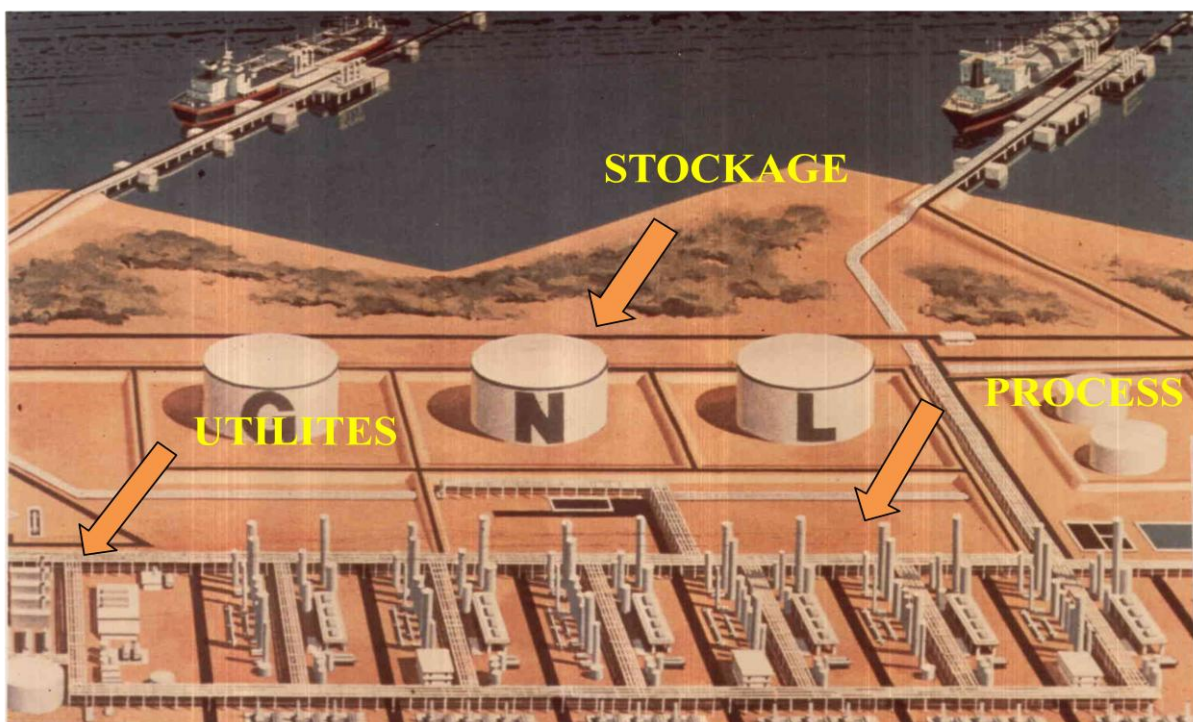


Figure I.3 : les zones de complexe GL2/Z

I.4.1. Zone Utilités :

Cette zone est essentiellement autonome et assure la fourniture de toutes les utilités pendant le démarrage et la mise en marche des six (06) trains de liquéfaction ainsi, de toutes les installations de production.[1]

Elle consiste principalement à la production et la fourniture de ce que suit :

a) Energie électrique : Elle est fournie en grande partie par trois (03) turbogénérateurs d'une capacité de 20 MW chacun et de la source SONEGAS pour également 20 MW, soit un total de 80 MW.

b) Vapeur : Elle est fournie par un ensemble de chaudières de différents tonnages répartis comme suit :

- Trois (03) chaudières HP (Haute Pression) de 90 Tonnes par heure chacune au niveau des utilités.
- Une (01) chaudière BP (Basse Pression) de 50 Tonnes par heure au niveau des utilités.
- Neuf (09) chaudières HP de 122 Tonnes par heure.
- Six (06) chaudières HP de 400 Tonnes par heure chacune au niveau de la zone de procédé.

c) Eau dessalée : Elle est fournie par six (06) unités de dessalement produisant chacune 45 tonnes par heure utilisée comme eau d'appoint pour les chaudières.

d) Air : Il est fourni par quatre (04) compresseurs d'air permettant la production de l'air instrument servant pour toutes les installations de productions et de l'air service pour les autres besoins du complexe.

e) Eau de refroidissement: Elle est fournie par six (06) pompes d'eau de mer d'une capacité de 32000 m³ par heure chacune.

I.4.2. Zone process :

La zone de procédé (**annexe 1**) est constituée de six trains identiques fonctionnant en parallèle. Ils sont alimentés par du gaz naturel en provenance de Hassi-R'mel à une pression de 46 bars et à des températures ambiantes. Chaque train est composé de sections suivantes [1] :

- Démercurisation.
- Décarbonatation.
- Déshydratation.
- Fractionnement des hydrocarbures.
- La liquéfaction.

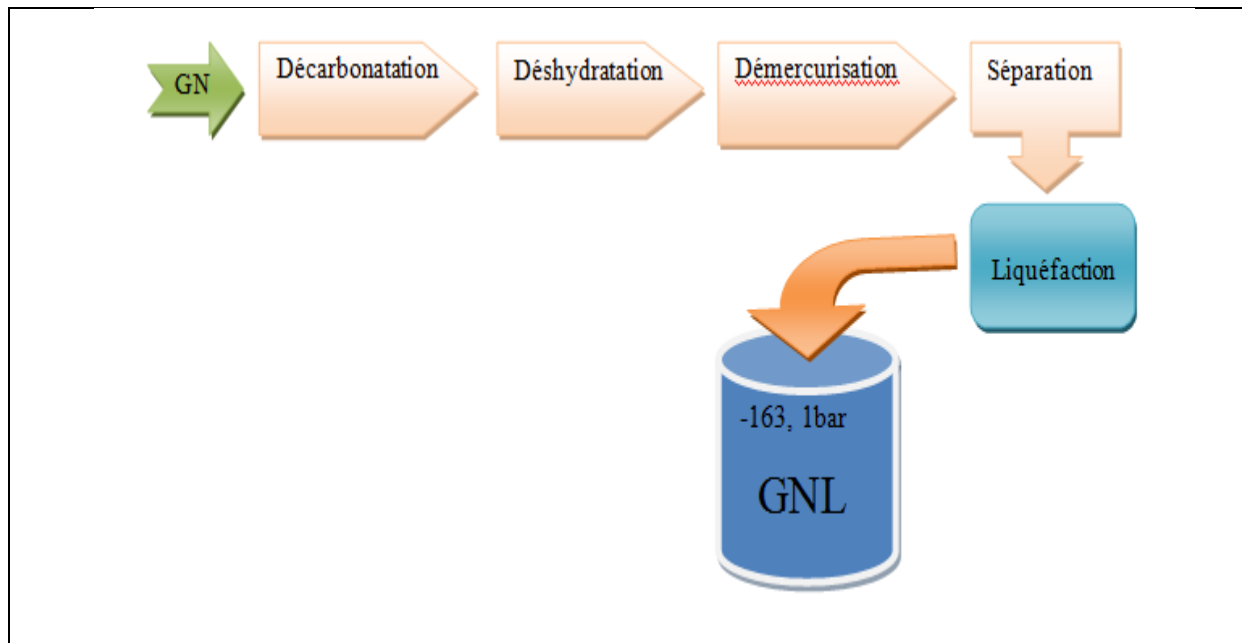


Figure I.4 : Schéma synoptique d'un train de liquéfaction

Le process schématisé d'un train se présente comme suit:

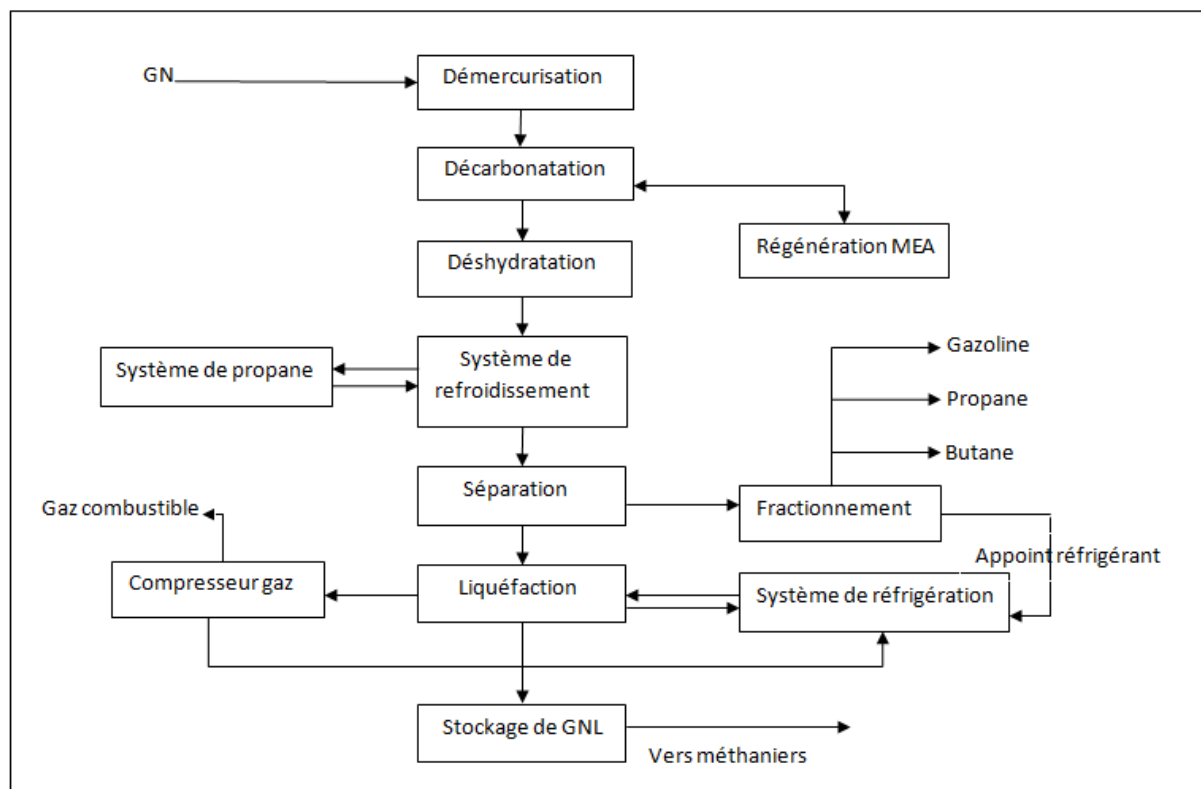


Figure I.5 : Schéma du procédé d'un train de liquéfaction.

I.4.2.1. Démercurisation :

L'unité de démercurisation est installée en amont de la section décarbonatation du gaz naturel. Elle est conçue pour réduire la concentration de mercure dans le gaz d'alimentation de 100 micros g/Nm³ à 0.01 micro g/Nm³.

I.4.2.2. Décarbonatation :

▪ **Elimination du CO₂:** Le GN est chauffé à 38°C dans le préchauffeur de GN d'alimentation avant de pénétrer dans la colonne d'absorption du CO₂ par le bas où, à contre-courant de la solution de MEA pauvre, il sera débarrassé du CO₂ jusqu'à une teneur inférieure à 70 ppm en tête de colonne. Puis le GN est dirigé vers la section de déshydratation. La solution de la MEA, pénétrant au niveau du 5^{ème} plateau de l'absorbeur s'enrichit en CO₂ au fur et à mesure qu'elle descend jusqu'au 29^{ème} plateau de l'absorbeur et quitte le fond de la colonne sous forme de solution de MEA riche pour se diriger vers la colonne de régénération de MEA ou de décarbonatation afin d'y être régénérée. **(Annexe 2)**

▪ **Régénération de la solution MEA :** La solution MEA riche est chauffée, puis introduite dans la tour de régénération à 01 bar. La solution de MEA riche en CO₂ descend dans la colonne. Pour y être épurée et en fond de colonne la solution s'appauvrit en CO₂ et est renvoyée à l'absorbeur après avoir réchauffé la MEA riche tout en se refroidissant à 38°C. Les gaz incondensables « essentiellement CO₂ » sont évacués à l'atmosphère.

I.4.2.3. Déshydratation :

Le gaz naturel décarbonaté est saturé en eau, d'où la nécessité d'éliminer complètement les traces d'eau pour obtenir à la sortie, une teneur inférieure à 1 ppm. Le gaz pénètre à une pression de 41 bars dans deux sécheurs en service et traverse les tamis moléculaires en perdant progressivement son humidité, un troisième sécheur étant en régénération. **(Annexe 3)**

I.4.2.4. Section séparation :

Le refroidissement du gaz naturel traité s'effectue par l'intermédiaire de quatre chillers. Il est refroidit par du propane atteignant ainsi une température de -33°C. Le passage du gaz dans l'inter – échangeur permet un deuxième refroidissement jusqu'à une température de -47°C ; Le gaz est ensuite injecté dans la tour de lavage où les produits lourds sont séparés par distillation du gaz naturel (éthane, propane, butane, ...). **(Annexe 4)**

I.4.2.5. Section liquéfaction :

Liquéfaction du gaz naturel **(Annexe 4)** Le gaz naturel riche en constituants légers provenant du ballon de reflux est alors prêt à être liquéfié à une température de -162°C permettant son transport dans des méthaniers, et à une pression proche de la pression atmosphérique (1,03 bars absolu).

▪ **Elimination de l'azote du GNL :** Le GNL sortant en tête de l'échangeur principal passe dans l'échangeur de rejets et se combine à la sortie avec un courant de propane et d'éthane en provenance du fractionnement, refroidi dans l'échangeur de rejets. Ce mélange liquide/gaz est détendu à 4,8 bar, dans le ballon de gaz combustible haute pression et le flash a pour effet de libérer l'azote dissout dans la phase liquide du GNL, qui est alors acheminé vers le réseau gaz combustible de procédé haute pression. Le réseau liquide du ballon de détente d'azote sert d'agent réchauffant au rebouilleur du dé-azoteur et par échange thermique avec le liquide de fond de la colonne se refroidit à -159°C avant de pénétrer en tête de la tour. Les composants légers essentiellement l'azote sont extraits par vaporisation et montent le long de la colonne où ils rencontrent à contre-courant au passage des plateaux le liquide injecté en tête. La phase liquide GNL se débarrasse de l'azote et est récupérée au fond du dé-azoteur où elle est acheminée vers le stockage par les pompes de produit GNL.

I.4.2.6. Section compression :

▪ **Boucle de propane : (Annexe 5)** La boucle de propane est une boucle à quatre étages qui permet de refroidir le gaz naturel et le MCR (multi composant réfrigérant) par palier successif, le propane, après compression et condensation, subit quatre niveaux de détente refroidissantes, lui permettant d'échanger ses frigories avec le MCR.

▪ **Boucle MCR (Système de réfrigérant mixte) : (Annexe 6)** La boucle MCR constitue la deuxième boucle frigorigène de l'unité de liquéfaction. Le fluide frigorigène est un mélange d'azote, de méthane, d'éthane et de propane. Ce dernier circule dans une boucle fermée à deux compresseurs MCR (I) et MCR (II) entraînés par deux turbine.[2]

Tableau I-2 : Composition de calcul du MCR.

Constituant	Pourcentage Molaire
AZOTE	02,7%
METHANE	40,7%
ETHANE	54,4%
PROPANE	02,2%

Le MCR sert à liquéfier le gaz naturel dans l'échangeur principal.

I.4.2.7. Section fractionnement :

L'unité fractionnement (**Annexe 7**) est alimentée par les produits de fond de la tour de lavage situé en amont de l'échangeur principal. La section est composée par :

• **Le dé-éthaniseur :** Il permet d'extraire l'éthane en haut de la colonne pour être réinjecter dans le GNL, l'excès est utilisé comme combustible dans le système fuel

gaz. Les produits de fond du dé-éthaniseur sont acheminés vers la colonne de dépropanisation.

- Le dé-propaniseur : Il constitue la 2^e tour de fractionnement. Son rôle est de produire le propane en tête de colonne et de l'acheminer en grande partie vers le complexe GP1/Z pour y être commercialisé ou réinjecté dans le GNL, l'autre partie sert comme appoint dans la boucle MCR et propane réfrigérant ; les produits de fond sont acheminés vers la colonne de dé-butanisation.

- Le dé-butaniseur : Il constitue la 3^e tour de fractionnement. Le produit de tête de colonne est du butane à (98.8%), « commercial » est envoyé vers le complexe GP1/Z pour être commercialisé ou réinjecté dans le GNL. Le produit de fond de la tour constitue la gazoline qui est envoyé vers stockage pour y être commercialisée. [3]



Figure I.6 : Zone de procédé

I.4.3. Zone de stockage et chargement :

Le GNL est stocké à -162°C dans 3 bacs d'une capacité unitaire de 100 000 m³ chacun. Le chargement du produit est assuré au niveau de 2 quais de chargement pouvant recevoir des méthaniers d'une capacité de 40 000 à 145 000 m³ GNL. Le stockage de la gazoline produite est assuré par deux (02) bacs de 14.500 m³ chacun.[4]

Conditions de stockage de GNL :

- Masse moléculaire : 18,2 g/mol.
- Pression : 1,03 bar absolu.
- Température : -162°C.



Figure I.7 : Zone de stockage GNL pour le chargement

I.5. Chargement et Installation d'Expédition :

Les installations de chargement permettent le transfert du GNL contenu dans les bacs de stockage vers les cuves des méthaniers. Les cinq motopompes effectuent le pompage du GNL et le refoulent à travers un collecteur commun jusqu'aux quatre bras de chargement installés sur le quai. Ces bras sont articulés pour permettre le raccordement aux brides du navire avec une certaine liberté de ce dernier. Un cinquième bras est destiné à la collecte des vapeurs du méthanier lors de sa mise en froid et du chargement.

Donc elles sont composées de :

- Cinq (05) pompes de chargement d'une capacité unitaire de $2500 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Une (01) pompe de transfert d'une capacité de $2500 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Deux (02) pompes de refroidissement d'une capacité unitaire de $60 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Deux (02) quais de chargement composés chacun de cinq (05) bras de chargement dont un est destiné au retour de la vapeur en provenance des navires. Chacun des deux (02) quais est conçu pour réceptionner des méthaniers d'une capacité située entre 50 000 et 130. 000 m^3 de GNL.

La production du Propane (410.000 tonnes/an) et du Butane (327.000 tonnes/an) est acheminée par canalisation vers le complexe GP1/Z. Pour des raisons de flexibilité maximale, les installations de productions, de stockage et de chargement de GNL des complexes GL1/Z et GL2/Z sont interconnectées. [8].

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le site de liquéfaction de gaz naturel GL2/Z, ses activités et ses produits finis, on a aussi présente un aperçu sur les différentes zones du complexe.

CHAPITRE II

**La section liquéfaction et les boucles
MCR, PROPANE**

II.1. Introduction :

Le procédé de liquéfaction du gaz naturel consiste à le refroidir et le liquéfier pour produire du GNL.

Cette liquéfaction n'est possible que si le gaz est refroidi à une température inférieure à celle de son point de rosée. Cette température est en fonction de la pression. Pour un corps pur à pression fixe, la température du point de rosée est égale à la température du point de bulle, et il est possible de liquéfier le gaz en assurant une réfrigération suffisante pour atteindre sa température de rosée.

Pour un mélange, tel que le gaz naturel, la condensation a lieu sur un intervalle de températures comprises entre les points de rosée et de bulle ; il nous faut donc plusieurs réfrigérants pour atteindre cet objectif. En règle générale, un réfrigérant unique permet de réaliser un refroidissement dans un intervalle de 60 à 90°C. Etant donné qu'une unité de liquéfaction nécessite un niveau de réfrigération d'au moins -160°C (température à laquelle le méthane se liquéfie sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique), deux boucles frigorifiques fermées, le PROPANE et le MCR (réfrigérant à composants mixtes) sont utilisées.

Ces dernières ont été conçues sur la base du cycle frigorifique « Carnot ». Dans ce cycle, la réfrigération est assurée par la compression, le refroidissement, la détente et l'évaporation. [5].

Ce cycle est représenté dans le schéma suivant :

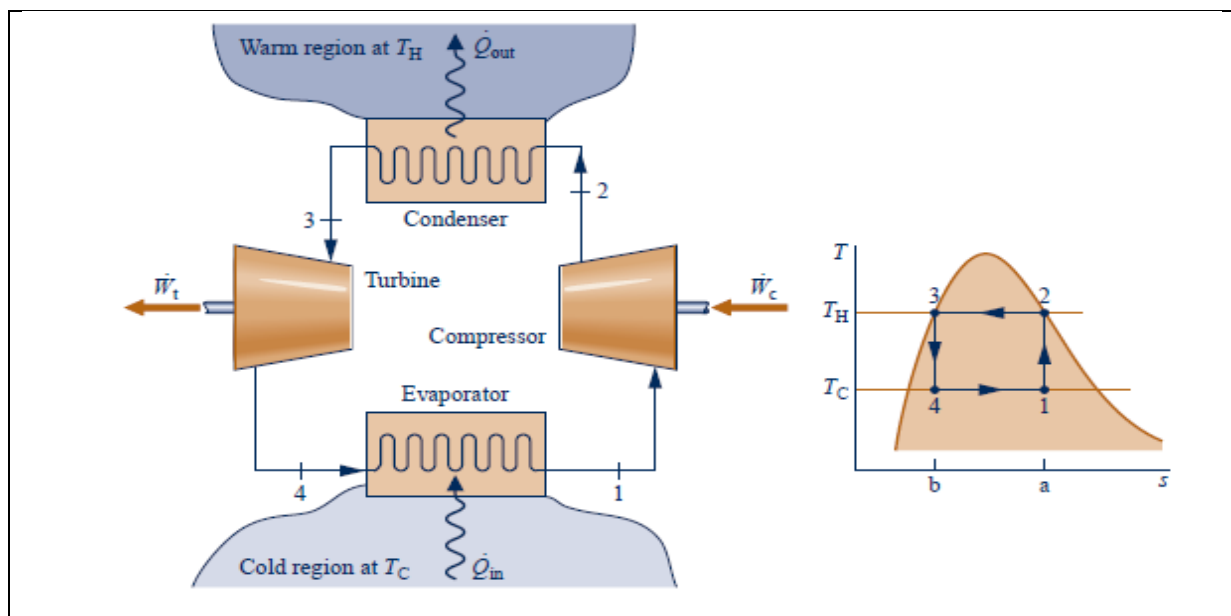


Figure II.1 : cycle de Carnot

Le refroidissement à des températures supérieures à 35°C sera assuré par des refroidisseurs à eau de mer, entre 35 et -35°C par le propane, entre -35° et -150°C par le MCR et enfin de -150 à -160°C par la détente de l'azote.

II.2. Différents procédés de liquéfaction :

Le but de la liquéfaction est de faire passer le GN d'une forme gazeuse et diffuse à une forme liquide et condensée, afin d'assurer son transport à travers les mers. Un (01) mètre cube de GNL produit par ré-vaporisation environ 600 normaux mètres cubes de gaz.

Etant donné que le GN est composé principalement de méthane et que la température de bulle du GNL à pression atmosphérique est de l'ordre de -160 °C , il convient d'atteindre cette température pour le liquéfier.

Le premier procédé de liquéfaction a été la cascade classique. Les cycles de réfrigération avec des corps purs étaient déjà utilisés et l'extrapolation fut relativement facile. La cascade classique est constituée de trois cycles de réfrigération placés en cascade :

- Le cycle propane permet d'atteindre -35 °C .
- Le cycle éthylène -100 °C .
- Le cycle méthane -155 °C .

Un flash final à pression atmosphérique permet d'obtenir la température de bulle (-160 °C) du GNL.

L'apparition de puissants moyens de calcul par ordinateur a permis le développement d'une deuxième génération de procédé de liquéfaction avec la cascade incorporée au cycle à fluide mixte.

II.2.1. Procédé en CASCADE :

Le nom du procédé est dérivé de la série ou cascade de réfrigérants pour refroidir jusqu'à leur point de rosée les gaz à faible point d'ébullition tel que le méthane. La cascade traditionnelle de GNL emploie généralement du Propane ; de l'Éthylène et du Méthane comme réfrigérants intermédiaires. D'autres combinaisons tel que : L'Ammoniac/ Éthylène / Méthane ou Fréon 22/ Fréon 13 /Méthane sont possibles ; mais ne sont pas utilisés dans les procédés GNL actuellement vu leurs coûts très élevés.

Le GL4/Z (ex CAMEL) incorpore un procédé en cascade très simple conçu par TEAL (Technip et Air Liquide).

Trois (3) trains au GL1/K à Skikda utilisent le procédé TEALARC, tandis que trois autres, le procédé PRITCHARD

A. Cascade incorporée à une pression :

La vaporisation du fluide frigorigène s'effectue à une seule pression tandis que la liquéfaction du GN et du fluide frigorigène se fait dans des faisceaux séparés situés dans un même échangeur.

B. Cascade incorporée à deux pressions :

La vaporisation du fluide frigorigène s'effectue dans les échangeurs à moyenne pression pour liquéfier le fluide frigorigène lui-même, et dans les échangeurs à basse pression pour liquéfier le GN.

C. Cascade incorporée à une pression et une seule condensation partielle à température ambiante :

Le procédé PRICO utilise cette cascade. Le faible taux de compression est compensé par un grand débit du fluide frigorigène qui s'effectue en une seule pression tandis que la liquéfaction du GN et du fluide frigorigène s'effectue dans des faisceaux situés dans un même échangeur à plaque.

II.2.2. Procédé MCR pré-refroidi au Propane (Celui utilisé au complexe GL2/Z) :

Le procédé d'APCI (AIR PRODUCT) utilise une combinaison des deux cycles : Propane et MCR. Dans ce procédé, un cycle au propane pur permet de pré-refroidir à -35°C la cascade incorporée, ce qui donne à ce procédé toute la souplesse désirée. L'avantage principal de ce procédé réside dans la taille de l'échangeur principal qui est moins encombrant que celui du cycle simple au MCR. Ce procédé est une cascade à deux fluides dans lequel le fluide ayant le point d'ébullition le plus bas est un mélange de réfrigérants mixte, composé généralement d'Azote, de Méthane, de Propane et d'Ethane.

La totalité du travail au delà de -30 à -150°C est assuré par le MCR.

Etant à deux cascades avec deux fluides, ce procédé nécessite donc deux (2) compresseurs: L'un, pour le Propane et le second pour le MCR.

Dans la pratique et pour des raisons d'encombrement, le compresseur MCR sera divisé en deux compresseurs de petite taille.

NOTA : Il existe d'autres procédés dans le monde tels que :

- à cascade modifiée et à détente.

II.3. Section liquéfaction au complexe GL2/Z :

La section de liquéfaction sert à refroidir et condenser le GN, extraire l'hélium et l'azote pour la commercialisation et elle permet aussi de fournir le fuel gaz pour les chaudières ainsi l'ajustement du pouvoir calorifique du GNL (par l'injection du C2 et C3)

Cette section est représentée dans le schéma ci-dessous :

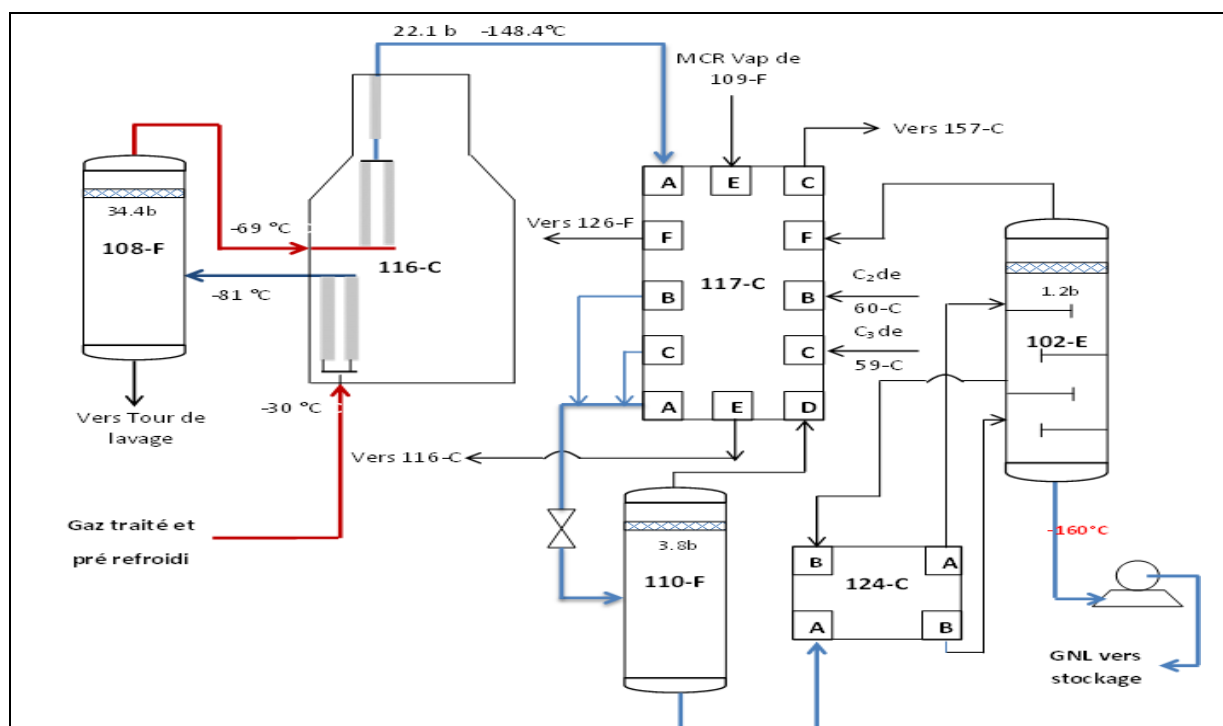


Figure II.2 : Section liquéfaction.

II.3.1. Description générale de la section de liquéfaction :

Les vapeurs de tête du ballon de reflux 108F se dirigent vers le faisceau central du 116C où elles seront refroidies par le MCR. Ce courant monte dans le 116C en traversant le faisceau froid où il sera condensé par le MCR liquide issue de la détente à travers la JT froide.

Le GNL liquéfié sort en tête du 116C et se dirige vers l'échangeur de gaz de rejet 117C. Dans cet échangeur à plaques, le GNL sera refroidi tout en chauffant les vapeurs de tête du dé-azoteur 102-E et du ballon flash 110-F. A sa sortie, il se mélangera avec le courant des réinjections de C_2 et C_3 . Ces deux courants (C_2 et C_3) sont également sous refroidis dans le 117C par les vapeurs de tête du 110F et 102-E. Ce mélange pénètre dans le 110F où suite à un flash les vapeurs seront séparées du liquide. Les vapeurs du 110F et 102-E seront donc réchauffées dans le 117C tout en refroidissant les réinjection C_2 , C_3 et le GNL. (Voir **Figure II.2**)

Les vapeurs de tête du 102-E sont acheminées vers le 104J, tandis que celles du 110F seront dirigées vers Hélios pour produire de l'hélium liquide et de l'azote vapeur ou vers les réchauffeurs 157 CA/ CB pour servir de combustible pour les chaudières (marche perturbée).

Le GNL liquide sortant du fond du 110F sera sous refroidi dans le rebouilleur 124C par le GNL à -162°C du fond de 102-E, puis sera détendu à travers la LV 506 avant d'alimenter le dé-azoteur 102-E, le courant liquide de GNL descendant sera en contact avec les vapeurs montantes pour séparer l'azote du GNL afin de contrôler les spécifications et le pouvoir calorifique.

Le GNL du fond 102-E sera acheminé par les pompes GNL 110J ou JA vers les bacs de stockage.

II.3.2. Rôle et spécifications des équipements :

* **Echangeur principal 116C** : Composé de cinq (05) faisceaux :

- Faisceau chaud : Il est appelé « condenseur de tête » de la tour de lavage 101-E, donc il sert à produire du reflux pour cette colonne.
- Faisceau central et faisceau froid : Condensent et sous refroidissent le GNL
- Faisceau MCR vapeur ($N_2 - C_1$) : Il permet de refroidir, de condenser et de sous – refroidir les composants ($N_2 - C_1$) avant leur détente à travers la JT froide dans la calandre.
- Faisceau MCR liquide ($C_2 - C_3$) : Il permet de sous- refroidir les composants ($C_2 - C_3$) avant leur détente à travers la JT chaude dans la calandre.

* **Echangeur MCR / gaz de rejet 117C** : Echangeur à plaques composé de six (06) passes permettant de:

- Réchauffer le FG à haute et basse pression (vapeurs de tête des 110F et 102-E) avant qu'ils soient envoyés vers Hélios ou vers le 104J.
- Récupérer les frigories du FG à haute et basse pression pour sous refroidir les courants de réinjection C_2 et C_3
- Apporter un léger sous refroidissement au courant GNL.

La passe MCR vapeur permet d'éliminer l'excès de frigories du FG par réglage de la température.

* **Ballon de flash haut pression 110F** : Grâce à l'ajustement de la détente, il permet d'extraire l'hélium et une grande quantité d'azote qui seront commercialisés après séparation dans l'unité Hélios.

* **Dé-azoteur 102-E** : C'est une colonne avec 10 plateaux à clapet et plateau récepteur qui permet d'ajuster et d'extraire l'excès d'azote du courant de GNL.

* **Rebouilleur 124C** : Il fait fonction de rebouilleur et de condenseur pour apporter les calories nécessaires à l'ajustement de l'azote dans le GNL.

* **Pompes GNL 110 J/ JA** : Elles acheminent le GNL produit du fond de 102-E vers les bacs de stockage.

II.4. La boucle MCR :

Dans un procédé de liquéfaction avec pré-refroidissement au propane, le MCR (Réfrigérant à composants multiples ou mixtes) se compose de quatre constituants :

$N_2 = 2.7 \%$; $C_1 = 40.7 \%$; $C_2 = 54.4\%$; $C_3 = 2.2 \%$ à 100 % de charge
Et $N_2 = 2.7 \%$; $C_1 = 44 \%$; $C_2 = 47.9 \%$; $C_3 = 5.4 \%$ à 115 % de charge

L'azote est le composant le plus léger qui permet d'obtenir une Δt suffisante lors de son passage à travers la vanne Joules Thomson à l'extrémité froide de l'échangeur principal 116C.

Le propane est le composant le plus lourd qui permet d'établir un point de rosée dans la calandre, donc une Δt à l'extrémité chaude du 116C.

Quant aux composants C_1 et C_2 , qui constituent le plus grand pourcentage dans le MCR, assurent une Δt entre les fluides côté tube et calandre du 116C.

II.4.1. Rôle de la boucle MCR :

Le MCR fournit à l'échangeur principal la quantité de froid nécessaire à la liquéfaction du GN et la condensation des vapeurs de tête de la tour de lavage .Le principe utilisé est celui d'une boucle frigorifique classique basée sur le cycle « CARNOT ».

II.4.2. Description générale de la boucle MCR :

Le courant de MCR sort du fond (calandre) du 116 C sous forme vapeur et pénètre dans le ballon d'aspiration 106F où il sera acheminé vers le compresseur MCR (1^{er} étage) 102J .Après compression, le MCR entre dans le refroidisseur intermédiaire 110 C où il sera refroidi par l'EDM .A la sortie, il est dirigé vers le ballon 107F puis vers le compresseur 103J (2^{ème} étage) .Afin d'éliminer la chaleur de compression, il sera refroidi dans le 111C (refroidisseur complémentaire).

Le MCR à haute pression (45 bars) sera refroidi et partiellement condensé au propane à travers les échangeurs (112C-113C-114C-115C) Les courants MCR à haute pression et à deux phases sont dirigés vers le ballon de séparation 109F dans lequel aura lieu la séparation entre les deux phases.

Le courant de vapeur MCR en tête du 109F se sépare en deux :le petit courant se dirige vers le 117C (échangeur de rejet) où il sera condensé et sous refroidi à contre-courant par l'intermédiaire des vapeurs de tête des 110F et 102 E et détendu par une vanne de détente (TV 514) ,l'autre partie de courant MCR vapeur du 109F se dirigera vers le faisceau chaud de l'échangeur principale 116C où elle sera totalement condensée et sous refroidit avant d'être acheminée vers le faisceau froid pour y être sous refroidit complètement .(voir **Figure II.3**)

Le MCR sortira sous forme de liquide à l'extrémité froide (en tête) du 116 C. Sa pression sera alors réduite par la JT froide (PV 567). Après détente, les deux courants se combinent et entrent de nouveau dans la calandre du 116C .pour être distribués dans la calandre de manière à fournir les frigories au faisceau froid.

Le MCR liquide du fond du 109F sera acheminé dans le faisceau chaud où il sera sous refroidi lors de son passage à travers le faisceau central, sa pression subit une détente à travers la JT chaude installée à l'extérieur du 116C .Ce courant dont la pression et par conséquent la température ont été réduites, pénètre à nouveau dans la calandre du 116C.

Le liquide et les vapeurs formées par la détente, se mélangent avec le liquide et les vapeurs descendants le long de la calandre depuis le faisceau froid .Le liquide se vaporise par écoulement sur les tubes des faisceaux centrale et chaud, assurant ainsi la réfrigération des deux faisceaux tubulaires GN et GNL.



II.5. La boucle propane :

La boucle de réfrigération au propane est utilisée dans les procédés de liquéfaction du gaz naturel comme une partie d'un cycle de réfrigération en cascade visant à éliminer la chaleur d'un cycle de réfrigérant multi-composant qu'est le MCR, et à pré-refroidir le gaz naturel avant l'étape de la liquéfaction.

II.5.1. Rôle de la section :

Le système propane est une boucle de réfrigération à 04 niveaux de pressions et de températures qui permet une approche précise de la température du gaz d'alimentation et du MCR, d'où son efficacité dans les procédés de liquéfaction.

La puissance frigorifique de cette boucle est utilisée à 75% dans les chillers MCR, à 15% dans les chillers GN et à 10% pour les diverses utilisations.

II.5.2. Description :

La boucle de réfrigération au propane se compose de 04 niveaux de pressions et de températures. Les vapeurs de propane, après compression dans le compresseur propane 101J à 04 étages sont désurchauffées et condensées dans les refroidisseurs 102 CA et CB à contre courant par l'eau de mer.

Le propane sera dirigé ensuite vers l'accumulateur 101F qui alimentera les circuits et les équipements suivants :

141C / 102F / 103C / 112C / 160C / 157 CA / CB et les lignes de trempe.

Les vapeurs de propane, générées dans les échangeurs cités, retourneront vers le 101J en passant par les ballons d'aspiration, seront comprimées et le cycle se renouvellera.

L'appoint de propane pour cette boucle fermée est assuré par le dé-propaniseur 152E.

a) Réfrigérant propane 1^{er} niveau :

Une partie du propane liquide du 101F est envoyée directement dans le ballon d'aspiration 102F par la LV 303 après détente. Le C3 liquide du 101 F alimente également les échangeurs ci dessous, et les vapeurs générées seront dirigées au ballon d'aspiration 102F.

- Refroidisseur de gaz d'alimentation 141C

- Refroidisseur du gaz d'alimentation 103C: Il refroidit le GN selon le même principe que le 141C jusqu'à +5°C.

- Refroidisseur du réfrigérant mixte où MCR 112C: Il refroidit le MCR à 9°C.

- Sous refroidisseur butane 160C

- Réchauffeurs de gaz combustible 157 CA / CB

b) Réfrigérant propane 2^{ème} niveau :

Une partie du C3 liquide venant du 102F passe après détente par la LV 304 dans le ballon 103F (2,5 bars ; -10°C). Ce ballon (102 F) alimente les équipements ci dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation 104C : Il permet de refroidir le GN à - 6°C

- Refroidisseur de MCR 113C: Il refroidit le réfrigérant mixte également à - 6°C

c) Réfrigérant propane 3^{ème} niveau :

Le C3 liquide venant du 103F passe après détente par la LV 305 dans le ballon 104F (1,4 bars ; -21°C). Ce ballon (103 F) alimente les équipements ci dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation 105C

- Refroidisseur de MCR 114 C

- Condenseur de tête 151 C du dé-éthaniseur.

- Sous refroidisseur de butane 160C

Les vapeurs produites dans ces échangeurs sont collectées dans le ballon 104F et envoyées vers le 2^{ème} étage du compresseur 101J.

d) Réfrigérant propane 4^{ème} niveau :

Le propane liquide venant du ballon 104F passe après détente par la LV 306 dans le ballon 105F (0,3 bar ; - 35°C). Ce ballon (104 F) alimente les équipements ci dessous :

- Refroidisseur de gaz d'alimentation 106C
- Refroidisseur de MCR 115C
- Refroidisseur de tête 151C
- Sous refroidisseur de butane 160C

Les vapeurs venant de ces échangeurs seront collectées dans le ballon 105F et seront aspirées par le 101J.

II.5.3. Circuit de transfert :

A l'aide de ce circuit, on peut recevoir ou transférer du propane liquide ou vapeur.

- Chambre de dégagement (PR 660): c'est un ballon qui permet de récupérer les lourds (huile, butane et gazoline) de tout le circuit de la boucle propane et de les envoyer vers CLD. Pour faciliter ce transfert, on utilisera la ligne de vapeur venant de la tête du 101 F (pressurisation du PR.). Pour faciliter les purges vers le PR, on utilisera la ligne de décompression vers 105 F.
- Ballon 125 F : c'est une réserve pour la pompe. Pour faciliter le remplissage, on décomprime par le by-pass de la soupape.
- Pompe 125 J : la ligne au point bas de cette pompe sert à la vidange vers CLD et elle est utilisée pour la mise en froid. La ligne du point haut du corps de la pompe sert au retour du refroidissement de la garniture numéro 1 (vanne maintenue ouverte). La deuxième garniture est refroidie au méthanol.

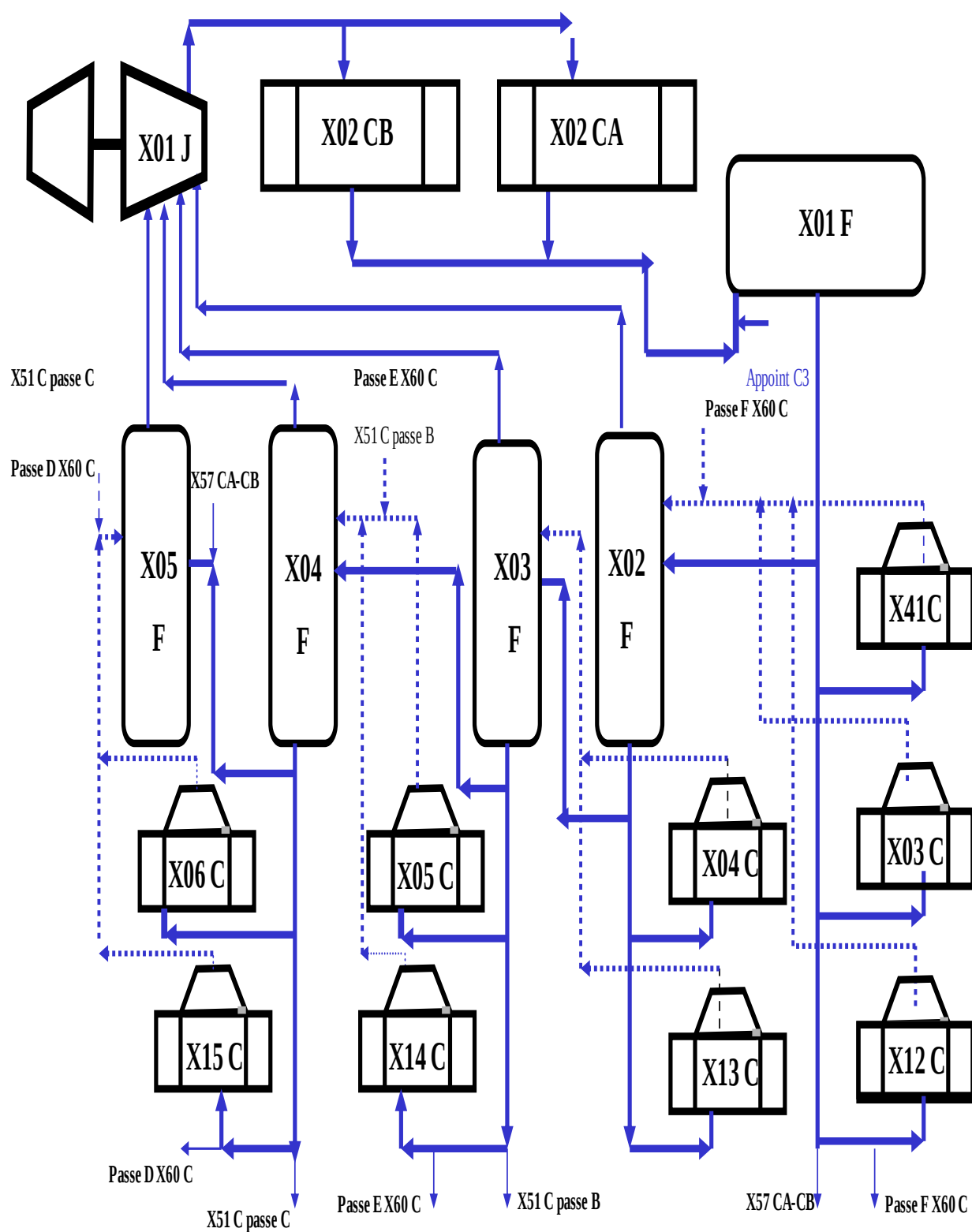


Figure II.4 : Schéma de la boucle propane.

II.5.4. Rôle des équipements :**101 J :**

C'est un compresseur qui a pour fonction de faire passer le fluide d'une pression inférieure à une pression supérieure. C'est également un compresseur multicellulaire (5 étages) à multi-étage d'aspiration (04).

102 CA/CB

Ces condenseurs maintiennent en permanence un niveau de propane pour éviter le passage des vapeurs de propane vers l'accumulateur 101F. Pour une efficacité maximale, le niveau doit être maintenu au plus bas dans les 102 CA/CB. Il joue également le rôle de piège pour les incondensables.

101 F :

C'est un ballon accumulateur qui sert à stocker le propane liquide. Il constitue une réserve pour la boucle et il alimente certains échangeurs.

141C :

C'est un refroidisseur de gaz d'alimentation qui permet de refroidir le GN à la sortie du 131E pour éliminer une partie de l'humidité contenue dans le GN. La pression propane dans cet échangeur est contrôlée de façon à avoir une température de GN située entre 18 et 24°C et ce afin d'éviter la formation d'hydrates et l'évaporation de l'eau dans le GN.

103 à 106C : ces refroidisseurs de gaz d'alimentation permettent de refroidir le GN.

112 à 115C : ces refroidisseurs permettent de refroidir le MCR.

151C : Condenseur de tête du dé-éthaniseur qui permet de condenser les vapeurs de tête du 151E C'est un échangeur à plaque.

157CA/CB : Réchauffeurs de gaz combustible à environ 20°C (vapeurs issues du fractionnement).

160C : ce sous refroidisseur de butane refroidit l'éthane et le propane, et sous refroidit le butane. C'est un échangeur à plaque.

102 à 105 F :

Ces ballons d'aspiration permettent la séparation du propane pour protéger le compresseur contre l'aspiration de liquide. Ils refroidissent les vapeurs de propane quand le compresseur est en recyclage et assurent enfin une réserve de C3 liquide pour l'alimentation des refroidisseurs et des circuits annexes.

II.6. Conclusion :

Le but de la liquéfaction est de faire passer le GN d'une forme gazeuse et diffuse à une forme liquide et condensée, afin d'assurer son transport à travers les mers.

La liquéfaction d'un gaz n'est possible que si le gaz naturel traité riche en constituants légers est refroidi à une température inférieure à son point de rosée qui est fonction de sa pression.

En général pour liquéfier ce gaz, il faudrait le pré-refroidir, le refroidir et le condenser en utilisant des réfrigérants vaporisables afin d'éliminer toute la chaleur.

Pour réaliser la liquéfaction du gaz naturel au GL/2Z, deux (02) boucles sont utilisés :

Le propane pré-refroidit le GN, le MCR (composant mixte) permet de refroidir et de liquéfier le GN dans l'échangeur principal 116C.

CHAPITRE III

**Simulation des performances
énergétiques de la boucle MCR sous
HYSYS**

Problématique :

Les systèmes frigorifiques jouent un rôle primordial et incontournable dans toute technologie de liquéfaction du gaz naturel.

Le procédé de liquéfaction utilisé dans le complexe GL2/Z est basé sur deux boucles: une boucle à propane et une boucle du MCR (Multi Composant Réfrigérant).

La boucle de réfrigération à propane est utilisée pour condenser une partie du MCR et pré-refroidir le gaz naturel, pour pouvoir ainsi séparer aisément ses constituants lourds et prévenir tout bouchage possible en aval du procédé de liquéfaction.

La boucle de MCR est utilisée pour la liquéfaction et le sous-refroidissement du gaz naturel pour produire du GNL, ce réfrigérant se compose de quatre constituants :

N_2 : 2.7% C_1 : 40.7% C_2 : 54.4% C_3 : 2.2%

Cette composition soumise à un contrôle permanent qui assure sa régularité constante, car l'efficacité du cycle est très sensible à la composition du réfrigérant.

Afin d'obtenir l'efficacité la plus élevée, la composition du réfrigérant doit être maintenue aussi proche que possible de la composition design. Ce n'est pas le cas actuel pour le complexe GL2/Z qui connaît des perturbations importantes de la composition de ce réfrigérant (MCR) donc une réduction du rendement.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons abordé la problématique liée aux perturbations de la boucle MCR, au niveau du complexe GL2/Z, en suivant les étapes :

1. Chercher les causes de ces perturbations et leurs conséquences.
2. Réaliser une simulation de la boucle de réfrigération (MCR) pour étudier l'impact de cette perturbation sur le cycle de réfrigération.
3. Proposer des solutions pour minimiser ces perturbations.

III.1. Introduction :

Afin de pouvoir analyser plus en détail la problématique décrite au-dessus, nous avons élaboré la simulation de la boucle MCR au moyen du logiciel AspenTech-Hysys.

Ce qui nous permettra d'étudier l'influence de la perturbation de la boucle MCR sur les paramètres importants du procédé (COP, Température GNL...).

III.2. Simulation :

La simulation permet de reproduire les opérations unitaires par des modèles mathématiques les différents phénomènes de transfert de masse, d'énergie et de quantité de mouvement et la résolution des systèmes d'équations obtenus.

Le simulateur peut être utilisé lors de la conception d'un procédé industriel afin de :

- ❖ Établir des bilans de matière et d'énergie d'un procédé industriel.
- ❖ Dimensionner les équipements de ce procédé.
- ❖ Etudier l'influence d'un paramètre donné sur le bon déroulement d'un procédé ou partie du procédé.

Ou bien dans le suivi des procédés qui sont déjà installés afin de :

- ❖ Réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de Compositions de l'alimentation ou des conditions de fonctionnement de certains équipements.
- ❖ Déterminer les performances des équipements.
- ❖ Adopter le process utiliser à des nouvelles lois réglementaires (concernant le produit, l'environnement...etc).

III.2.1. Logiciels de simulation des procédés :

Il existe un très grand nombre de logiciels de simulation des procédés chimiques sur le marché. Parmi les plus utilisés au niveau mondial, on peut citer : ASPEN TECH-HYSYS, CHEMCAD, DESIGNII, IDEAS, INDISS, PROSIM, PROII, SIM42.

Le logiciel que nous avons utilisé pour réaliser notre étude est le logiciel HYSYS de la société ASPENTECH.

III.2.2. Présentation de HYSYS :

Le simulateur HYSYS permet de simuler un ensemble des opérations unitaires concernant certains appareils :(ballons, compresseurs, colonnes de distillation, échangeurs de chaleur, etc.). Ces opérations sont connectées dans un schéma de procédé PFD par le courant d'informations généré dans ces opérations.

Donc, le logiciel n'est rien d'autre qu'un programme informatique destiné à la simulation des procédés de l'industrie du gaz, des procédés de raffinages et de la pétrochimie.

III.2.3. Fonctionnement de HYSYS :

Pour que le logiciel HYSYS puisse résoudre le schéma de procédé et/ ou même dimensionner quelques équipements de ce procédé, l'utilisateur doit au préalable :

- ❖ Spécifier les constituants du gaz, du liquide ou du mélange.
- ❖ Choisir un modèle thermodynamique convenable.
- ❖ Etablir le schéma PFD de la section d'étude.
- ❖ Spécifier les paramètres nécessaires pour le calcul de chaque opération unitaire.

Les modèles thermodynamiques sont utilisés pour la détermination des propriétés thermodynamiques, volumiques ainsi que l'état physique des composés ou des mélanges.

La figure suivant montrant quelques vocabulaires qui sont utilisés pendant les étapes de construction d'un modèle :

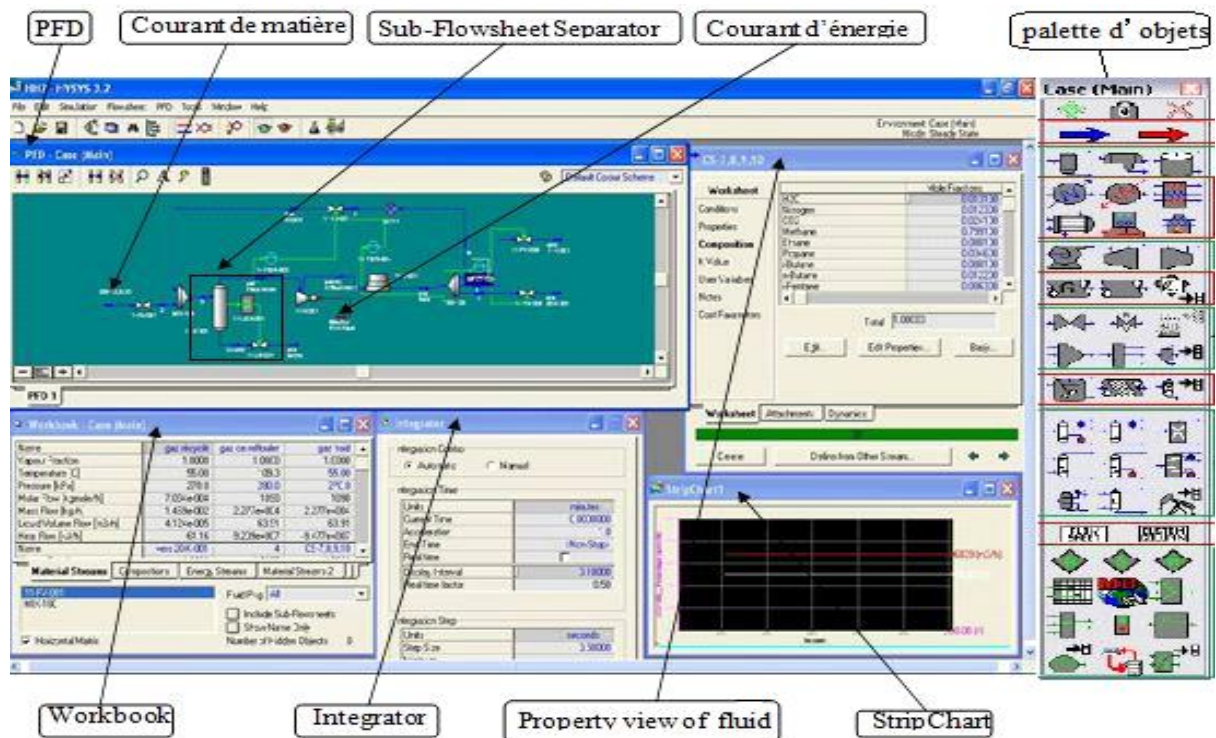


Figure III.1 : Interface HYSYS.

Parmi les modèles thermodynamiques existants, il y a lieu de citer ceux de :

- ❖ PENG ROBINSON (PR).
- ❖ SOAVE REDLICH KWONG (SRK).
- ❖ LEE KESLER PLOCKER.
- ❖ KABADI DANNER.
- ❖ UNIQUAC.
- ❖ AMINE PROPERTY PACKAGE.

La réussite de la simulation dépend du choix du modèle thermodynamique adéquat, parce que ce dernier est établi pour une classe de fluides et un domaine de conditions de pression et de température recommandé.

III.2.4. Choix du modèle thermodynamique :

Pour assurer une simulation fiable, il est impératif de choisir un modèle thermodynamique qui convient à notre système de MCR constitué d'un mélange d'hydrocarbures.

Ce modèle sera défini par l'une des équations d'état de forme $Z = f(V)$ permettant exactement de calculer les paramètres thermodynamiques en faisant intervenir des constantes d'interaction propres à chaque composant.

Dans le cas d'un gaz réel, on a:

$$P.V=Z.R.T$$

L'option qui modélise l'équation d'état de PENG-ROBINSON qui est recommandée dans le cas d'un mélange faiblement polaire, ce qui le cas du mélange de MCR.

La PR s'exprime sous la forme :

$$P = \frac{R.T}{V + C - b} - \frac{a}{(V + C)^2 + 2b(V + C) - b^2}$$

Où:

Z : Facteur de compressibilité .

P : Pression absolue.

V : Volume molaire du mélange gazeux.

R : Constante des gaz.

T : Température absolue du mélange.

a et b : Facteurs propres à ces équations d'état.

C : Constante donnée.

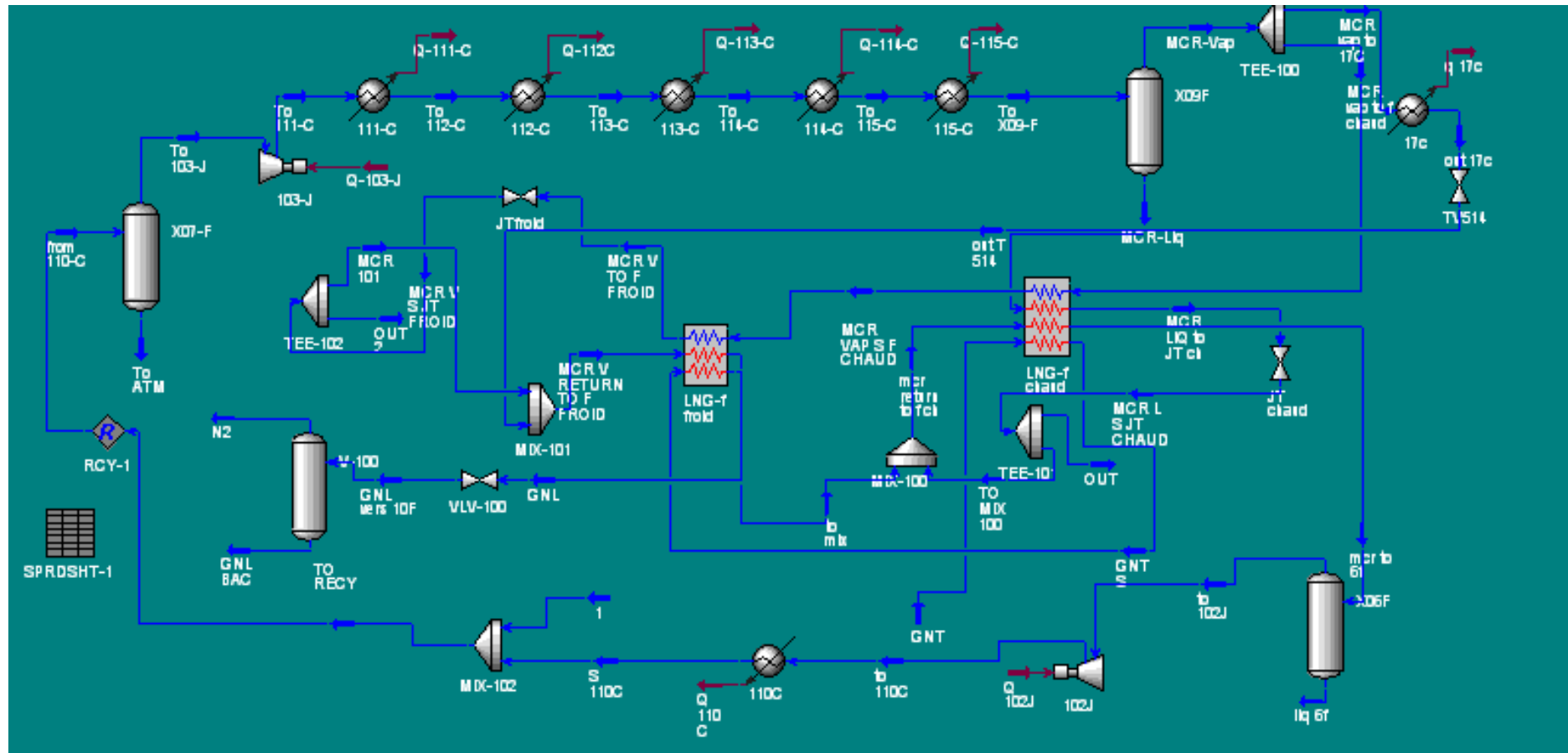


Figure III.2 : Schéma (PFD) représentatif de la boucle MCR et section liquéfaction

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

III.2.5. Méthodologie de la simulation :

Pour varier la composition du MCR et voir son impact sur la boucle

- ❖ Dans un premier temps nous avons validé notre simulation de la boucle à partir des données design afin de vérifier les performances du simulateur HYSYS en comparant les résultats obtenus par simulation et ceux du design.
- ❖ Ensuite ; nous avons simulé les cas réelles (composition actuelle du MCR), et étudié son impact sur la boucle.
- ❖ La figure ci-dessus représente la configuration de notre simulation.

III.3. Représentation de l'échangeur principale :

Vu, que le logiciel HYSYS ne dispose pas, dans sa palette de simulation d'opération unitaire, d'échangeur tubulaire, ce dernier ne peut être représenté dans cette simulation comme un échangeur (tube-calandre), il aura fallu le diviser en deux parties :

Partie faisceau chaud : (échangeur a plaques 4passes)	- Coté tube du MCR liquide - Coté tube du MCR vapeur - Coté tube du GN a refroidit - Coté calandre contient du MCR liquide venant de la JT chaude +MCR vapeur venant du faisceau froid.
Partie faisceau froid : (échangeur a plaques 3 passes)	- Coté tube MCR vapeur - Coté tube GN à refroidir - Coté calandre MCR vapeur venant de la JT froide
JT chaude	- C'est la vanne Joule-Thomson située dans le faisceau chaud de l'échangeur principal
JT froide	- C'est la vanne Joule-Thomson située dans le faisceau froid de l'échangeur principal

Il est important d'inclure dans la simulation les autres équipements composants la boucle du MCR et qui seront définis comme suit:

Compresseur MCRI (1 ^{er} étage)	X-02J
Compresseur MCRII (2 ^{ème} étage)	X-03J
Echangeur de chaleur à eau de mer	X-10C
	X-11C
Echangeur à propane	X-12C
	X-13C
	X-14C
	X-15C
Echangeur de rejet	X-17C
Ballon séparateur	X-06F
	X-07F
	X-09F

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

III.4. Données de la simulation « cas design »:

Nous avons introduit dans notre simulation les données design suivantes :

❖ Composition du MCR :

- Débit total du MCR : $\dot{m}_T = 5.302 \cdot 10^5$ Kg/h.
- Débit du MCR entrant 117-C : $\dot{m}_e = 1.697 \cdot 10^4$ Kg /h

Composition	%
N2 (Azote)	2.7
C1 (Méthane)	40.7
C2 (Ethane)	54.4
C3 (Propane)	2.2

❖ Composition du GN:

Charge GN entrant :

- Débit : $\dot{m} = 1.9617 \cdot 10^5$ Kg /h
- $T_E : -75^\circ\text{C}$
- $P_E : 34.99$ bar
- Pression GNL sortie 116C : 22bar

Composition	%
He	$1.1568 \cdot 10^{-3}$
N2	$6.3170 \cdot 10^{-2}$
C1	0.8928
C2	$4.2256 \cdot 10^{-2}$
C3	$4.7039 \cdot 10^{-4}$
IC4	$2.4467 \cdot 10^{-6}$
NC4	$1.0385 \cdot 10^{-6}$
IC5	$6.4329 \cdot 10^{-9}$
NC5	$2.3747 \cdot 10^{-9}$
IC6	$1.8087 \cdot 10^{-11}$
NC6	$1.441 \cdot 10^{-11}$

Tableau III.1 : Composition du gaz naturel traité entrant dans l'échangeur principal

❖ Paramètres de marche introduit au simulateur :

	Unité	Aspiration du 1 ^{er} compresseur	Refoulement du 1 ^{er} compresseur	Aspiration du 2 ^{ème} compresseur	Refoulement du 2 ^{ème} compresseur
Température	°C		74.7	32.2	121
Pression	Bar	2.9	12.89	12.34	45.7

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

Equipment	T _E (°C)	T _S (°C)	P _E (bar)	P _S (bar)	ΔP (bar)
X-10C	74.7	32.2	-	-	0.5516
X-11C	121.1	32.2	-	-	0.3447
X-12C	32.2	8.5	-	-	0.16
X-13C	8.9	-5.6	-	-	0.24
X-14C	-5.6	-16.1	-	-	0.28
X-15C	-16.1	-30.6	-	-	0.2
X-17C	-	-146.7	-	42.78	-
TV-514	-146.7	-154.4	42.78	-	-
JT CHAUDE	-116	-125	38.09	-	-
JT FROIDE	-150.6	-154.4	28.96	-	-

Tableau III.2 : Paramètres de marche introduit au simulateur.

III.4.1. Validation de la simulation :

Paramètres	Cas design	Cas simulation	Erreur (X _D -X _S)/X _D
Température du GNL sortie du X16C (°C)	-149	-149.3	0.2 %
Puissance du compresseur MCR I (kw)	22170	22801	2.84 %
Puissance du compresseur MCR II (kw)	24869	22742.6	8.55 %
Température d'aspiration du compresseur MCR I (°C)	-35	-35.61	1.74 %

Tableau III.3: Tableau comparative de la simulation cas design avec cas réel.

Nous constatons que les erreurs obtenues ne dépassent pas les 10%, ce qui nous conforte sur la validité de notre représentation du procédé.

III.4.2. Analyse des résultats :

Nous allons voir dans cette partie :

L'effet de la variation de la composition du MCR sur les paramètres suivants :

- ❖ La température du GNL à la sortie de l'échangeur principal X-16C.
- ❖ La puissance consommée par les compresseurs MCRI et MCR II.
- ❖ La température du MCR sortie calandre de l'échangeur principal X16C (T° d'aspiration du compresseur MCRI).
- ❖ Le coefficient de performance de la boucle MCR(COP).

Pour cela nous avons pris des compositions réelles pendant 04 jours (**de 02-06-2016 au 05-06-2016**), et étudier pour chaque composition la variation des paramètres sus mentionnés.

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

Composant	MCR (design)	MCR 1 (02 /06/2016)	MCR 2 (03 /06/2016)	MCR 3 (04/06/2016)	MCR 4 (05 /06/2016)
N2	2.7	2.083	2.036	2.192	1.744
C1	40.7	37.462	38.758	39.937	38.552
C2	54.4	59.553	57.763	56.228	51.309
C3	2.2	0.568	1.431	7.583	8.338
I-C4	-	0.022	0.01	0.012	0.005
N-C4	-	0.028	0.002	0.022	0.0033
I-C5	-	0.002	0	0	0

Tableau III.4 : Compositions réelles du MCR, pour chaque cas simulé

III.5. Résultats de la simulation :

Après introduction des compositions du MCR dans le simulateur HYSYS nous avons obtenu les résultats suivants :

III.5.1. Etude de la variation de la température du GNL sortie de l'échangeur principal :

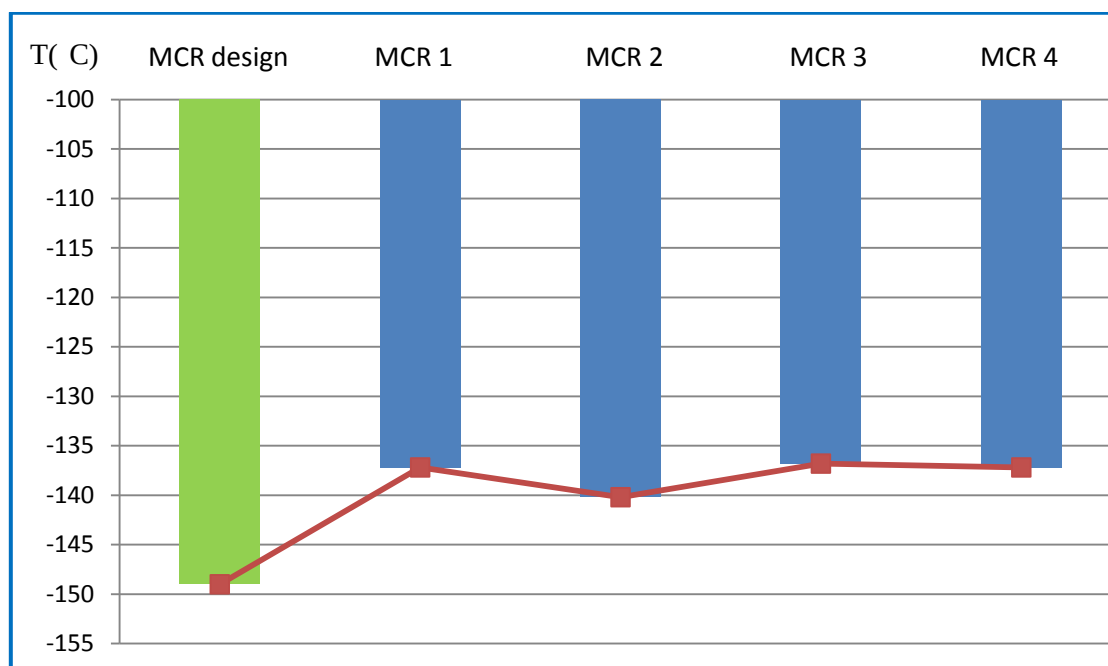


Figure III.3: Variation de la température du GNL sortie de l'échangeur principal X16-C

D'après le graphe on remarque qu'avec les compositions actuelles du MCR ; la température design du GNL sortie échangeur principal X16C n'est pas atteinte, donc pertes en température pouvant atteindre les ($\Delta T=12^{\circ}\text{C}$).

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

III.5.2. Etude de la variation des puissances consommées par les deux compresseurs (MCRI et MCRII) en fonction de la composition MCR :

Les deux graphes suivants représentent la variation de la puissance du compresseur MCRI et MCRII en fonction de la composition MCR.

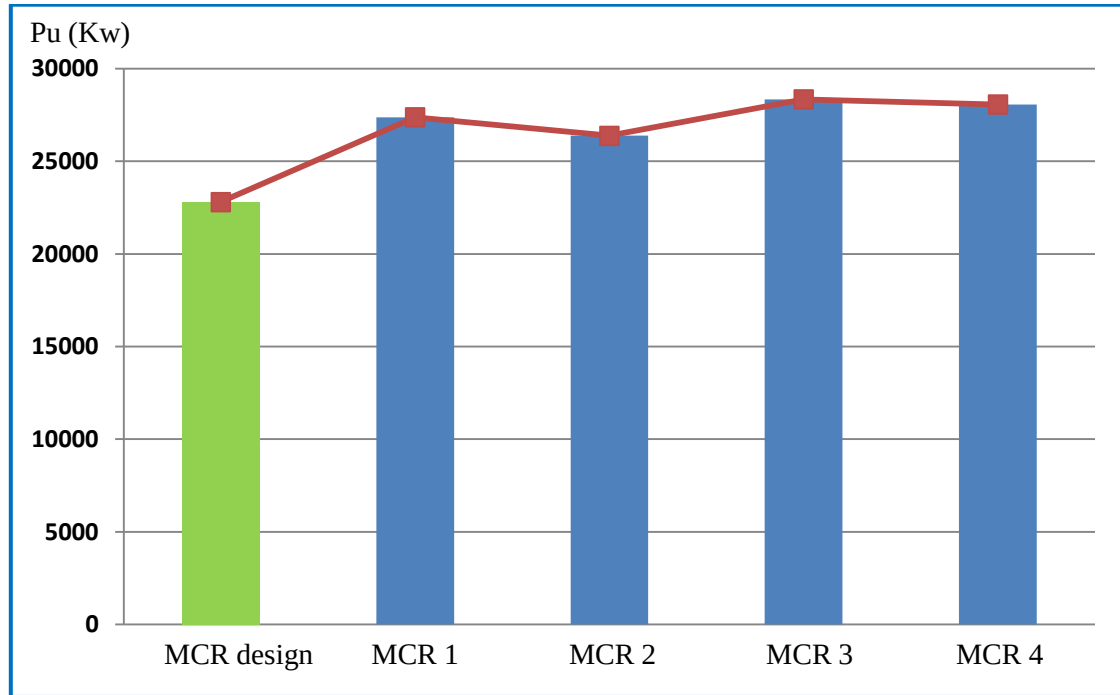


Figure III.4 : Puissance consommée par le compresseur MCRI en fonction de la composition du MCR

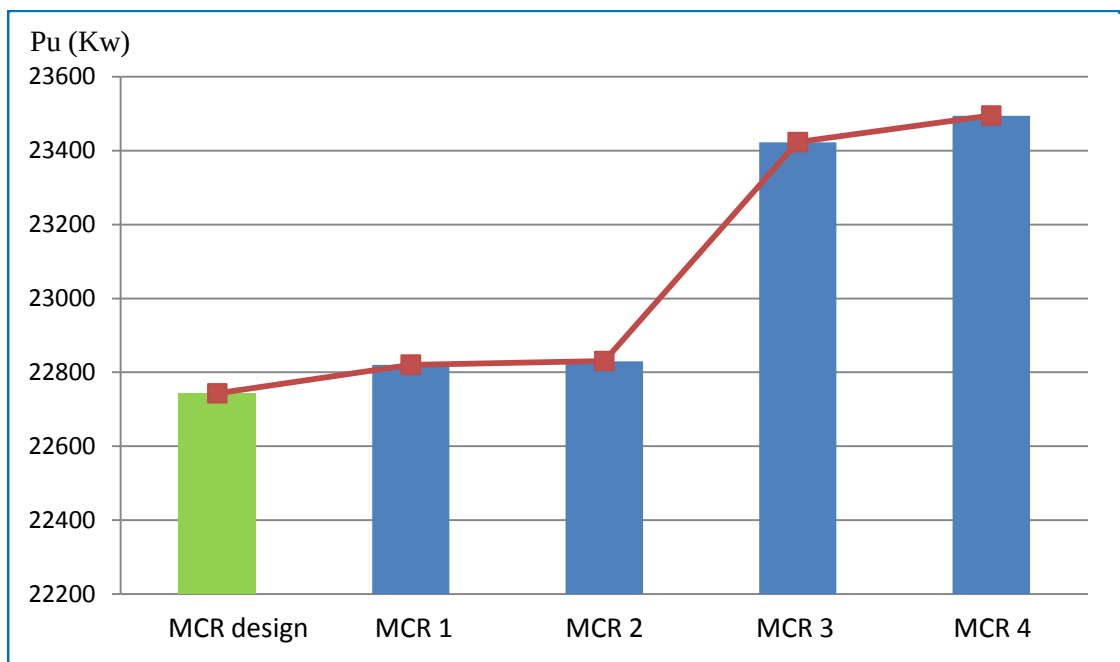


Figure III.5 : Puissance consommée par le compresseur MCRII en fonction de la composition du MCR.

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

❖ Interprétation des résultats :

On remarque que :

- ✓ La puissance cas design est le cas optimal (minimum d'énergie), permettant de produire un maximum de froid (GNL sortie échangeur principale à -148°C).
- ✓ Pour des compositions actuelles du MCR ; la consommation d'énergie pour les deux compresseurs MCRI et MCRII est plus importantes que celle du design ce qui augmente l'autoconsommation de l'unité de liquéfaction.

III.5.3. Etude de la variation de la température du MCR sortie échangeur principal (X16-C) en fonction de la composition du MCR :

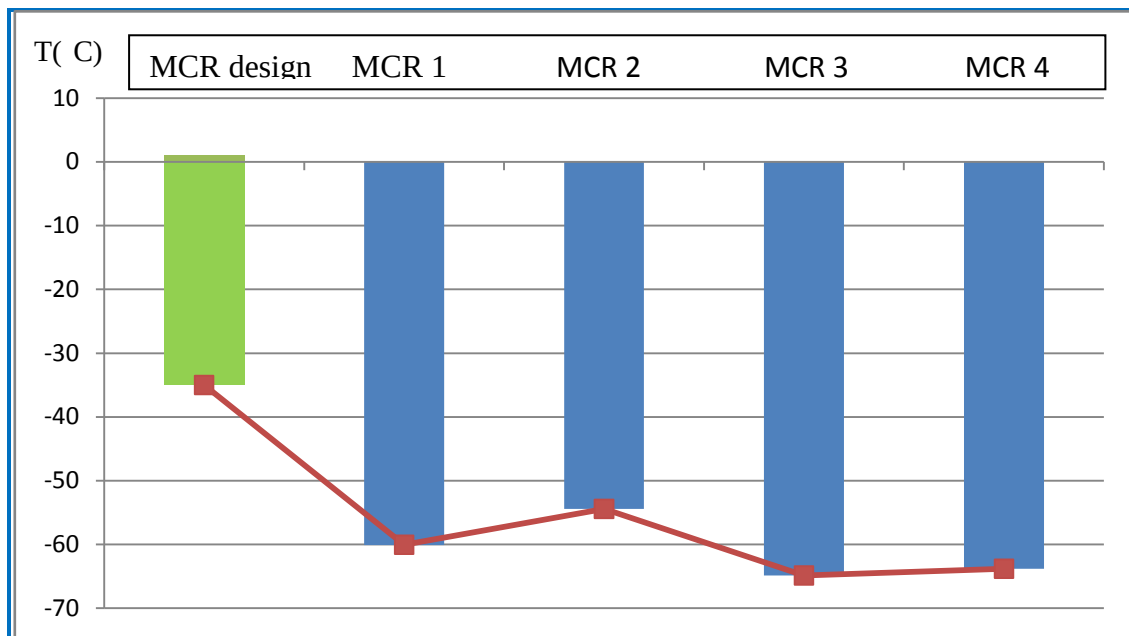


Figure III.6: Variation de la température du MCR sortie X16-C en fonction de la composition du MCR

❖ Interprétation des résultats

D'après le graphe nous remarquons que la température du MCR sortie de l'échangeur principale X16-C vers le premier ballon d'aspiration X06-F est plus basse que la température du design (-35°C) ; elle peut atteindre les -65°C ; pouvant provoquer un déclenchement du compresseur MCRI ; pour palier à cela les opérateurs ouvrent le recyclage.

III.5.4. Etude de la variation du COP en fonction de la composition du MCR :

COP : coefficient de performance

Ce coefficient représente le rapport de la quantité d'énergie reçue par le GNL et le travail fournie aux compresseurs.

$$COP = \frac{Q_{recu \text{ par GNL}}}{W_{fournie}} = \frac{H_E - H_S}{W_{MCR I} + W_{MCR II}}$$

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

H_E : L'enthalpie du gaz d'entrée à l'échangeur principal.

H_S : L'enthalpie du gaz de sortie de l'échangeur principal.

$W_{MCR I}$: Le travail consommé par le compresseur 1^{er} étage.

$W_{MCR II}$: Le travail consommé par le compresseur 2^{ème} étage.

MCR	Q (kJ/h) = $H_E - H_S$	W_T (kw)	COP
MCR design	101490739.84	45544.22	0.6190
MCR 1	93439045.13	50163.87	0.5174
MCR 2	95454194.1	49211.57	0.5388
MCR 3	93184418.68	51765.72	0.5000
MCR 4	93439763.83	51565.74	0.5033

Tableau III.5 : Tableau récapitulative des résultats

Le graphe suivant représente la variation du COP en fonction de la composition du MCR.

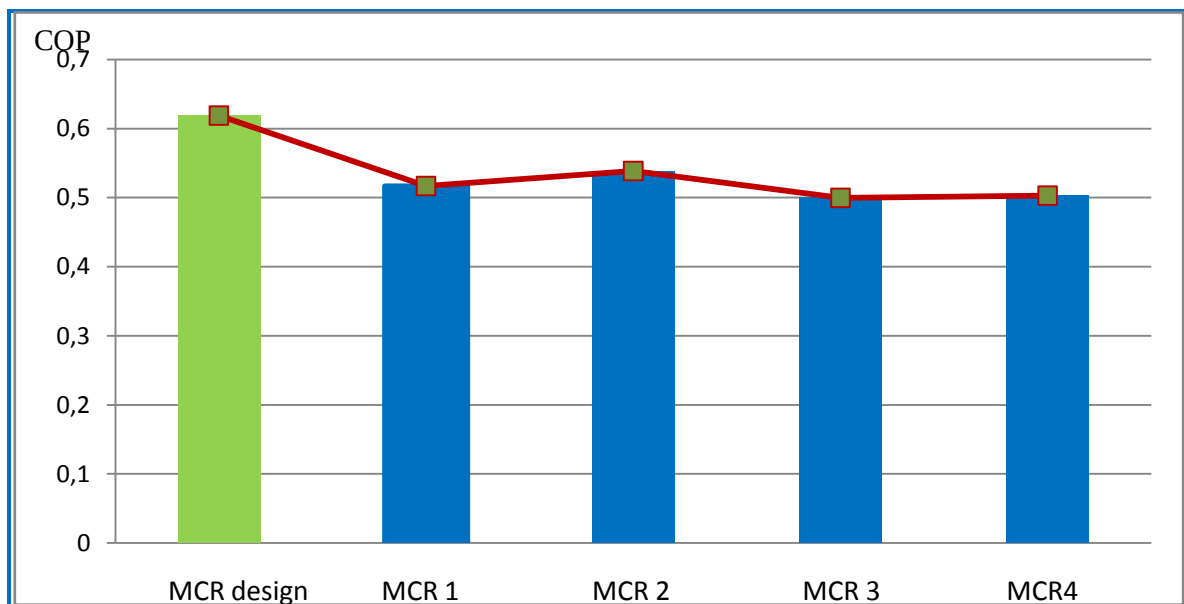


Figure III.7 : Variation du COP en fonction de la composition du MCR.

❖ Interprétation des résultats :

On remarque une diminution du coefficient de performance COP des cas actuels par rapport à celui du design à cause de la perturbation de la composition MCR. Donc on dépense plus de travail pour avoir un moins de production (de liquéfaction).

III.6. Impact de la variation de la composition MCR sur le cycle :

Vu les constatations, concernant la contamination du MCR causée principalement par l'augmentation du pourcentage du propane (C_3) et la présence de traces du C_4 et C_5 , de

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

l'appoint provenant de la colonne du DC₂ (dé-éthaniseur), nous proposons en ce qui suit, l'étude de l'influence de cette contamination.

Pour ce faire plusieurs cas ont été simulés ; le tableau suivant représente la composition MCR étudié.

Composition du MCR	MCR I (%)	MCR II (%)	MCR III (%)	MCR IV (%)
N2 (Azote)	2.7	2.7	2.7	2.7
C1 (Méthane)	40.7	40.7	40.7	40.7
C2 (Ethane)	51.6	48.6	45.6	42.6
C3 (Propane)	5	8	11	14

Tableau III.6: Composition du MCR étudié

Nous avons obtenu les résultats suivants :

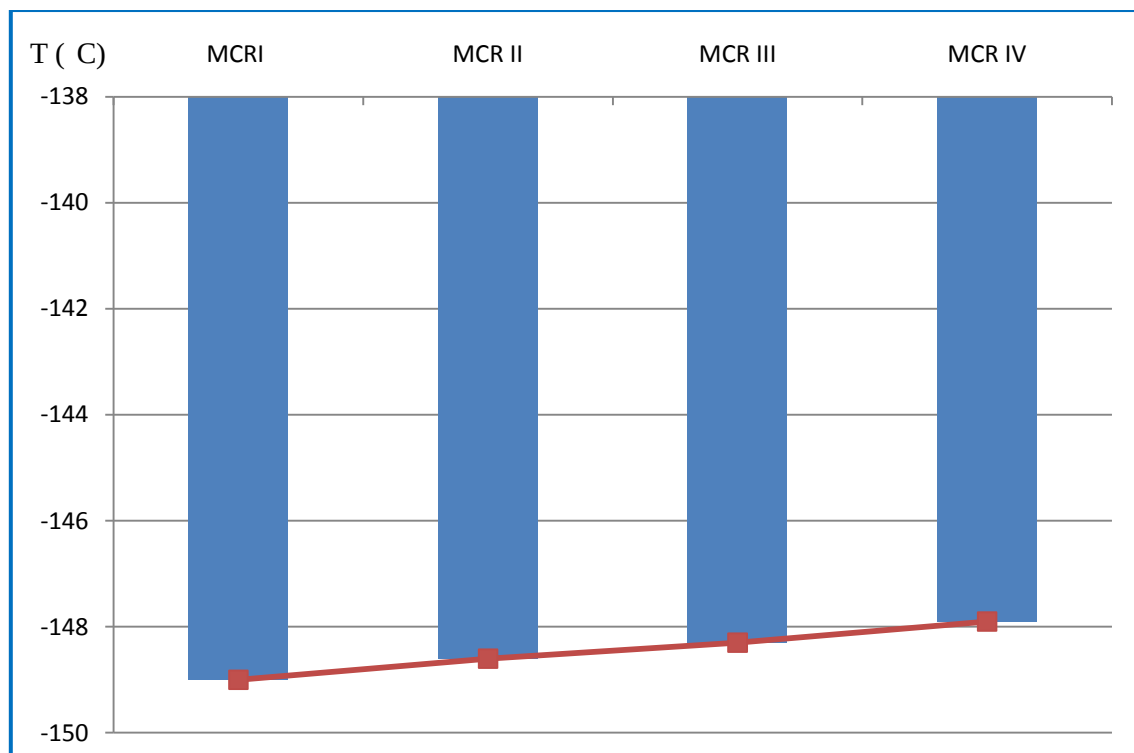


Figure III.8 : Variation de la température de sortie du GNL de l'échangeur principal.

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

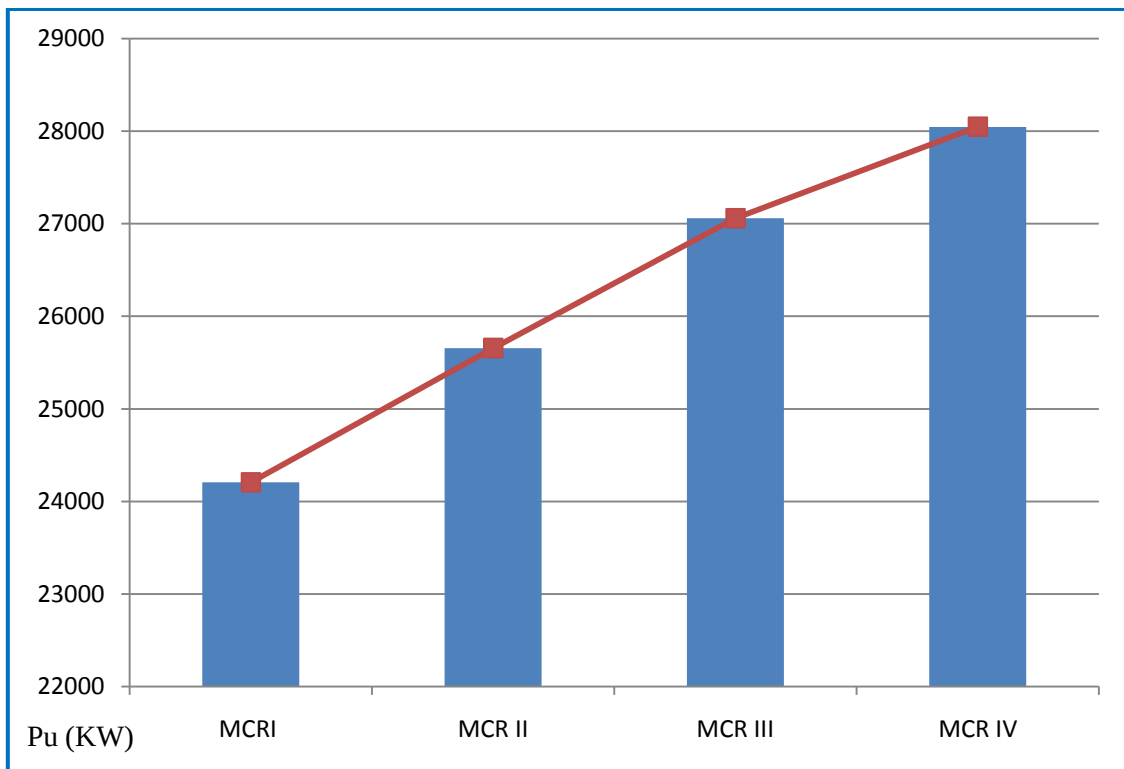


Figure III.9 : Variation de la puissance de compression MCR I (en KW).

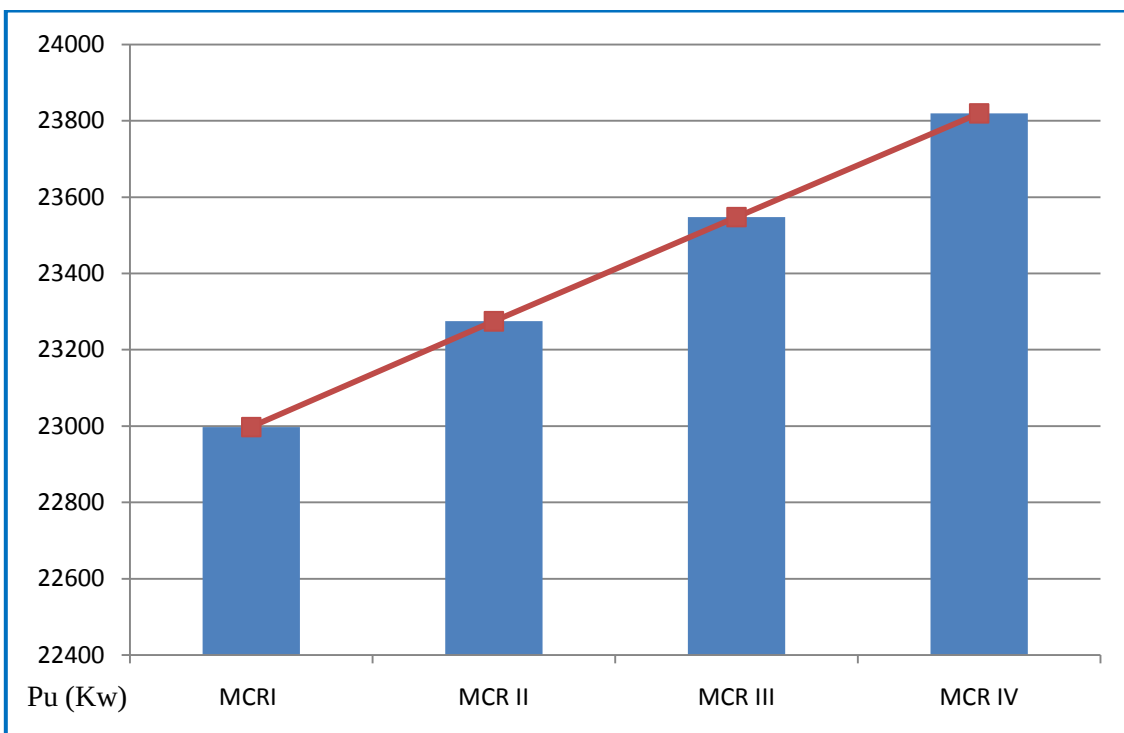


Figure III.10 : Variation de la puissance de compression MCR II (en KW).

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

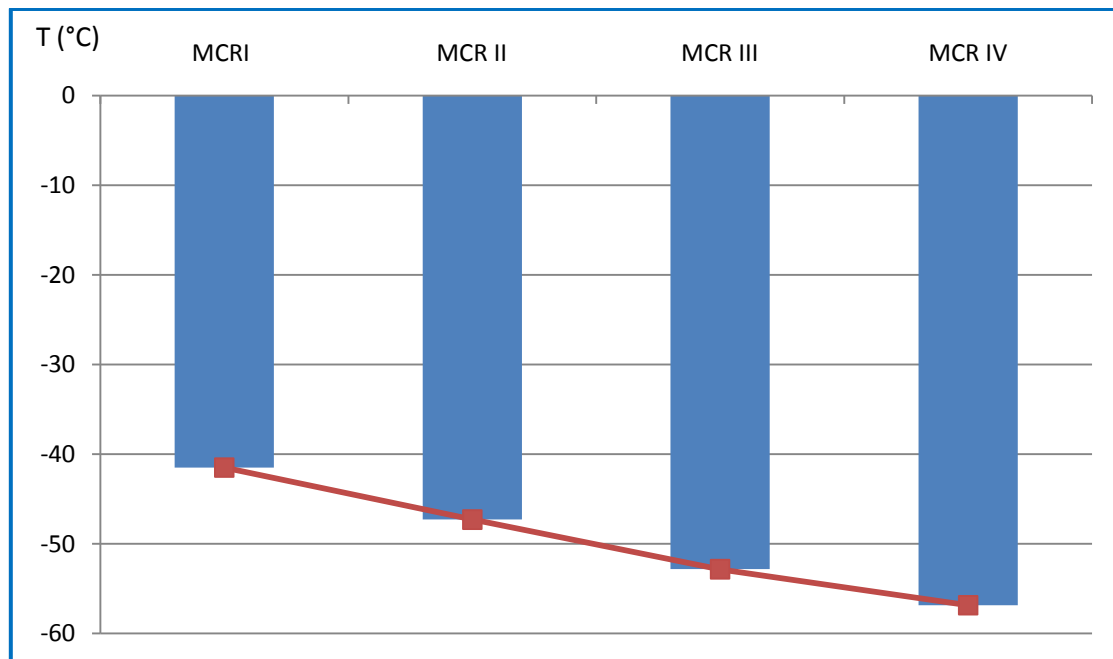


Figure III.11 : Variation de la température d'aspiration du compresseur MCR I.

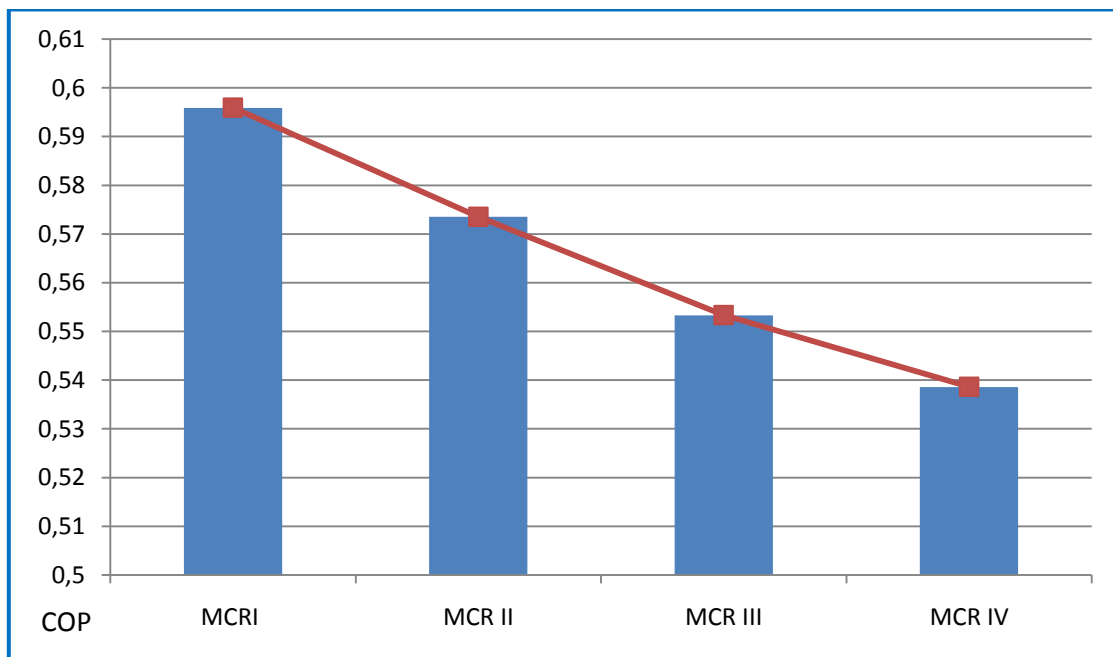


Figure III.12 : Variation du COP en fonction de la composition du MCR.

Interprétation des résultats :

Lorsqu'on a augmenté le pourcentage des lourds (C_3) dans la composition du MCR et d'après les graphes que nous avons obtenu la température de sortie du GNL reste presque la même, l'influence est donc sur les puissances des deux compresseurs MCR (une surconsommation) ainsi sur la température d'aspiration de compresseur MCR I qui devient plus basse et le COP qui a diminué.

Chapitre III : Simulation des performances énergétiques de la boucle MCR sous HYSYS

III.7. Conclusion :

D'après cette simulation nous avons pu prouver que cette perturbation de la composition du MCR a des mauvais effets sur le rendement de la boucle et la capacité de refroidissement.

Durant notre période de stage pratique au sein du complexe GL2/Z d'Arzew on a proposé deux solutions pour cette perturbation du MCR qui sont :

- 1- Intégrer un réservoir après l'échangeur principal X16 C pour stocker le MCR perturbé à la sortie de cet échangeur et le traiter, afin de remettre sa composition convenable à celle du cas design.
- 2- Placer des appareils automatiques pour les appoints du MCR. Dès que ce dernier est perturbé, ses appareils injectent automatiquement la quantité nécessaire afin de stabiliser la composition du MCR, non plus avec une injection manuelle comme le cas actuel du complexe.

CHAPITRE IV

**Les différents risques liés aux gaz
naturel liquéfié**

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

IV.1. Introduction :

L'étude détaillée des risques consiste en un examen approfondi des accidents majeurs potentiels identifiés lors de l'APR et le retour d'expérience permet de tirer quelques traits essentiels conduisant à des accidents majeurs.

Du fait du caractère très inflammable du GNL, les phénomènes accidentels les plus probables sont des explosions et/ou des incendies. Ces accidents ont tous une cinétique rapide, c'est-à-dire qu'ils surviennent et se développent instantanément.

Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE qui est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion comme c'est le cas des explosions de nuages de gaz.

De façon générale, pour étudier le phénomène d'explosion de type BLEVE et UVCE, nous avons modélisés les résultats d'une fuite ou déversement de GNL et la succession d'événements après la fuite qui peuvent conduire à l'apparition d'un UVCE et BLEVE.

L'inflammation de la fuite auprès d'une source d'ignition, peut se produire:

- **Soit immédiatement:** il y a alors création d'un jet enflammé qui peut chauffer la paroi de la sphère de stockage, en fonction de la longueur de la flamme, de sa direction et de sa position par rapport à la sphère.
- **Soit de manière retardée:** dans ce cas, la fuite peut conduire à la formation d'un nuage susceptible d'exploser VCE (Vapor Cloud Explosion), puis à la création d'un jet enflammé à l'endroit de la fuite initiale.

L'analyse des impacts doit démarrer dans un premier temps par la détermination d'un scénario d'accident majeur à modéliser et l'importance de ses effets.

Une fois que l'on arrive à déterminer ces derniers, on dresse une évaluation des impacts d'un tel accident majeur sur l'environnement. [10].

IV.2. Notion de risque et danger :

IV.2.1. Définition du danger :

Le danger est une situation qui a, en elle, un certain potentiel à causer des dommages aux personnes et aux biens. Un danger est défini comme étant un produit chimique ou un état physique qui a le potentiel de nuire aux personnes, aux installations ou à l'environnement.

IV.2.2. Définition du risque :

Le risque est un événement tel qu'une émission, un incendie ou une explosion, de caractère majeur, en relation avec un développement incontrôlé d'une activité industrielle, entraînant un danger grave, immédiat ou différé pour l'homme, à l'intérieur ou à l'extérieur de l'établissement, et/ou pour l'environnement, et mettant en jeu une ou plusieurs substances dangereuses.

Cette définition fait clairement la distinction entre le danger et le risque.

Le risque, c'est la manifestation possible du danger, un événement accidentel caractérisé Par :

- La gravité du dommage.
- La probabilité d'occurrence de l'événement.

La mesure de l'effet d'un tel danger est appelée la conséquence tandis que sa fréquence est le nombre de son occurrence par temps d'unité.

Ainsi le risque est la mesure de la fréquence d'un danger et de sa conséquence. Les risques de tous les résultats d'incident/accidents sont individuellement estimés en utilisant la formule ci-dessous.

Risque = Probabilité x Conséquence (gravité)

C'est donc la probabilité de l'existence d'une situation dangereuse, par exemple un accident ou une maladie. Dans le mot risque, il y a toujours la notion de probabilité ; plus celle-ci est grande, plus le risque est important et plus l'événement dangereux pourrait être imminent et grave.

C'est un produit ou un phénomène susceptible d'agresser l'homme et la nature en général. Bien que le terme nuisance soit surtout utilisé pour les produits chimiques et certains phénomènes physiques, il est possible d'affirmer qu'une nuisance engendre un risque. Ainsi, le bruit est une nuisance sonore et engendre le risque de surdité ; l'homme exposé à des niveaux sonores élevés peut devenir sourd, d'ailleurs la surdité est l'une des maladies professionnelles les plus fréquentes. Suivant l'origine et les caractéristiques des nuisances, il y a lieu de distinguer:

➤ **les risques industriels** : notamment ceux qui sont à l'origine d'accidents majeurs, autrement dit ceux qui existent dans les entreprises classées Seveso. Ces risques peuvent se traduire par des accidents graves susceptibles de faire beaucoup de victimes, des dégâts matériels considérables et une importante pollution de l'environnement.

➤ **les risques professionnels** : qui donnent naissance à des accidents du travail et aux maladies professionnelles. Il s'agit de risques de faible importance et les conséquences sont limitées aux locaux de travail, ateliers, laboratoires, bureaux ainsi qu'aux salariés et travailleurs exposés, exemple (figure IV.1).



Figure IV.1 : Exemple de risque professionnel à droite et quotidien à gauche

IV.3. Les phénomènes dangereux associés aux GNL :

IV.3.1. Les UVCE :

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre. Un UVCE comprend généralement les étapes suivantes :

- rejet dans l'atmosphère d'un GNL, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide.
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable.

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

- de manière concomitante, dilution et transport du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable.
- inflammation de ce nuage.
- propagation d'un front de flamme des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit à la manière d'un piston sur les gaz frais environnants et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne, appelée déflagration, si sa vitesse de propagation est suffisante.
- enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

Le vocabulaire distingue, selon les effets produits, l'UVCE du Flash fire, ou Feu de nuage. De manière générale, le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés, alors que le terme Flash fire est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression. [11]

▪ Effets thermiques :

L'expérience montre qu'en pratique, les effets thermiques de l'UVCE ne sont pas dus au rayonnement thermique (très court) du nuage enflammé, mais uniquement au passage du front de flamme. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours de la flamme est susceptible de subir l'effet léthal, mais celui-ci n'excède pas la limite extrême atteinte par le front de flamme. Ainsi, l'effet thermique de l'UVCE ou du Flash Fire (rappelons qu'il s'agit du même phénomène physique sur l'homme est dimensionné par la distance à la LII).

▪ Effets de surpression :

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde de choc dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacle, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacle.

- Les causes d'un UVCE :

Pour obtenir un UVCE il faut deux conditions réalisées simultanément :

- un nuage de gaz inflammable, dont la concentration en combustible se situe entre la LII et la LSI ;
- une source d'inflammation.

Tous les phénomènes de rupture de canalisation ou de fuite d'un GPL ou GNL peuvent engendrer un UVCE.

IV.3.2. Les BLEVE :

• Rappel préliminaire :

L'occurrence d'un BLEVE est liée à la rupture brutale d'un réservoir de gaz liquéfié, survenant lorsque le réservoir est soumis à une agression thermique ou mécanique. Le phénomène de BLEVE est donc l'effet domino d'un événement précurseur tel que l'impact d'un projectile, l'échauffement par un feu de torche impactant, un sur remplissage. [11]

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

- **Définition :**

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, ou vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition.

Le BLEVE peut être défini comme la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique. Tous les stockages de gaz liquéfiés sous pression sont susceptibles d'être le siège d'un BLEVE.

En effet, le BLEVE est associé avant tout à un changement d'état à caractère explosif, et non à une réaction de combustion. Aussi, il n'est pas nécessaire que le produit concerné soit inflammable pour parler de BLEVE. Les effets d'un BLEVE sont :

- effets de pression : propagation d'une onde de surpression,
- effets missiles : projection de fragments à des distances parfois très importantes.
- effets thermiques : dans le cas d'un BLEVE de gaz liquéfié inflammable, rayonnement de la boule de feu.

Il y a quatre effets de propagation d'une onde de surpression sur l'homme :

- le blast : c'est un barotraumatisme, c'est-à-dire un traumatisme créé par la surpression de l'air ; il comprend notamment :
 - le blast des tympans, pouvant aller jusqu'à la déchirure des tympans : surdité passagère ou définitive, acouphènes .
- le blast pulmonaire : l'onde de choc frappe la poitrine et provoque des dégâts à l'intérieur.
 - la chute consécutive à la différence de pression entre le devant (partie face à l'explosion) et l'arrière de la surpression.

IV.3.3. Le Roll-Over :

La stratification est un phénomène qui se produit après un repos prolongé du GNL dans le bac de stockage « lors d'un arrêt général ou d'une panne de longue durée », où le GNL forme des couches à différentes densité « formation des phases ». Ce phénomène provoque un autre phénomène appelé le roll-over qui est un retournement rapide de ces deux strates entraînant l'augmentation brutale du débit d'évaporation.

-Effets cryogéniques :

- Le déversement du GNL peut causer la fragilisation des équipements (pompes, moteurs électriques, conduites ...) non cryogéniques et la rupture sous l'action des contraintes qui résultent des basses températures.
- Le GNL peut aussi provoquer des brûlures à froid sur la peau en contact.

IV.3.4. Fuite de GNL dans l'eau : effet de TRP :

Le GNL à -160°C a la particularité de « bouillir » lorsqu'il entre en contact, en cas de fuite, avec un environnement plus chaud. Sur l'eau, ce processus est accéléré. La grande quantité d'eau agit comme une source de chaleur pour le GNL déversé : il se réchauffe instantanément, augmentant ainsi de volume. Ce phénomène est une explosion sans source d'ignition (génération subite de surpression mais sans phénomène de combustion), connue sous le nom d'explosion par Transition Rapide de Phase (TRP). Elle est bruyante et peut causer des dommages aux infrastructures avoisinantes.

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

En cas de fuite, la surface plane de l'eau fait que le GNL forme une nappe ressemblant à un nuage de vapeur qui s'étend rapidement. La vapeur se mélange à l'air pour atteindre transitoirement une concentration comprise entre 5 et 15% (à cette concentration le nuage est inflammable) puis continue à se diluer (devenant non inflammable).

IV.4. Autre dangers associés au GNL :

IV.4.1. Stockages GNL :

Le GNL provenant d'un même terminal exportateur a des caractéristiques qui varient un peu. La teneur en azote a de l'importance car une faible quantité d'azote en dissolution dans le GNL peut occasionner des pressions de ciel gazeux excessives et amener des rejets à l'atmosphère. Pour des GNL importés dans le cadre de marchés « spots » pouvant provenir de pays producteurs différents, la gestion de ces stocks risque d'être moins simple: compositions du GNL, densités différentes, risques de « Roll over ».

Un terminal méthanier à plusieurs réservoirs offre plus de facilités pour stocker des produits de densités différentes. Le GNL étant un mélange de méthane et d'autres gaz en faibles quantités (éthane, propane, ...) et autres hydrocarbures lourds, il est à considérer que ces produits indésirables vont se retrouver à la longue présents dans les bacs de stockage et s'y accumuler peu à peu.

IV.4.2. Transport :

Le gaz naturel est liquide à -160 °C et 1 litre de GNL donne 600 litres de gaz à la pression atmosphérique, à t° ambiante. Alors La température très basse du liquide le rend dangereux au point que beaucoup parmi les premiers méthaniers ont eu des cassures de pont, de dôme cuve, de bordé à la suite de déversement (quelques litres suffisent) de liquide.

IV.5. Historique sur les accidents industriels :

Année	Lieux	Cause de la panne	Produit	Détails
1972	France	Procédure	pétrole	Dans une raffinerie de pétrole, des difficultés surviennent dans une centrale vapeur lors du démarrage d'une chaudière. L'opérateur reprend la séquence de mise en marche, mais ne pré-ventile pas suffisamment. Le mélange air-gaz explose lors de la tentative de ré-allumage, détruisant ainsi la chaudière et causant la mort de l'opérateur.
1987	Etats-Unis	Foudre	GN	Dans une chaufferie urbaine la foudre frappe une chaudière alimentée au gaz naturel et perce une vanne au niveau de l'entrée du gaz aux brûleurs.
1980	Etats-Unis	Procédure		Dans une chaufferie, une chaudière est arrêtée en urgence à la suite d'une panne d'instrumentation puis explose au redémarrage en raison vraisemblablement d'une purge et d'un pré-balayage insuffisants.
1994	Allemagne	Rupture d'une conduite de vapeur		La rupture d'une conduite de vapeur surchauffée à 550°C, lors d'opérations de réglages, fait 6 morts et un blessé parmi les employés de la chaufferie urbaine. Neuf jours avant l'accident, un organisme de contrôle aurait effectué une ré-épreuve de la partie de circuit concernée à une pression inférieure à la pression prévue et l'attestation aurait été falsifiée (ARIA 5954).

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

2000	Etats-Unis	Fuite		Une fuite intervient dans un réservoir de propane dans une usine d'embouteillage de boisson et le nuage explose au contact d'une chaudière conduisant au BLEVE de la capacité.
2000	Zambie	Bouchage d'une conduite		Une conduite bouchée par la rouille est à l'origine d'une accumulation de chaleur dans une partie de la chaudière et d'un grave incendie qui ravage la raffinerie.
2004	Skikda Algérie	Fuite	GNL	Une explosion à l'usine de GNL de Skikda a causée 27 morts et 74 blessés. La cause pourrait être une chaudière défectueuse ou une fuite d'une canalisation d'hydrocarbures.
2006	France		GN	Dans une société de production et distribution de chaleur, une violente déflagration se produit à l'intérieur d'une chaudière au gaz naturel de 12 MWth. Cette chaudière faisait l'objet d'une intervention d'un technicien du constructeur suite à des anomalies de fonctionnement du brûleur. l'explosion survient à l'intérieur de la chaudière côté fumées et entraîne l'arrêt immédiat du générateur par les sécurités gaz. Dans le même temps, le technicien constate par l'œillet arrière une flamme molle et incomplète autour du brûleur. L'hypothèse d'une accumulation de gaz naturel suite à un décrochage de flamme est privilégiée.

Tableau IV-1 : Quelques accidents causés par fuites sur pipes, en Algérie et dans le monde.

IV.6. Gestion du risque :

La gestion du risque est un processus itératif qui suit les étapes suivantes:

- Identification des sources de danger.
- Evaluation des risques.
- Mettre en place des mesures d'urgence.
- Déterminer si le risque a été réduit.
- Faire une analyse coût-bénéfices.
- Mettre en place les mesures de réduction à un niveau aussi bas que raisonnablement praticable (ALARP ; As Low As Reasonably practicable).

IV.6.1. Le processus de gestion du risque :

La mise en œuvre de la gestion des risques au sein du complexe se déroule selon un processus standard. Il se compose des étapes illustrées ci-dessous :[9]



Figure IV.2 : Processus de gestion de risque

a- Identification des risques :

Elle se déroule du bas vers le haut de la hiérarchie, en d'autres termes, elle retombe aux unités administratives.

L'identification des risques est un processus qui consiste à recueillir de façon systématique de l'information sur le milieu, les aléas et les vulnérabilités afin de déterminer les risques de sinistre auxquels le complexe est exposé. Elle se fait de manière complète. En faisant un inventaire complet et détaillé des risques et en recueillir les renseignements permettant de les caractériser tels que :

- La possibilité de maîtrise ou de contrôle de l'aléa.
- Les possibilités d'occurrence.
- la prévisibilité.
- L'intensité.
- La propagation.
- La durée de l'impact.
- Le moment où le risque est susceptible de survenir.

b- Evaluation du risque :

Les risques sont évalués en fonction de leurs conséquences et de la probabilité de leur occurrence, puis classés par ordre de priorité.

Très souvent, le complexe est exposé à des risques dont il est difficile de déterminer avec l'exactitude souhaitée dont, l'importance des dommages potentiels et la probabilité d'occurrence.

c- Maîtrise des risques :

La maîtrise des risques se fonde sur l'identification et l'évaluation des risques. Elle consiste en la conception et la mise en œuvre de mesures appropriées pour délimiter les risques qui nécessitent une intervention (notamment les risques majeurs). Des plans d'action sont élaborés à cet effet pour les risques individuels ou collectifs. Un plan d'action se compose habituellement des points suivants :

- Caractérisation du risque.
- Cause du risque.

Chapitre IV : Les différents risques liés aux gaz naturel liquéfié

- Evaluation financière du risque.
- Mesures de sécurité et de contrôle existantes.
- Description de l'évolution du risque dans le temps.
- Description des mesures à prendre et des ressources nécessaires.

IV.6.2. Avantages de la gestion du risque : La gestion du risque permet de recenser les risques de façon claire et structurée pour permettre de mieux les gérer et les classer en ordre de priorité et prendre les mesures appropriées pour réduire les pertes. Elle comporte d'autres avantages pour l'organisation, notamment :

- Prévention des accidents (risques majeurs).
- Protéger les personnes contre les blessures.
- Protéger l'environnement.
- Économiser les ressources : le temps, le revenu, les biens et les personnes sont toutes d'importantes ressources que l'on peut économiser en réduisant au minimum les sinistres.
- Améliorer la capacité de l'organisation entreprise/organisme à se préparer à diverses situations. Prévenir ou réduire la responsabilité légale.
- Protéger la réputation et l'image publique de l'organisation.

IV.7. Les méthodes d'analyse de risque :

Différentes techniques pour une identification qualitative et/ou quantitative des dangers et une analyse de risques qualitative sont largement répandues. Il s'agit en fait de choisir la technique ou combinaison de techniques la mieux adaptée pour répondre aux objectifs fixés. Pour la réalisation de cette tâche, il s'agira également de définir le groupe de travail qui participera à la réflexion et, le cas échéant, de fixer des échelles de cotation des risques et une grille de criticité.

Parmi les techniques les plus fréquemment utilisés nous citerons :

- Contrôle de sécurité (Security review).
- Safety auditing.
- L'Analyse Préliminaire des Risques (APR).
- L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC).
- L'Analyse des risques sur schémas type HAZOP ou « What-if ? ».
- L'Analyse par arbre des défaillances.
- L'Analyse par arbre d'évènements.

IV.8. Choix des méthodes d'analyse des risques utilisés dans notre étude:

Dans notre étude, on va utiliser, l'Analyse Préliminaire des risques APR (voir chapitre V) qui consiste à identifier les situations de dangers pouvant conduire à la libération d'une partie des potentiels de dangers susceptibles d'être directement ou par effets dominos à l'origine d'un accident, tout en étant confronté aux données issues du retour d'expérience disponible.

IV.9. Conclusion :

Même si l'état actuel des technologies aide à diminuer le risque de fuite et de déversement de GNL, ce risque ne peut être totalement éliminé. C'est pourquoi les organismes réglementaires en matière d'installation de complexes de liquéfaction de gaz naturel et de terminaux méthaniers recommandent de situer ce genre d'installations loin du trafic maritime, loin des voies publiques, et surtout loin de toute zone habitée et malheureusement ce n'est pas le cas dans la zone industrielle pétrochimique d'ARZEW.

CHAPITRE V

Analyse de risques sous ALOHA

V.1. Introduction :

La modélisation et la simulation des accidents industriels (dispersion atmosphérique, incendies, explosion) concernant des produits inflammables est un outil indispensable pour évaluer leurs impacts (asphyxie, rayonnement thermique, surpression...) sur l'environnement et l'être humain.

Dans ce chapitre on utilisera des logiciels spécialisés pour apprécier l'impact de tels accidents industriels. Le code de calcul ALOHA est parfaitement adapté à notre problème : il prend en compte un large panel de scénario d'accidents, donne des informations concernant la sécurité des individus et permet la visualisation des zones à risque.

V.2. Présentation de logiciel CAMEO-ALOHA :**V.2.1. Définition :**

CAMEO – ALOHA (**A**real **L**ocations **O**f **H**azardous **A**tmosphères) est un logiciel de modélisation qui estime des zones de menace liées aux dégagements chimiques dangereux, y compris des nuages de gaz toxique, des Incendies et des explosions. Une zone de menace est un secteur où un risque (tel que la Toxicité, l'inflammabilité, le rayonnement thermique, ou la surpression préjudiciable) a dépassé un niveau personnalisé par l'utilisateur du souci (LOC). Il a été développé conjointement par les 2 entités américaines suivantes : (EPA) « Environmental Protection Agency's Office of Emergency Prevention, Preparedness and Response » et (NOAA), « National Oceanic and Atmospheric Administration's Office of Response and Restoration. » [7].

Le logiciel est composé de trois modules :

- Module **CAMEO**, qui contient principalement des bases de données chimiques et toxicologiques.
- Module **ALOHA**, qui est un programme informatique permettant d'évaluer, dans des situations d'urgence, la dispersion atmosphérique, des composés rejetés dans des conditions accidentelles. Il prend en compte les propriétés toxicologiques et physiques des polluants, et les caractéristiques du site telles que les conditions atmosphériques et les conditions de rejets. Ce module comprend une bibliothèque de 700 substances chimiques et permet un affichage graphique des résultats.
- Module **MARPLOT**, est un programme de cartographie électronique.

V.2.2. Ce que fait ALOHA :

ALOHA permet la modélisation d'émissions à partir :

- ✓ de flaques en ébullition ou non.
- ✓ de réservoirs sous pression de gaz ou de liquide, de réservoirs liquides non pressurisés, de réservoirs contenant des gaz liquéfiés, de conduite de gaz sous pression.

ALOHA modélise la dispersion atmosphérique de gaz neutre, par un module basé sur l'approche gaussienne, et de gaz plus lourd que l'air au moyen d'un module de gaz dense basé sur le modèle DEGADIS (Spicer, Tom and Jerry Havens, 1989) qui a été simplifié par souci de rapidité de calcul. Il propose à l'utilisateur le choix entre les deux modules, et de définir lui-même le module. Plus précisément les critères du logiciel sont la masse molaire du produit, la taille du rejet et la température du nuage.

Enfin, il faut préciser que les résultats ne seront pas fiables si les vents sont très faibles. Pour palier cette dernière situation, des tirets de chaque côté du panache indiquent la zone où pourra se déplacer le panache de dispersion dans 95 % des cas.

Remarque : Le modèle ne prend pas en compte les incendies, les explosions, les réactions chimiques et les mélange de produits mais il donne des informations pour évaluer le danger d'un incendie ou d'une explosion (avec les températures et concentrations).

ALOHA calcule la décroissance du débit de rejet au cours du temps (quelque soit le type de source : réservoir, longue conduite, flaque), puis moyenne la valeur sur des pas de temps d'une minute. Le logiciel permet la visualisation de la décroissance du débit par pas de temps de moyenne d'une minute.

Le logiciel MARPLOT, compris dans le logiciel CAMEO-ALOHA, permet la superposition des traces au sol sur des plans ou photos aériennes de la zone industriel d'Arzew.

V.2.3. Principales limitations d'ALOHA :

Toutefois ces principales limitations restent :

- La topographie et la présence d'obstacles ne sont pas prises en compte.
- L'élévation des gaz chaud ou légers n'est pas prise en compte.
- Certains phénomènes qui se situent au niveau du point de rejet, ou dans le champ proche, ne sont pas pris en compte, tel que les phénomènes de jets, par conséquent ALOHA n'affiche pas de résultats à des distances inférieures à 100m.
- Les rejets à partir de conduite liquide ne sont pas modélisés.
- ALOHA ne calcule pas la réactivité chimique, il avertit cependant l'utilisateur et décrit le type de réactions et les produits attendus.
- ALOHA ne modélise pas les mélanges gazeux.
- La réactivité chimique au sein d'un panache de fumées n'est pas modélisée.

Méthodologie de simulation avec ALOHA :

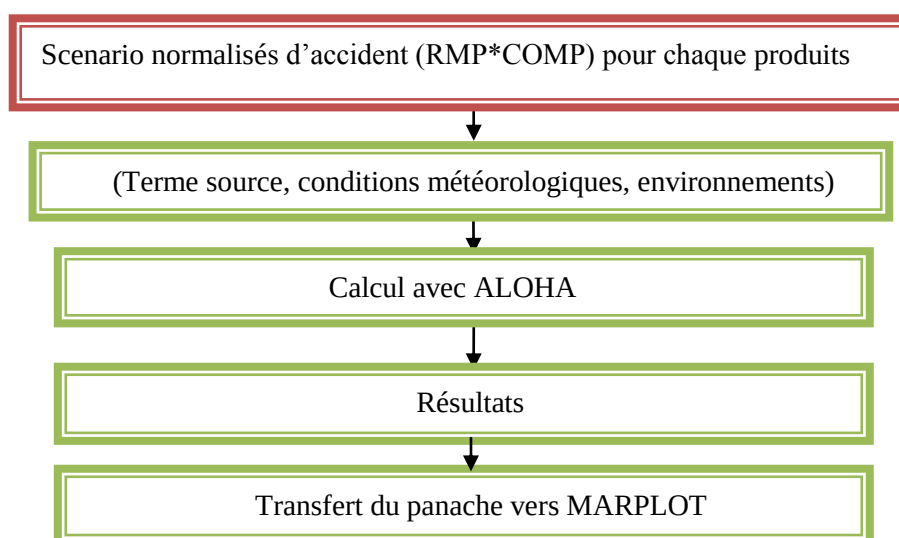


Figure V.1 : Processus de simulation des déversements et dispersion.

V.3. Conditions météorologiques et environnement :

Les paramètres présentés ci-dessous ont été mesurés par la station météorologique d'Arzew (Office National de la Météorologie), sur une période s'étalant de l'ouverture de la station en 1985 jusqu'en 2006 (soit sur 21 ans).

The figure shows two screenshots of the ALOHA software interface. The left window, titled 'Atmospheric Options', contains the following settings: Wind Speed is 4 (meters/sec), Wind is from NW, Measurement Height above ground is 12.5 (meters), Ground Roughness is 0.1 (cm), and Cloud Cover is partly cloudy. The right window, titled 'Atmospheric Options 2', contains the following settings: Air Temperature is 28.5 (Degrees C), Stability Class is E, Inversion Height Options are No Inversion, and Humidity is 75%.

Figure V.2 : Conditions météorologique sur ALOHA.

V.3.1. Températures :

La moyenne de température annuelle entre 1985 et 2006 est de 19,0°C. Le graphe de la figure 4.4 représente la variation interannuelle de la température moyenne

Les températures moyennes mensuelles peuvent osciller entre 18°C en Janvier et 37°C en Août.

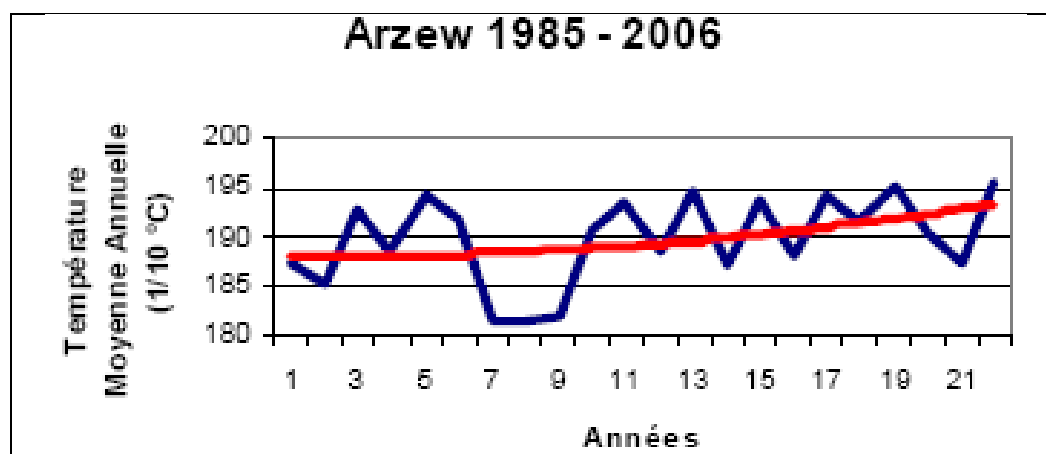


Figure V.3 : Variation interannuelle de températures sur Arzew.

V.3.2. Vents :

À Arzew, les vents de directions Nord, Ouest et Sud Ouest sont prédominants. Leur vitesse moyenne (moyenne arithmétique) est de 4,5 m/s. Cette vitesse atteint son maximum à 15 heures.

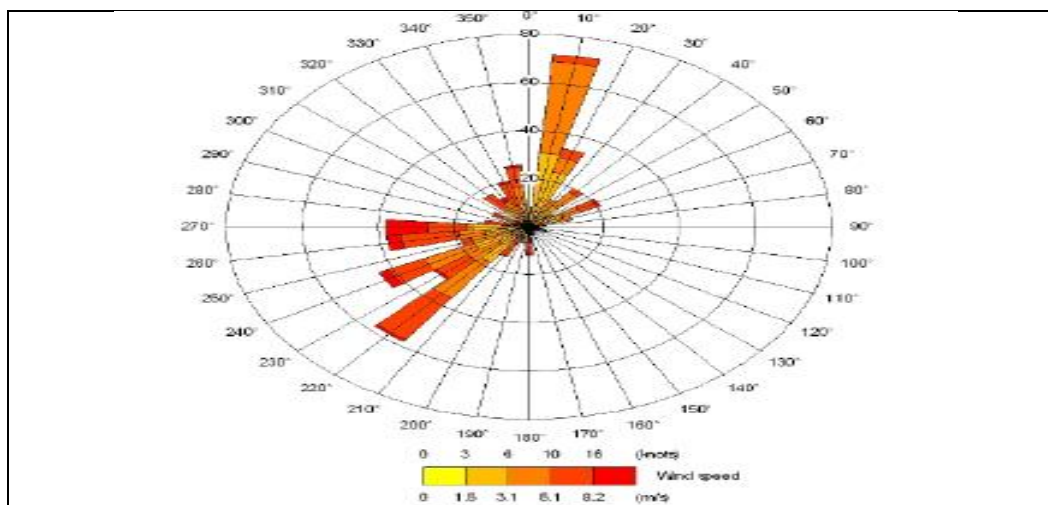


Figure V.4 : Rose des vents sur Arzew.

En hiver et au printemps, certains vents d'Ouest dépassent parfois des vitesses de 16 m/s (soit 60 km/h). Notons que le sirocco souffle de 5 à 6 jours par an.

V.3.3. Ensoleillement :

Les heures d'ensoleillement sont maximales au mois d'Août avec un taux moyen de 67 %, et minimales au mois de décembre avec un taux moyen de 54 %.

V.3.4. Humidité :

L'humidité relative moyenne de l'air est 84 % à 06 h00 et 61 % à 12 h00.

Le calcul est fait en tenant compte des conditions météorologiques les plus pénalisantes pour la région. Les produits chimiques prenant plus d'expansion et réagissant davantage lorsque la température est élevée, donc on a pris les conditions estivales de température qui ont été utilisées afin d'obtenir les plus grandes zones d'évacuation possible.

V.3.5. Situation géographique du site :

- Latitude : 35°49'N ;
- Longitude : 00°16'W ;
- Altitude : 12 mètres ;



Figure V.5 : Emplacement du complexe dans le site industriel d'Arzew.

Conditions atmosphériques					
Température	Humidité relative	Classe de stabilité	Ensoleillement (%)	Vitesse du vent à 12.5 m de hauteur	Direction du vent à 12.5 m de hauteur
28.5°C	75 %	E	67%	4 m/s	Nord Ouest

Tableau V.1 : Conditions atmosphériques du site d'Arzew

V.4. Etude de cas :

Fuite de propane au niveau de la bride de la ligne à l'entrée du ballon 153 F. pour étudier ce cas on utilise la méthode d'APR ci-dessous. [6]

V.4.1. l'Analyse préliminaire des risques (APR) :

L'objectif de l'analyse préliminaire des risques (APR) est d'identifier et d'analyser la probabilité d'occurrence des situations dangereuses à posteriori et des accidents potentiels ainsi que leurs effets et conséquences afin d'évaluer et de recenser tous les risques et de proposer des mesures de prévention cohérentes afin de supprimer ou de minimiser ces risques. Cette méthode nécessite un travail collectif

L'évaluation préliminaire des risques vise à :

- ✓ Identifier les événements redoutés, leurs causes (événements initiateurs) et leurs conséquences (phénomènes dangereux et effets engendrés).
- ✓ Lister les mesures de prévention, de détection et de protection ou limitation prises ou envisagées.

- ✓ Evaluer les classes de probabilité d'occurrence et de gravité, ainsi que la cinétique de chaque phénomène dangereux identifié.
- ✓ Sélectionner les phénomènes dangereux majeurs, c'est-à-dire susceptibles de conduire à des effets en dehors du site, et devant, de ce fait, faire l'objet d'une analyse détaillée des risques.

Ce type d'analyse systématique permet aussi de donner une réponse adaptée aux différents risques identifiés, pour diminuer les risques liés à l'exploitation de l'installation projetée à un niveau acceptable.

Les solutions apportées doivent être conformes à la législation et à la réglementation en vigueur, aux règles internes et aux recommandations professionnelles.

V.4.2. Choix de la matrice de criticité :

Nous avons choisis la matrice EDD (Etude de danger) dans cette étude car elle est la plus utilisée au complexe GL2/Z dans les études de danger concernant les installations de gaz naturel liquéfié.

Echelle	1	2	3	4	5
Qualitative	Arrivé dans un autre site autre que Sonatrach	Arrivé dans un site de Sonatrach	Arrivé dans certains sites de Sonatrach	Arrivé plusieurs fois par an dans site de Sonatrach	Arrivé plusieurs par an dans les mêmes emplacements

Tableau V.2 : Echelle de cotation de la probabilité.

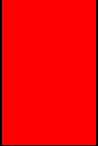
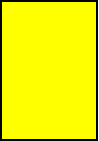
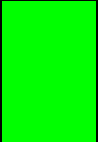
Niveau de gravité	Personne	Actifs	Environnement	Réputation
Catastrophique	Plusieurs mort ou Permanente invalidité totale	Dommmage Vastes	Effet massif	Impact international
Sévère	Simple fatalité ou permanente invalidité totale	Dommmage Majeur	Effet majeur	impact national
Critique	blessure grave ou effets sur la santé	Dommmage Local	Effet local	Impact considérable
Marginale	blessure mineure ou effet sur la santé	Dommmage Mineur	Effet mineur	Impact mineur
Négligeable	Blessé léger ou effets sur la santé	Dommmage Léger	Effet léger	Impact léger

Tableau V.3 : Echelle de cotation de la gravité.

Matrice de criticité :

	Probabilité				
	A	B	C	D	E
Gravité	Arrivé dans un autre site autre que Sonatrach	Arrivé dans un site de Sonatrach	Arrivé dans certains sites de Sonatrach	Arrivé plusieurs fois par an dans site de Sonatrach	Arrivé plusieurs fois par an dans les mêmes emplacements
5 Catastrophique					
4 Sévère					
3 Critique					
2 Marginale					
1 Négligeable					

Tableau V.4 : Matrice de criticité

	Risque élevé inacceptable ↔ Zone de risque élevé susceptibles d'engendrer des dommages sévères.
	Risque moyen acceptable. Les scénarios dans cette zone doivent faire l'objet d'une démarche d'amélioration continue en vue d'atteindre.
	Risque faible acceptable

Chaque couple gravité/fréquence est ensuite projeté dans la matrice de criticité ci-dessus, afin d'estimer son caractère acceptable. Le produit des deux donnera le niveau du risque dont on pourra juger l'acceptabilité ou non.

Trois niveaux de risque sont définis selon la position dans la matrice :

- Risque élevé (zone rouge) : Niveaux de risques inacceptables, les systèmes se situant dans ces niveaux, doivent faire l'objet d'une étude plus approfondie pour identifier les modifications permettant de rendre acceptable le niveau de risque c'est à dire sortir de la zone rouge.
- Risque modéré (zone Jaune) : Niveaux de risques tels que l'aggravation d'un niveau d'un seul des paramètres (Gravité ou Probabilité) pourrait amener à un niveau de risque inacceptable. Les systèmes présentant ce niveau de risque font l'objet d'une revue approfondie des moyens de prévention et de Protection afin de s'assurer qu'ils présentent un niveau de risque acceptable.
- Risque faible (Zone verte) : Niveaux de risque acceptables mais dont l'identification permet de mettre en évidence les moyens à mettre en œuvre pour les maintenir à ce niveau.

Tableau V.5 : L'APR utilisé dans notre étude.

Événement Redouté	Causes	Conséquences	P	G	R	Mesures de préventions	P	G	R
Fuite de gaz	-corrosion de la ligne -choc mécanique -perte de joint -qualité de joint -vieillessement -ouverture de la bride	-formation d'un nuage De gaz -UVCE -dégâts humains Et matériels -dispersion d'un nuage Inflammable -feu	4	5	20	-Installation de plusieurs détecteurs de gaz -installation d'une alarme -inspection de la ligne -respecter la procédure de travail -vérifier et remplacer les joints dégradés -respecter l'isométrie et les spécifications des joints	3	5	15

V.5. Modélisation avec ALOHA :**V.5.1. Description de l'incident :**

Fuite de propane suivie d'une inflammation du nuage gazeux en dispersion dans la zone d'exploitation.

- ❖ Fuite au niveau de la bride de la ligne à l'entrée du ballon X53 F.
- ❖ Formation du nuage de gaz explosif.
- ❖ Dispersion du nuage de gaz.
- ❖ Contact avec une source d'inflammation.
- ❖ Inflammation du nuage (UVCE).



Figure V.6 : Lieu présumé de l'incident.

La quantité totale libérée est de 85.275 kg de C3 pour une brèche de 100 % du diamètre du pipe et une durée de 10 min.

V.5.2. Hypothèses de départ :

➤ **Données Chimiques:**

Nom chimique : PROPANE

Poids moléculaire: 44.10 g/mol

Point d'ébullition à température ambiante : -42.1 °C.

Pression de vapeur à température ambiante supérieure à 1atm.

Ambient Saturation Concentration : 1, 000,000 ppm or 100.0%.

➤ Données atmosphériques :

Vent : 4 mètres/second
Provenance : Nord Ouest à 12.5 mètres du sol
Température de l'air : 28.5° C
Classe de stabilité : E
Longueur de rugosité du sol : 0.1 cm
Pas d'inversion dans l'air ambiant
Humidité Relative : 75%

V.5.3. Source de la fuite:

L'extrémité du pipe est connecté à une source infini (Note: le produit est inflammable)

- Diamètre du pipe : 0.1524 m
- longueur du pipe : 50 m
- Rugosité du pipe : lisse
- Pression dans le pipe : 10 bars
- Température dans le pipe : 46 °C
- Longueur maximale de la flamme : 21 m
- Taux maximal de combustion : 2.57 kg/min
- Quantité Totale brûlée : 85.275 kg.
- Durée de la fuite : limitée à 1 heure par le simulateur.

V.5.4. Résultat et discussion :

Toutes les caractéristiques nécessaires à ALOHA sont alors renseignées.

L'utilisateur peut alors décider d'y appliquer un modèle gaussien, un modèle de gaz lourd ou laisser ALOHA décider. Par la suite, il peut alors demander à ALOHA de tracer les types de menaces : la zone toxique, la zone potentielle d'inflammabilité ou la zone d'explosion, selon les caractéristiques du polluant, et l'on obtient le type de graphique suivant :

V.5.4.1. Modélisations de la concentration des flammes :

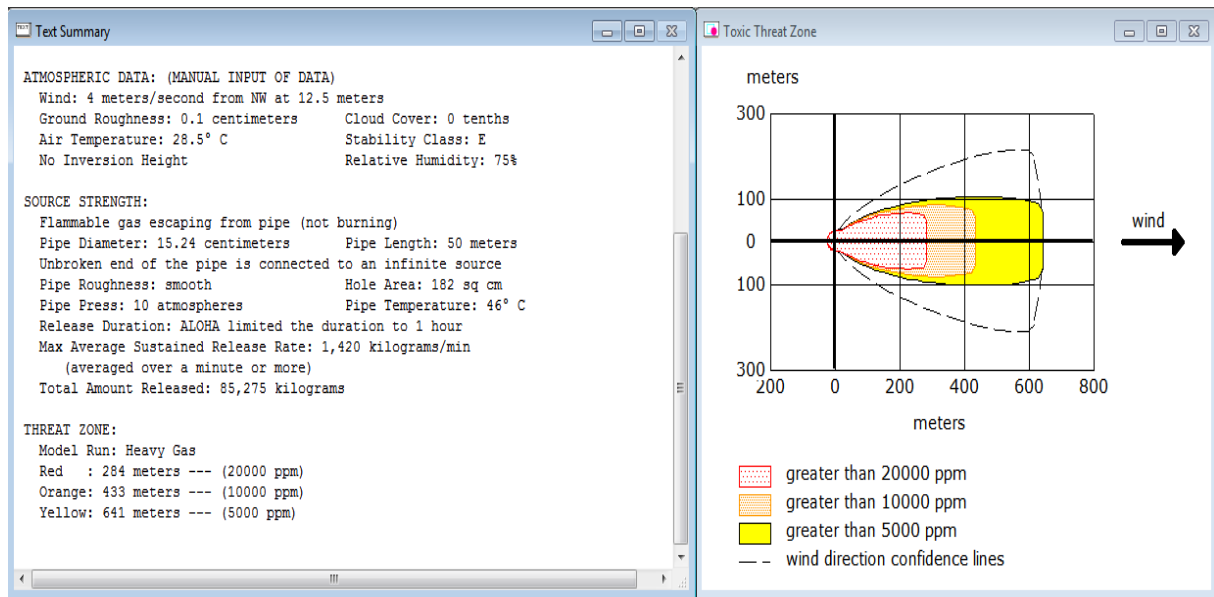


Figure V.7 : Distance de sécurité en termes de présence de gaz LIE

Zones vulnérables.

Scénario modélisé : Zone d'inflammabilité du nuage de gaz

Model exécuté : Gaz lourds

Rouge : 284 mètres --- (20000 ppm) 100 % LIE**Orange : 433 mètres --- (10000 ppm)****Jaune : 641 mètres --- (5000 ppm)**

1- la **distance** modélisée du seuil potentiel d'explosivité **LIE**, elle exprime la dispersion du gaz après évaporation, cette donnée est capitale pour combattre les sources d'inflammation et établir un périmètre de sécurité (interdiction de la circulation).

le rayon de **284 mètres** (voir figure V.7) présente une atmosphère extrêmement inflammable 100 % LIE d'où la nécessité de dresser le premier périmètre de sécurité.

V.5.4.2. Modélisations des radiations thermiques :

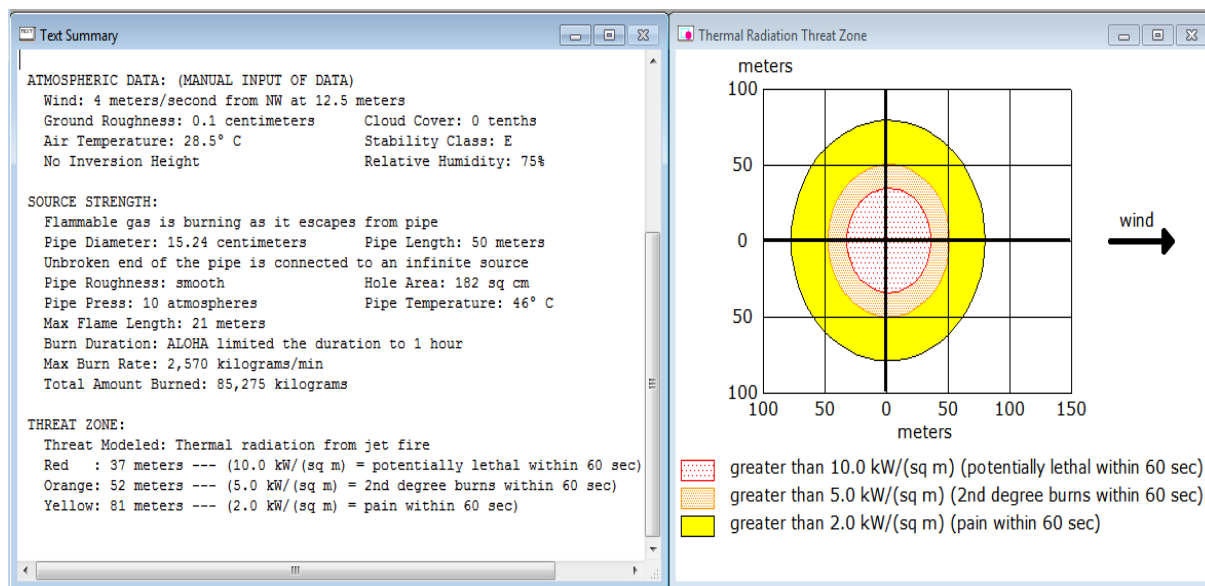


Figure V.8: Distance de sécurité en termes de flux thermique

SOURCE STRENGTH:

Nappe enflammée

- Longueur maximale de la flamme : 21 m
- Taux maximal de combustion : 2.570 kg/min
- Quantité totale brûlée : 85.275 kg (pour une durée de 10 min)
- Durée de la fuite : limitée à 1 heure par le simulateur

ZONE DE DANGER:

Effet modelé: radiation thermique à partir d'un feu de nappe.

- ❖ **Rouge : 38 mètres** --- (10.0 kW/m^2 = potentiellement létal dans 60 sec)
- ❖ **Orange: 54 mètres** --- (5.0 kW/m^2 = Brûlures 2ème degré dans 60 sec)
- ❖ **Jaune: 84 mètres**--- (2.0 kW/m^2 = Douleurs dans 60 sec)

2- La distance modélisée du seuil du flux thermique (voir figure V.8)

Significatif occasionnant des brûlures du 2eme degré et la distance correspondant aux flux occasionnant une létalité.

Il est déduit que la distance préférentielle pour le positionnement des équipes d'intervention sera supérieure ou égale à 38 mètres. L'accès dans cette zone est conditionné par le port obligatoire des tenues d'approches, d'où la nécessité de réduire au maximum l'effectif non concerné dans la zone

V.5.4.3. Modélisations de la surpression :

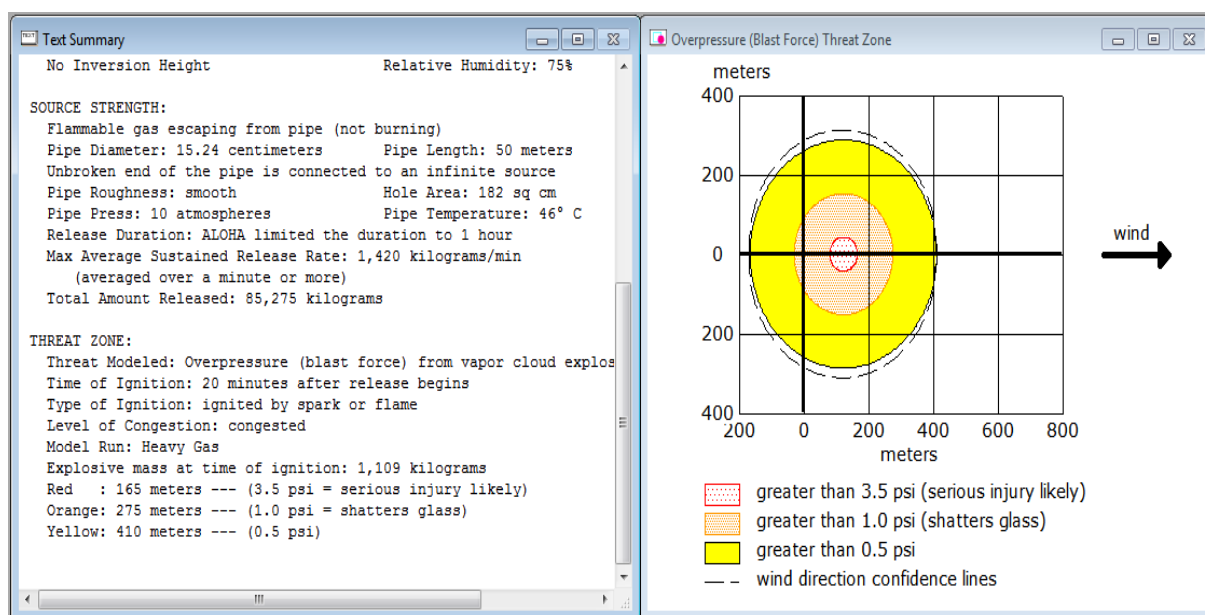


Figure V.9 : Distance de sécurité en termes de Surpression

Suppression :

ZONES Vulnérable:

- Scénario Modélisé : Suppression (onde de choc) à partir d'un VCE (Vapor Cloud Explosion).
- Temps d'inflammation: 20 minutes après début de la fuite.
- Source d'inflammation: enflammée par une étincelle ou flamme.
- Model exécuté : Gaz lourds.
- Masse Explosible lors de l'inflammation: 1109 kg.
- ❖ **Rouge : 165 mètres---** (3.5 psi = blessures graves)
- ❖ **Orange : 275 mètres---** (1.0 psi = Bris de verre)
- ❖ **Jaune : 410 mètres ---** (0.5 psi)

3 Les distances correspondantes à la surpression (voir figure V.9)

(Communément appelé souffle d'explosion), Il s'agira dans ce cas de choisir une démarche liée à l'évacuation, en effet si le chef incendie (I2) juge que l'inflammation du nuage de gaz (VCE) est inévitable, il demandera le lancement de l'opération d'évacuation des équipes d'interventions hors périmètre, et préparation de l'évacuation du point de rassemblement. En impliquant SOTRAZ.

V.6. Conclusion :

Après ces résultats obtenus avec le logiciel ALOHA concernant la simulation d'un incident de fuite de propane au niveau de la ligne du ballon 153F on peut prendre en considération les points suivants :

- ✓ Les effets de radiations thermiques et surpression d'un incident majeur au niveau de cette ligne peuvent atteindre respectivement les distances de 84 m, 300 m du centre de l'incident, c.-à-d pour assurer la sécurité total des operateurs et des équipements on doit respecter ces limites.
- ✓ La protection des operateurs et des équipements contre ce genre de dégât passe par :
 - Installation de plusieurs détecteurs de gaz.
 - installation d'une alarme.
 - inspection de la ligne.
 - vérifier et remplacer les joints dégradés.
 - respecter l'isométrie et les spécifications des joints.
 - La formation et l'information des operateurs sur ce type d'accident.
 - Insister sur les conditions morales et physiques des operateurs lors de l'embouche.
 - Le respect des procédures du travail surtout ce qui concerne l'HSE.
 - Les exercices et les simulations périodiques.

Quel que soit la probabilité des scenarii pris est faible, le risque est toujours grand pour l'environnement est la population voisine.

Les simulations de tels accidents nous aident à comprendre et à estimer leur effet sur l'homme et l'environnement, de telles manières la modélisation et la simulation peut être prise par les autorités compétentes comme un outil d'aide à la décision.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans cette conclusion, nous allons préciser les principaux apports de notre travail, ainsi que ses limites.

Notre mémoire a porté premièrement sur l'optimisation des performances énergétiques de l'unité de liquéfaction de gaz naturel. Pour effectuer notre étude, nous avons utilisé le logiciel de simulation des processus industriels HYSYS pour avoir les données de nos installations.

Suite à cette étude et à partir des résultats des simulations faites précédemment (chapitre III), elle nous a permis de constater que :

D'une part pour des compositions actuelles du MCR, la consommation d'énergie des deux compresseurs MCRI et MCRII est plus importantes que celle du design ce qui augmente l'autoconsommation de l'unité de liquéfaction

D'autre part Lorsqu'on a augmenté le pourcentage des lourds (C_3) dans la composition du MCR et d'après les résultats que nous avons obtenus la température de sortie du GNL reste presque la même, l'influence est donc sur les puissances des deux compresseurs MCR (une surconsommation) ainsi sur la température d'aspiration de compresseur MCR I qui devient plus basse et le COP qui a diminué.

D'après cette simulation nous avons conclues que cette perturbation de la composition du MCR a des mauvais effets sur le rendement de la boucle et la capacité de refroidissement.

Dans un deuxième temps, on a vu qu'une installation industrielle contenant un produit inflammable présente un potentiel de danger lié aux effets thermiques sur les personnes. Le risque crée par un complexe industrielle est la probabilité qu'une fuite de produit dangereux de s'enflamme, et qu'un nombre plus ou moins important de personnes subisse des brulures en cas d'explosion à cet incendie. Le risque que présente un phénomène dangereux, tel qu'une fuite de produit inflammable, est ainsi la combinaison de :

- L'intensité de ces effets (importance du rayonnement thermique des flammes)
- Le nombre de personne potentiellement exposées à ces effets.

Dans les études de dangers, chaque scénario d'accident doit ainsi être analysé en fonction de sa fréquence et de la gravité de ses conséquences potentielles. Le but de cette démarche est d'évité les risques pour les riverains en concevant l'installation de telle sorte qu'ils ne soient pas exposés aux dangers présents dans l'installation.

Dans un troisième temps, une analyse de risques sous ALOHA d'un incident (fuite de propane) a été effectuée, pour prendre des mesures de sécurité. Ce qui nous a permis de délimiter les zones menacées par les flammes, zones menacées par la surpression et les zones menacées par les radiations thermiques.

Les résultats de calcul, qui sont avant tout fonction des phénomènes dangereux étudiés, ont une précision acceptable pour l'élaboration d'un plan d'urgence.

La réduction du risque est la première étape indispensable de la maîtrise des risques. Son objectif consiste à :

- améliorer sans cesse les processus industriels, les modes opératoires, les techniques de stockage, d'utilisation ou de transfert de gaz naturel...etc.

Malgré toutes ces mesures de prévention, le risque zéro n'existe pas et un événement non souhaité, identifié ou pas dans l'étude de danger, peut survenir dans un établissement industriel. Enfin, nous espérons que cette étude sera prise en considération, car les solutions suggérées peuvent être très bénéfiques pour l'entreprise.

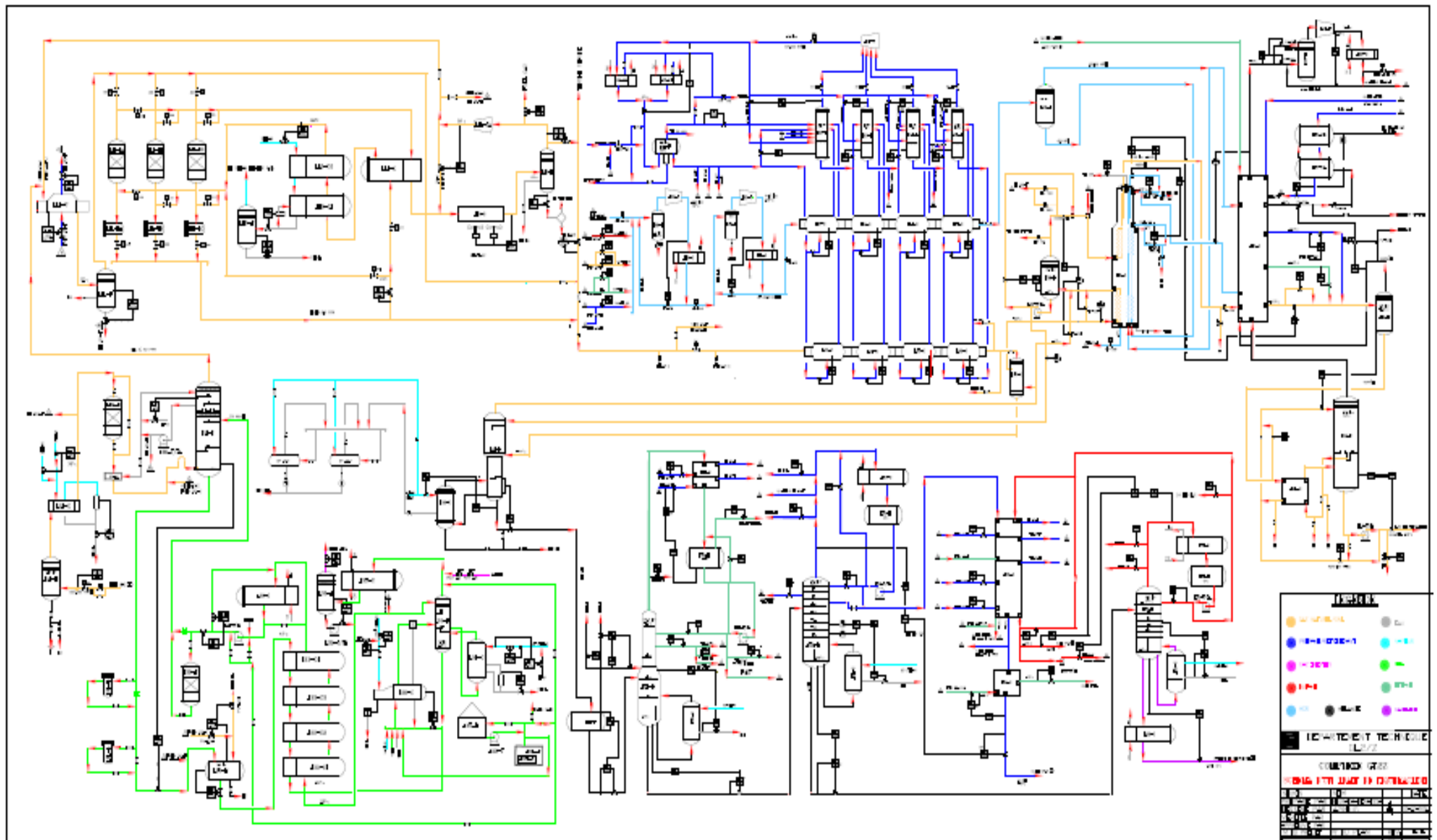
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Techniques de l'ingénieur, traité de génie des procédés, J1080.
- [2] : Manuel opératoire procédé MW.KELLOG Volume 1 GL2/Z, SONATRACH.
- [3] : Manuel opératoire procédé MW.KELLOG Volume 3 GL2/Z, SONATRACH.
- [4] : Manuel opératoire procédé MW.KELLOG Volume 5 GL2/Z, SONATRACH.
- [5] : PIERRE WHUITIER : Génie chimique et Raffinage de pétrole, Tome I
« 2ème Edition : TECHNIP. Paris 1972 »
- [6] : - $\Omega 2$ - INERIS: FEUX DE NAPPE INERIS-DRA-2002-25427.
- [7] : Rapport d'étude INERIS – DRA N° 46053 11/2006 (Examens de l'utilisation du logiciel ALOHA – CAMEO en situation d'urgence).
- [8] : Olivier Denoux- CRAIM Atelier GPL/GNL: LA SCIENCE DU GNL.ppt-p21.
- [9] : Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels (DRA-006) Ω -12
Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul).
- Références web :**
- [10] : Robert REISS. Le gaz naturel liquéfié, <http://www.ec.gc.ca>.
- [11] : Le B.L.E.V.E, <http://www.iracle.fr.st>.

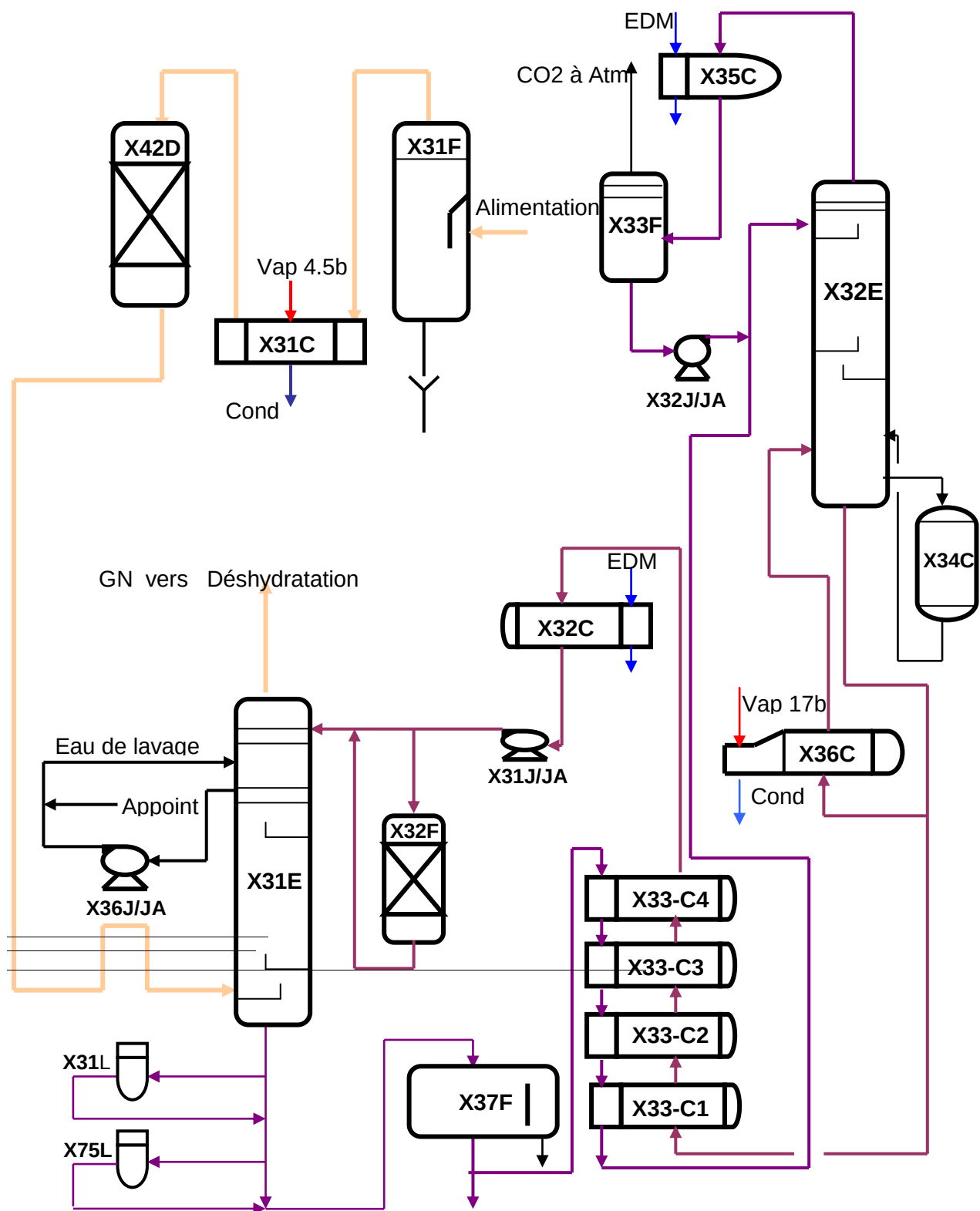
Références bibliographiques

Annexes

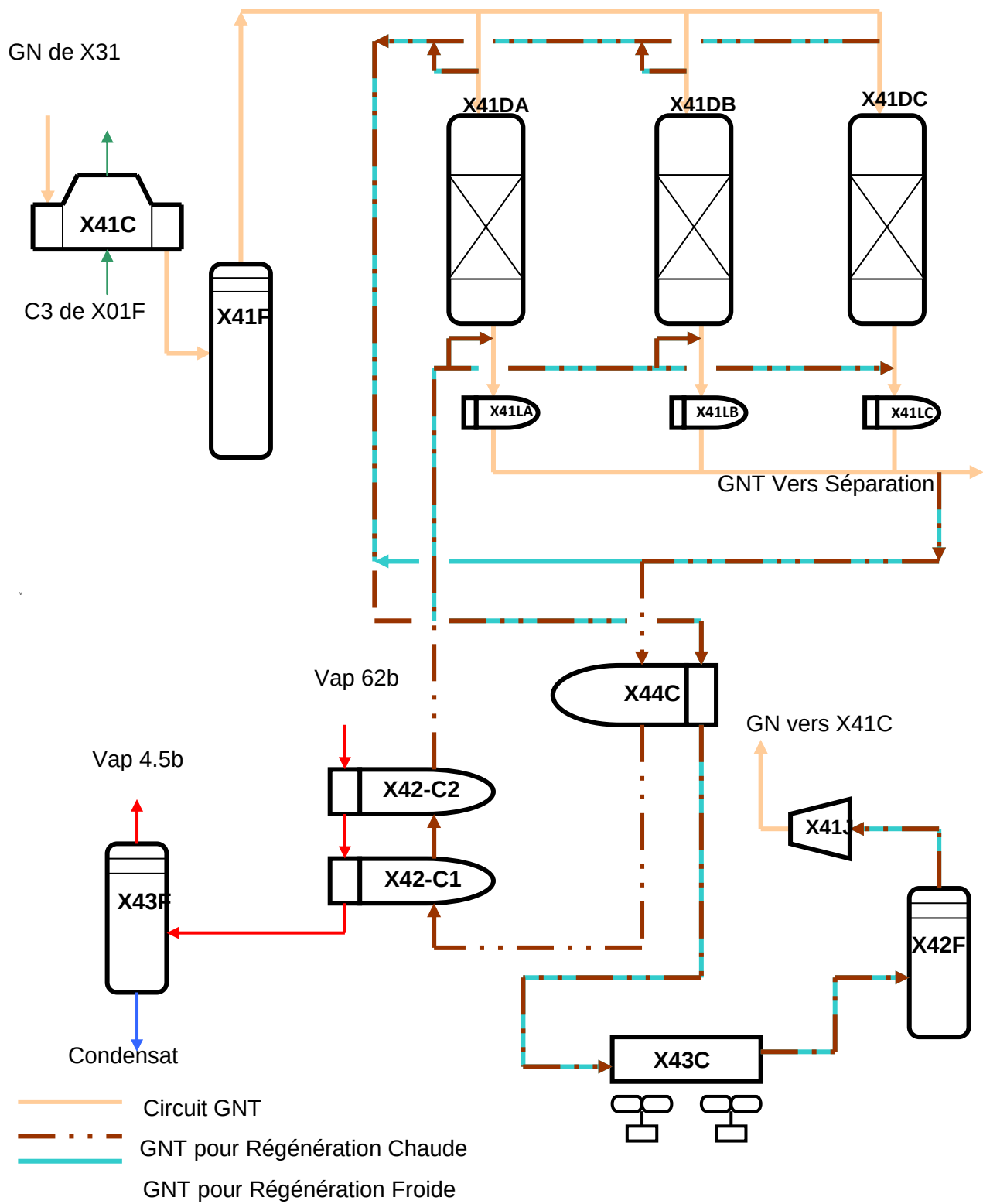
Annexe



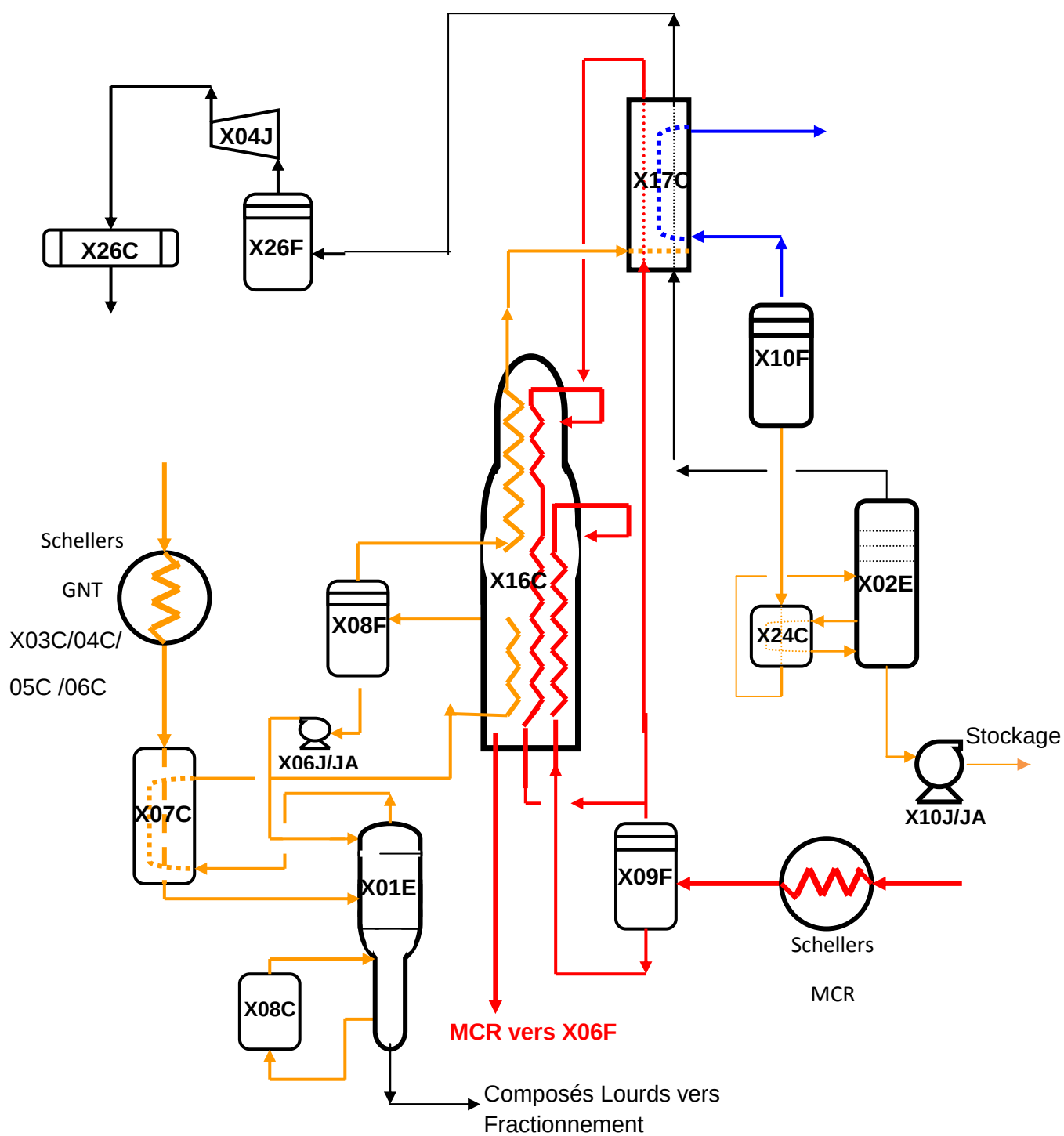
Annexe 1 : Schéma simplifié d'un train de production



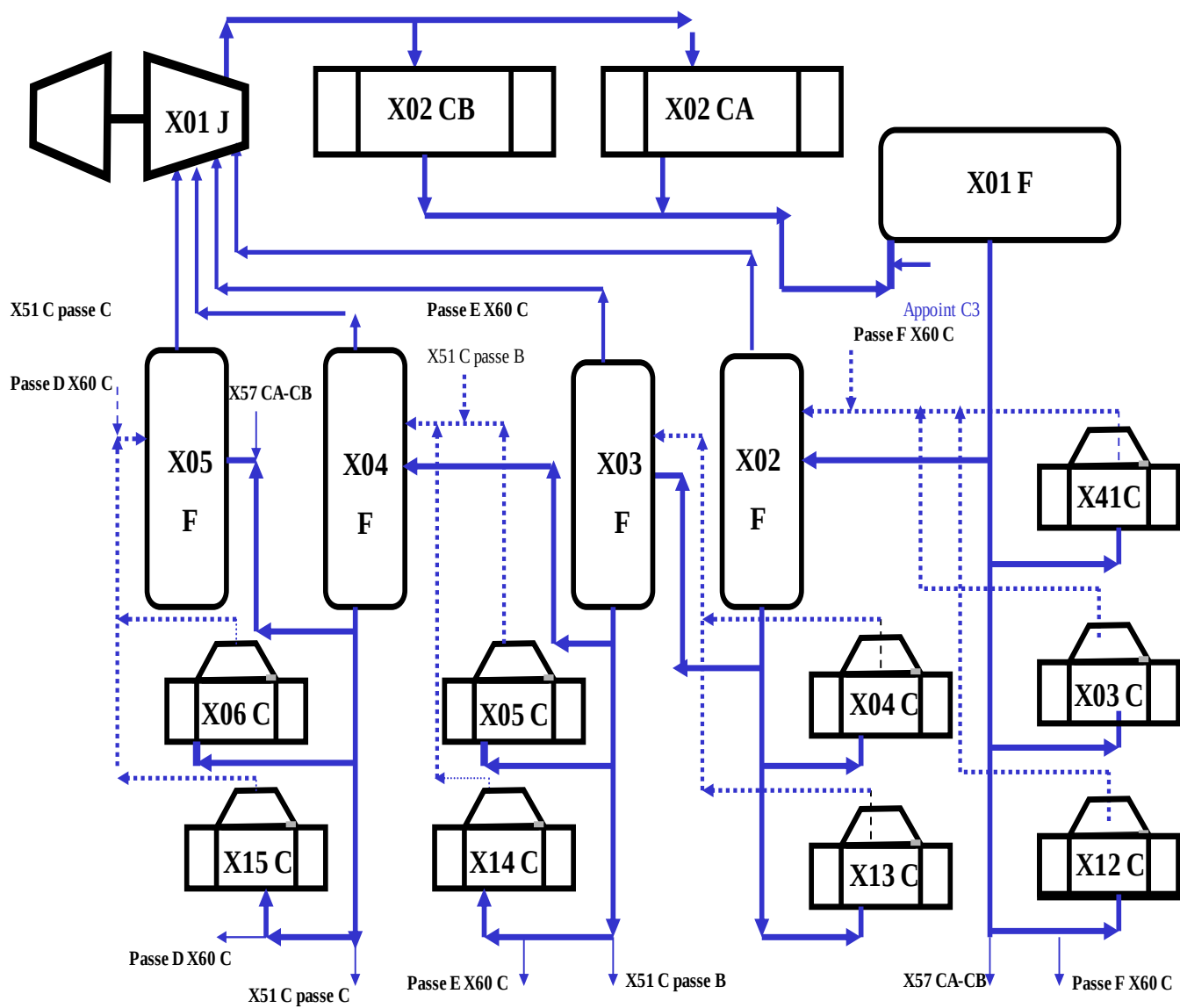
Annexe 2 : Absorption CO₂ et Régénération MEA



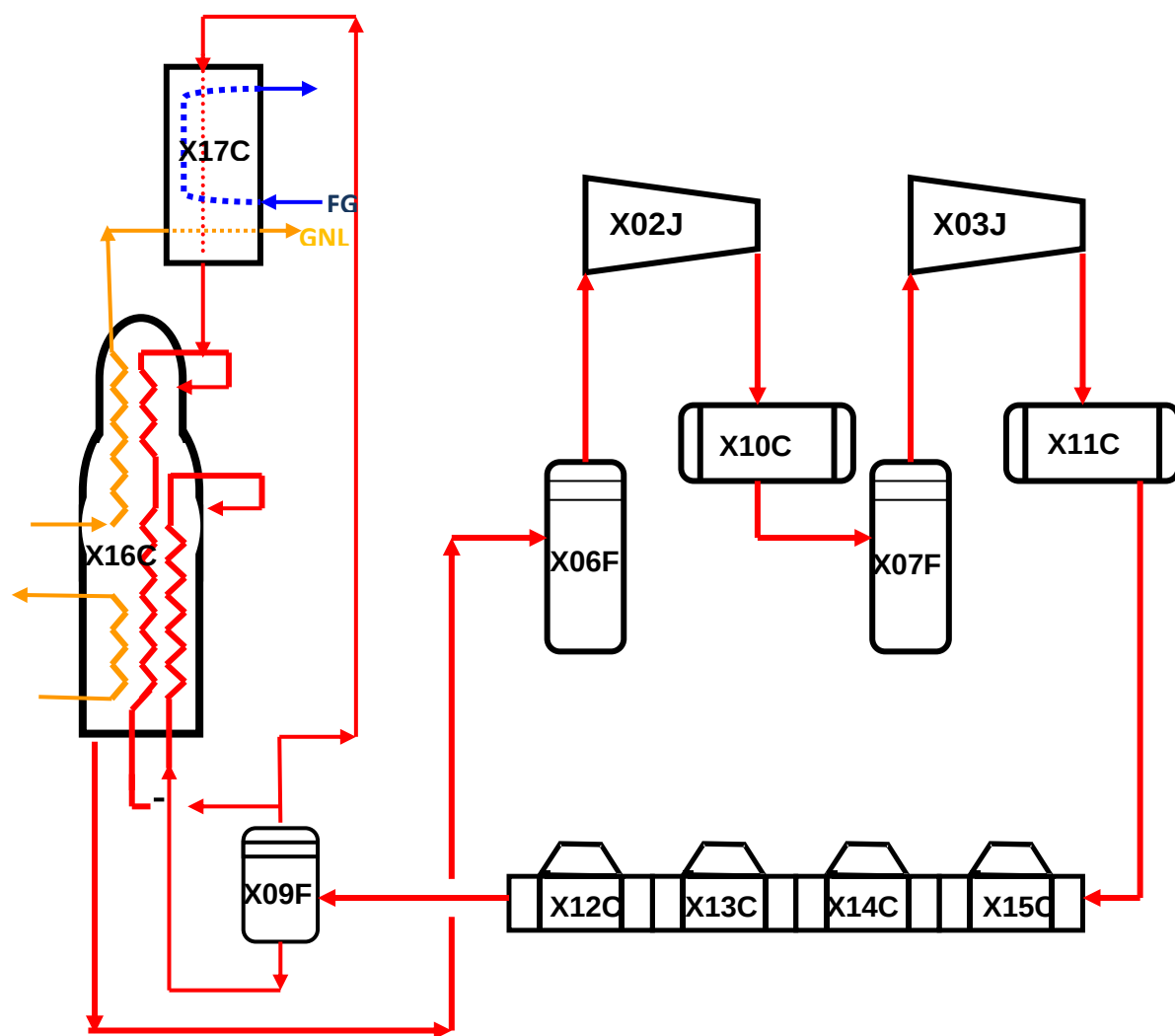
Annexe 3 : Déshydratation



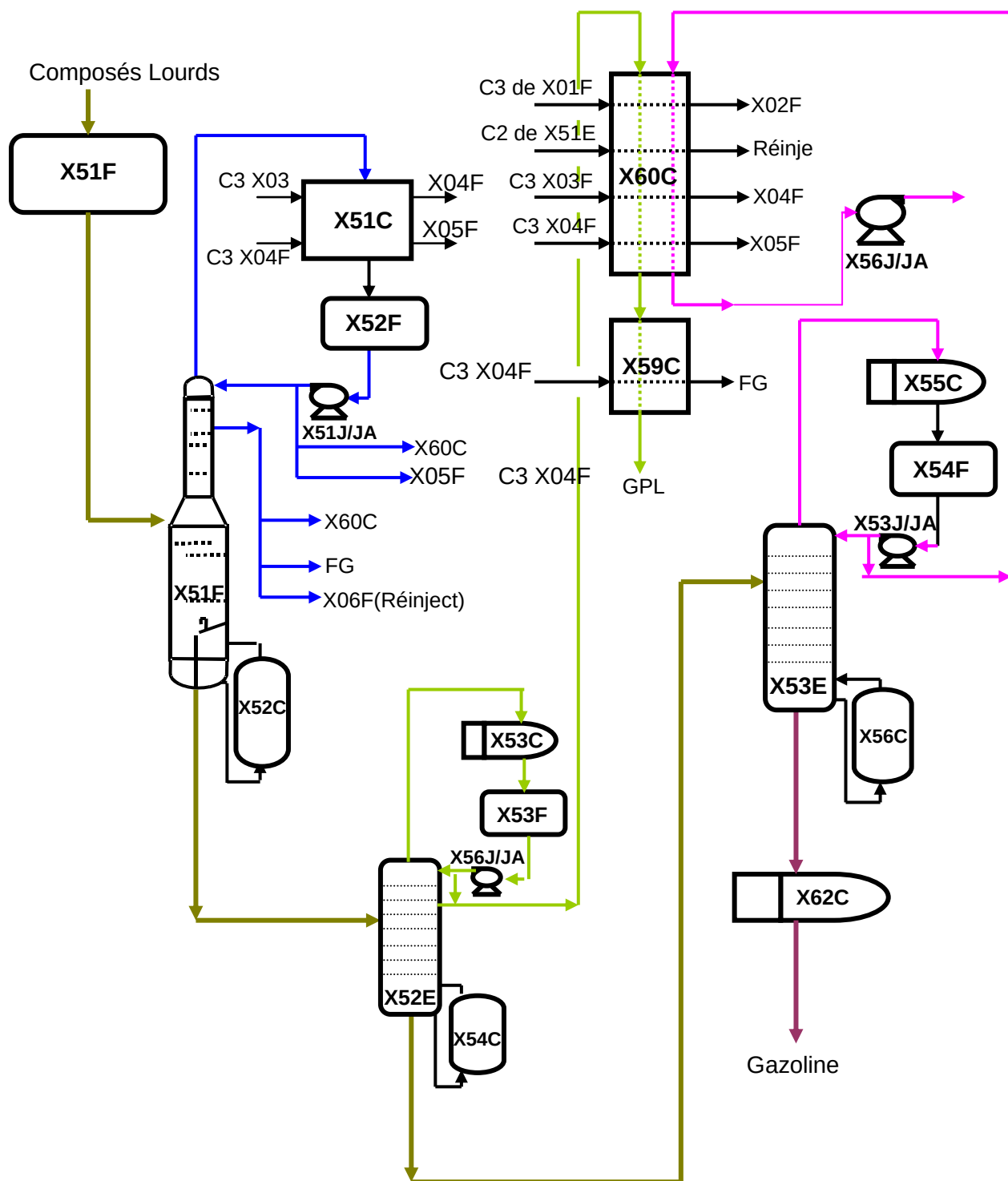
Annexe 4 : Séparation & liquéfaction



Annexe 5 : Boucle propane



Annexe 7 : Fractionnement



Annexe 6 : Boucle MCR

