
	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
	قسم هندسة الطرائق	
	Department of Process Engineering	

N° d'ordre : M2 /GP/2025

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des Procédés**

**Spécialité : Industrie Pétrochimique**

### Thème

**Conception et optimisation d'un réservoir cryogénique  
bi-phasique pour le stockage de l'éthane dans le complexe  
GNL à six trains**

Présenté par

**1-TAÏBI Aymen Abderrazak**

**2-BENYOUCEF Sidahmed**

Soutenu le 01./07./ 2025 devant le jury composé de :

Présidente :	BOUBEGRA Naima	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	FARES Zineb	MAA	Université de Mostaganem
Encadrante :	KHELLADI Malika	MCB	Université de Mostaganem

Année universitaire 2024 / 2025

## ***Remerciements***

Nous souhaitons exprimer notre sincère reconnaissance à notre encadrante académique Dr KHELLADI Malika pour sa précieuse orientation, sa disponibilité et ses conseils constants tout au long de ce travail. Son expertise et son accompagnement ont été essentiels à la réussite de ce projet. Nos remerciements vont aux membres de jury Mme FARES Zineb et Dr BOUBEGRA Naima d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de Génie des Procédés pour la qualité de leur enseignement tout au long de notre formation.

Nous tenons à remercier les ingénieurs et techniciens du complexe GNL GL2Z de Sonatrach, à Arzew, pour leur accueil chaleureux, leur assistance technique et les données opérationnelles mises à notre disposition.

Enfin, une pensée toute particulière à nos familles et nos amis pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements durant cette période importante de notre parcours universitaire.

## ملخص

يقدم هذا البحث دراسة معمّقة حول تصميم وتحسين خزان تبريد ثنائي الطور مخصص لتخزين الإيثان السائل، وذلك ضمن مجمع لإنتاج الهدف من المشروع هو اقتراح حل مركزي موثوق ومتوافق مع المعايير .الغاز الطبيعي المسال يتكوّن من ستة خطوط إنتاج متطابقة (BOG) درجة مئوية مع تقليل الخسائر الناتجة عن التبخر 88.5-الدولية، بضمن الاستقرار الحراري للإيثان عند درجة حرارة وقد تم حساب أبعاد Aspen HYSYS بعد دراسة نظرية لأنواع الخزانات المبردة، تم تنفيذ نموذج حراري ديناميكي باستخدام برنامج لتحديد المخاطر الرئيسية واقتراح HAZOP كما أجري تحليل .القسم الثامن ASME و EN 14620 و API 620 الخزان وفقاً للمعايير إجراءات الأمان المناسبة واختمت الدراسة بتحليل اقتصادي وبيئي، أظهر مزايا الحل المركزي مقارنة باستخدام ستة خزانات منفصلة من حيث التكلفة والسلامة وكفاءة الأداء.

الكلمات المفتاحية: الغاز المتبخّر ، العزل الحراري ، التبريد العميق، الإيثان السائل، خزان ثنائي الطور، الغاز الطبيعي المسال

## Abstract

This thesis presents a comprehensive study on the design and optimization of a bi-phase cryogenic tank for the storage of liquid ethane in an LNG production complex composed of six identical liquefaction trains. The objective is to propose a centralized, safe and standardized storage solution ensuring thermal stability of ethane at  $-88.5^{\circ}\text{C}$  while minimizing boil-off gas (BOG) losses.

After a theoretical review of cryogenic tank technologies, a thermal simulation was conducted using Aspen HYSYS. The tank was dimensioned following API 620, EN 14620 and ASME Section VIII standards. A HAZOP analysis identified the main operational risks and corresponding safety measures. The study concludes with an economic and environmental assessment, demonstrating the advantages of a centralized system over multiple isolated units.

**Keywords:** *Cryogenics, Liquid Ethane, Bi-phase Tank, LNG, GL2Z, Boil-Off Gas (BOG), Aspen HYSYS, Sizing, Thermal Insulation, HAZOP Analysis.*

## ***Résumé***

Ce mémoire présente une étude approfondie sur la conception et l'optimisation d'un réservoir cryogénique bi-phasique destiné au stockage de l'éthane liquide dans un complexe de production de GNL comportant six trains identiques. L'objectif est de proposer une solution centralisée, fiable et conforme aux normes internationales, permettant de garantir la stabilité thermique de l'éthane à  $-88,5\text{ °C}$  tout en minimisant les pertes par évaporation (BOG).

Après une analyse théorique des types de réservoirs cryogéniques, une modélisation thermique dynamique a été réalisée sous Aspen HYSYS. Le dimensionnement du réservoir est basé sur les normes API 620, EN 14620 et ASME Section VIII. Une évaluation HAZOP a permis d'identifier les risques principaux et de proposer des mesures de sécurité. L'étude est complétée par une analyse économique et environnementale, démontrant l'intérêt d'un stockage centralisé unique par rapport à six ballons séparés.

**Mots-clés :** *Cryogénie, Éthane liquide, Réservoir bi-phasique, GNL, GL2Z, Boil-Off Gas (BOG), Aspen HYSYS, Dimensionnement, Isolation thermique, Analyse HAZOP.*

## *Liste des figures*

<b>Figure 1:</b> Réseaux interconnectés pour le MCR, le gaz de combustible, le BOG et l'éthane.....	5
<b>Figure 2 :</b> Schéma simplifié du procédé GL2Z, incluant les flux de gaz et les points de separation. ....	6
<b>Figure 3 :</b> schéma en coupe d'un réservoir cryogénique pour l'éthane .....	15
<b>Figure 4:</b> Schéma PID simplifié du réservoir cryogénique d'éthane . ....	22
<b>Figure 5:</b> Modélisation de l'échange thermique à travers l'isolant du réservoir cryogénique .....	25
<b>Figure 6:</b> Schéma simplifiée d'analyse HAZOP .....	26
<b>Figure 7:</b> Évolution du BOG et de la pression interne après l'arrêt de l'installation.....	29
<b>Figure 8:</b> l'évolution simultanée de la température liquide et du BOG .....	30
<b>Figure 9:</b> l'influence de l'épaisseur d'isolation sur le BOG. Équilibre optimal: 0,5 m → bon compromis entre coût et performance.....	31
<b>Figure 10:</b> Courbe comparant cumul CAPEX+OPEX sur 20 ans entre Option A et B. ....	34
<b>Figure 11:</b> comparaison CAPEX+OPEX sur 20 ans entre option A et B. ....	35
<b>Figure 12:</b> schéma de récupération du BOG et émissions évitées Le Recyclage du BOG améliore:.....	41

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau 1:</b> Principaux défis techniques liés à la gestion de l'éthane dans les complexes gaziers. ....	7
<b>Tableau 2:</b> Avantages techniques et impacts opérationnels de la bonne gestion de l'éthane. ....	8
<b>Tableau 3:</b> Types de réservoirs de stockage cryogénique et leurs caractéristiques techniques. ....	12
<b>Tableau 4 :</b> "Types de stockage des fluides cryogéniques et gazeux – Description et applications" .....	12
<b>Tableau 5 :</b> tableau de correspondance des normes API / EN / ISO [6] .....	13
<b>Tableau 6:</b> Évolution des technologies de stockage cryogénique par époque. ....	14
<b>Tableau 7:</b> Paramètres techniques du réservoir cryogénique d'éthane .....	16
<b>Tableau 8:</b> Résumé des caractéristiques techniques et thermiques du réservoir cryogénique d'éthane .....	19
<b>Tableau 9:</b> Contraintes imposées par les propriétés de l'éthane sur le choix des matériaux. ....	20
<b>Tableau 10:</b> Matériaux recommandés et normes associées pour les équipements cryogéniques à l'éthane .....	22
<b>Tableau 11:</b> Comparaison des matériaux utilisables pour les réservoirs cryogéniques. ....	23
<b>Tableau 12:</b> Conditions initiales et hypothèses de simulation thermique du réservoir .....	24
<b>Tableau 13:</b> Estimation économique d'un réservoir cryogénique et de son exploitation. ....	27
<b>Tableau 14:</b> Évolution temporelle de la température, du BOG et de la pression interne dans le réservoir sur 48h .....	29
<b>Tableau 15:</b> Analyse des déviations critiques sur un réservoir cryogénique d'éthane – causes, conséquences et actions .....	32
<b>Tableau 16:</b> Matrice de criticité des risques – Gravité vs Probabilité. ....	32
<b>Tableau 17:</b> Systèmes de sécurité intégrés pour un réservoir cryogénique d'éthane. ....	33
<b>Tableau 18 :</b> Caractéristiques des complexes de liquéfaction de gaz naturel en Algérie .....	36
<b>Tableau 19:</b> État du stockage cryogénique de l'éthane dans les complexes algériens .....	36
<b>Tableau 20:</b> Comparaison internationale des solutions de stockage et valorisation de l'éthane .....	36
<b>Tableau 21:</b> les types de maintenance applicables .....	38
<b>Tableau 22:</b> Impact environnemental de l'intégration du réservoir cryogénique. ....	42

## *Glossaire et abréviations*

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
BOG	Boil-Off Gas (gaz d'évaporation)
API	American Petroleum Institute
HAZOP	Hazard and Operability Analysis
LNG Train	Unité de liquéfaction dans un complexe GNL
PFD	Process Flow Diagram
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
CAPEX	Capital Expenditures (coûts d'investissement)
OPEX	Operating Expenditures (coûts d'exploitation)
MCR	Mixed Refrigerant (réfrigérant mixte)
ROI	Return on Investment

# Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumés

Liste des figures

Liste des tableaux

Glossaire et abréviations

INTRODUCTION ..... 1

## CHAPITRE I

I.1.1. Présentation générale du complexe GL2Z .....	5
I.1.1.1. Capacités et infrastructure.....	5
I.1.1.2. Étapes du traitement du gaz .....	6
I.1.2. Le rôle de l'éthane dans le complexe GNL.....	6
I.1.2.1. L'éthane: un produit clé du traitement cryogénique .....	6
I.1.2.2. Utilisations internes de l'éthane.....	7
I.1.2.3. Contraintes de stockage de l'éthane .....	7
I.1.2.4. Limites actuelles dans la gestion de l'éthane.....	7
a- Système sans réservoir dédié .....	7
b- Nécessité d'un réservoir centralisé bi-phasique.....	8
I.2. Problématique, objectifs et méthodologie.....	9
I.2.1. Problématique .....	9
I.2.2. Problématique élargie dans le contexte GNL.....	9
I.2.3. Objectifs du mémoire.....	10
I.2.4. Méthodologie générale .....	10
a) Revue bibliographique et normative.....	10
b) Conception technique du réservoir .....	11
c) Simulation et analyse thermique .....	11
d) Sécurité et fiabilité .....	11
e) Évaluation économique et environnementale.....	11
I.3.1. Définition d'un réservoir cryogénique .....	12
I.3.2. Typologie des réservoirs cryogéniques .....	12
I.3.2.2. Classement par phase stockée .....	12
I.3.3. Réservoirs verticaux à fond plat – Choix retenu .....	13
I.3.4. Normes et référentiels applicables .....	13
I.3.5. Évolution des technologies de stockage cryogénique.....	13
I.3.6. Pourquoi un réservoir cryogénique est indispensable dans un complexe GNL .....	14

## CHAPITRE II : Matériel et Méthodes

II.1. 1. Le dimensionnement cryogénique.....	15
II.1.2. Données de base et hypothèses de conception .....	16
II.1.2.1. Calcul de la hauteur du fluide.....	16
II.1.2.2. Épaisseur de la virole (paroi latérale) .....	16
II.1.2.3. Dimensionnement du fond du réservoir .....	17
II.1.2.4. Dimensionnement du toit .....	17
II.1.2.5. Évaluation des pertes thermiques totales .....	18
II.1.2.6. Calcul du BOG (Boil-Off Gas) .....	18
II.1.2.7. Synthèse du dimensionnement .....	19

II.2.1. Caractéristiques de l'éthane et implications sur les matériaux .....	20
II.2.2. Matériaux principaux du réservoir .....	20
II.2.2.1. Cuve interne .....	20
II.2.2.2. Cuve externe .....	21
II.2.2.3. Isolation thermique.....	21
II.2.2.4. Fond du réservoir .....	22
II.2.2.5. Accessoires et équipements.....	22
II.2.3. Comparaison économique des matériaux .....	23
Conclusion du choix des matériaux.....	23
II.3.1. Hypothèses de modélisation .....	24
II.3.2. Modélisation sous HYSYS.....	24
II.4.1. Introduction à la méthode HAZOP.....	25
II.4.2. Objectifs de l'étude HAZOP.....	26
II.5.1. Objectifs de l'étude économique .....	27
II.5.2. Données économiques de base .....	27
II.5.3. Estimation du CAPEX .....	27
a) Option A – 6 réservoirs individuels .....	27
b) Option B – 1 réservoir centralisé .....	27
a. Estimation de l'OPEX sur 20 ans.....	28
b. Retour sur investissement (ROI).....	28
a) Coût total sur 20 ans.....	28

### CHAPITRE III : Résultats et Discussion

b) Cas de perturbation: perte partielle de vide dans l'isolant .....	30
III.2.1. Analyse de gravité et probabilité .....	32
III.2.2. Mesures de sécurité installées .....	33
III.2.3. Retour d'expérience (REX) industriel.....	33
III.2.4. Limites de l'analyse HAZOP .....	33
III.4 Objectif du benchmark .....	35
III.4.1. Répartition des complexes GNL algériens .....	35
III.4.3. État actuel de la valorisation de l'éthane.....	36
III.4.3. Comparaison avec projets internationaux.....	36
III.4.4. Analyse critique .....	36
III.4.5. Leçons pour GL2Z .....	37
II.5.1. Objectif du chapitre .....	37
III.5.2. Types de maintenance applicables .....	38
III.5.3 Système SCADA et capteurs critiques .....	38
a) SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) .....	38
b) Capteurs utilisés .....	38
III.5.4. Maintenance prédictive (PdM) : principe .....	39
III.5.5. Jumeau numérique du réservoir .....	39
III.5.6. Intelligence artificielle et Machine Learning (ML) .....	39
III.5.7. Avantages globaux .....	40
▪ Résultats techniques clés .....	40

### Chapitre IV: Impact environnemental et valorisation énergétique du stockage cryogénique de l'éthane

IV.1. Contexte environnemental .....	40
IV.2. Émissions évitées grâce à la récupération du BOG .....	40
IV 3. Respect des normes environnementales.....	40
IV.4 Valorisation énergétique du BOG .....	41
IV.5. Intégration à la politique RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises) .....	41
IV. 6. Indicateurs environnementaux clés .....	42
Conclusion .....	42
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>43</b>
<b>Recommandations.....</b>	<b>44</b>

**Bibliographie.....46**  
**Annexes .....48**

## Introduction générale

Dans un contexte mondial de transition énergétique, le gaz naturel liquéfié (GNL) s'impose comme une alternative stratégique, plus propre et plus flexible que les combustibles fossiles conventionnels. Parmi les composants clés du GNL, l'éthane joue un rôle crucial dans les industries pétrochimiques, notamment comme matière première pour la production d'éthylène qui est un élément fondamental de la chaîne des plastiques et des solvants. Sa récupération, son transport et son stockage sécurisés sous forme liquide nécessitent des solutions technologiques avancées, notamment dans les zones portuaires et industrielles comme le complexe d'Arzew, en Algérie, qui abrite plusieurs installations majeures telles que GL1Z et GL3Z [1].

L'éthane, à l'état liquide, exige des conditions cryogéniques rigoureuses, avec une température de stockage d'environ  $-88\text{ °C}$  et une gestion précise de la pression. Ces contraintes techniques imposent la mise en œuvre de réservoirs spécifiques, capables de contenir ce fluide dans des conditions extrêmes tout en garantissant la sécurité, la stabilité thermique et la réduction des pertes par évaporation (boil-off gas). Dans les complexes GNL composés de plusieurs unités de liquéfaction ou "trains", la centralisation du stockage de l'éthane devient une solution avantageuse, tant sur les plans économiques qu'opérationnel.

Le choix d'un réservoir cryogénique centralisé bi-phasique s'impose alors pour répondre aux défis posés par les quantités importantes d'éthane à stocker, la limitation des pertes énergétiques et la réduction des risques liés à la multiplication des installations. Ce type de réservoir permet en effet une cohabitation contrôlée entre la phase liquide et la phase vapeur, optimisant la récupération du gaz et la stabilité de pression dans l'ensemble du système. Sa conception fait appel à des connaissances multidisciplinaires, allant de la thermodynamique appliquée à la résistance des matériaux, en passant par l'ingénierie de sécurité, la simulation thermique et l'analyse économique.

L'objectif principal de ce mémoire est donc de concevoir un réservoir cryogénique bi-phasique de grande capacité, apte à desservir un complexe GNL constitué de six trains identiques, tout en assurant une performance optimale, une conformité stricte aux normes internationales, et une adaptabilité à long terme.

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

Ce travail s'appuie sur une double approche : une première partie théorique traitant des fondements scientifiques et normatifs du stockage cryogénique, et une deuxième partie pratique dédiée au dimensionnement, à la simulation et à l'optimisation du réservoir dans un environnement industriel réaliste.

Ainsi, ce mémoire vise à proposer une solution intégrée, innovante et économiquement viable pour le stockage de l'éthane, contribuant à l'amélioration de la chaîne de valeur du GNL en Algérie, dans une optique de durabilité, de fiabilité et d'efficacité énergétique.

**CHAPITRE I**  
**Revue bibliographique et descriptive**

## I.1. Contexte industriel: le complexe GL2 Z et le role stratégique de l'éthane

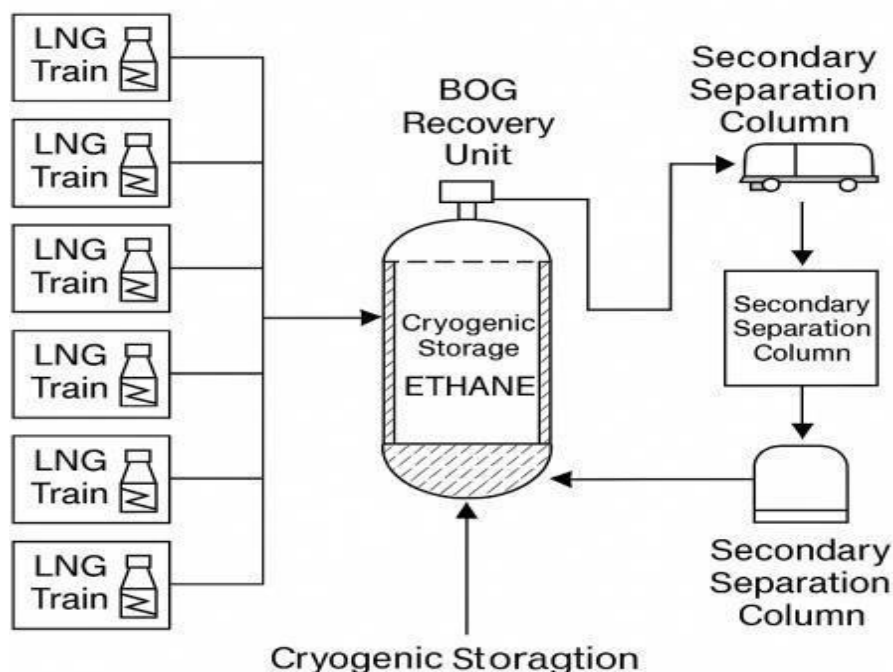
L'industrialisation énergétique en Algérie repose largement sur la valorisation du gaz naturel. Le complexe GL2Z s'inscrit dans cette stratégie, en exploitant notamment l'éthane, une ressource clé. Cette introduction présente le contexte industriel et l'importance stratégique de cette molécule [1].

### I.1.1. Présentation générale du complexe GL2Z

Le complexe GL2Z est l'un des plus grands centres de liquéfaction de gaz naturel en Algérie. Opéré par Sonatrach, il est situé dans la zone industrielle d'Arzew, sur la côte ouest du pays. Il représente un maillon essentiel de la chaîne de valeur du GNL algérien destiné à l'exportation (principalement vers l'Europe et l'Asie) [1].

#### I.1.1.1. Capacités et infrastructure

- 6 trains de liquéfaction identiques, disposés en parallèle.
- Capacité totale de traitement: environ 18 milliards de m<sup>3</sup>/an.
- Procédé utilisé: APCI C3-MR (Propane Mixed Refrigerant).
- Plusieurs unités auxiliaires: fractionnement, compression, stockage, torchage, récupération de gaz.



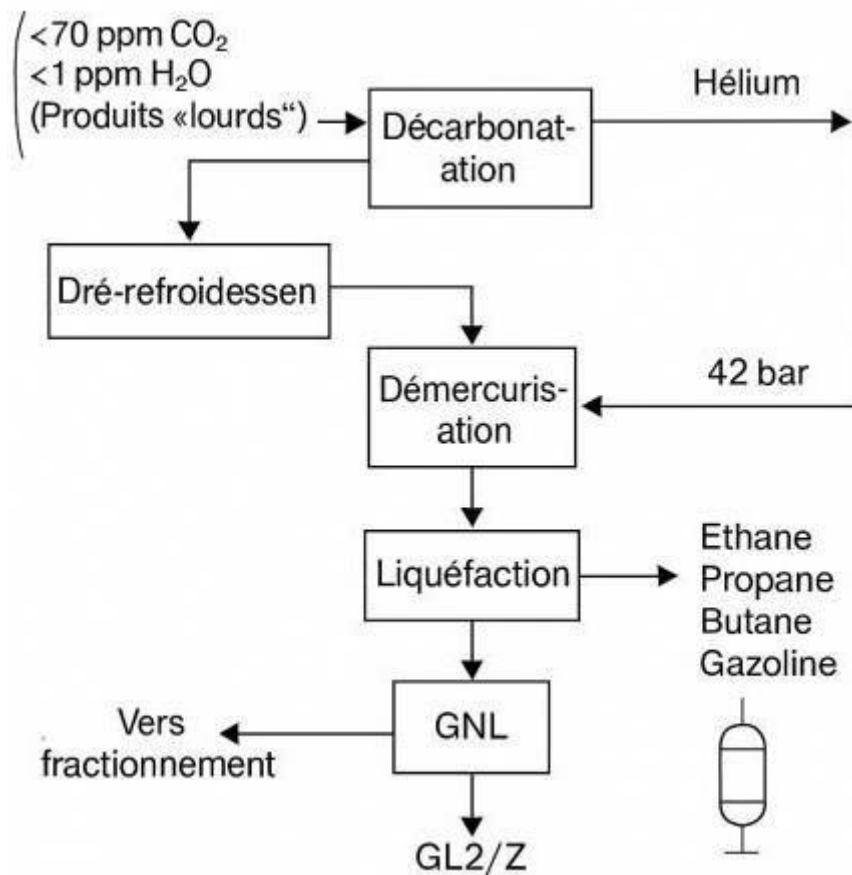
**Figure 1:** Réseaux interconnectés pour le MCR, le gaz de combustible, le BOG et l'éthane.

### I.1.1.2. Étapes du traitement du gaz

Le gaz naturel, en provenance des champs du sud algérien est acheminé par gazoduc jusqu'à Arzew, puis traité selon la séquence suivante:

1. Décarbonatation (retrait du CO<sub>2</sub>)
2. Déshydratation (élimination de l'eau)
3. Démercurisation (retrait du mercure)
4. Liquéfaction sous -162 °C (via propane et MCR)

Fractionnement cryogénique: séparation de l'éthane, propane, butane et autres C, [2].



**Figure 2 :** Schéma simplifié du procédé GL2Z, incluant les flux de gaz et les points de separation.

## I.1.2. Le rôle de l'éthane dans le complexe GNL

### I.1.2.1. L'éthane: un produit clé du traitement cryogénique

L'éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) est un hydrocarbure léger, séparé en fin de traitement dans les colonnes de distillation cryogénique. Il représente généralement 4 à 10 % du gaz naturel brut. Au sein du complexe, il est capturé à l'état liquide, sous des conditions proches de son point d'ébullition:

- Température de liquéfaction :  $-88,5\text{ °C}$
- Pression moyenne de stockage : 3,5 bar

Il possède un pouvoir calorifique supérieur élevé et une volatilité accrue, ce qui le rend à la fois énergétiquement intéressant et thermiquement instable [2].

### I.1.2.2. Utilisations internes de l'éthane

Dans le complexe GL2Z, l'éthane joue plusieurs rôles critiques:

- Réfrigérant d'appoint: lors des phases de démarrage des trains, il est utilisé pour abaisser rapidement la température avant injection du MCR.
- Équilibrage du réseau MCR: en cas de déséquilibre de composition.
- Carburant occasionnel pour les fours ou turbines si surstockage.
- Valorisation secondaire: il peut être stocké puis réinjecté dans la chaîne de valorisation pétrochimique (éthylène) ou exporté [2].

### I.1.2.3. Contraintes de stockage de l'éthane

Stocker l'éthane de manière sûre et durable représente un défi technique important:

**Tableau 1:** Principaux défis techniques liés à la gestion de l'éthane dans les complexes gaziers.

Défi	Détail technique
Stabilité thermique	Nécessite un confinement à $-88,5\text{ °C}$
Volatilité élevée	Génère du BOG très rapidement si mal isolé
Inflammabilité	Gaz explosif, besoin d'inertage et soupapes de sécurité
Débit variable	Production irrégulière selon le fonctionnement des trains
Absence de stockage adéquat	Peut mener à un torchage systématique

### I.1.2.4. Limites actuelles dans la gestion de l'éthane

#### a- Système sans réservoir dédié

Actuellement, l'éthane produit au sein du complexe GL2Z est:

- Directement valorisé s'il y a une demande pétrochimique.
- Sinon, injecté dans le torchage ou temporairement accumulé dans des ballons tampons de petite capacité [3].

Cela génère:

- Des pertes énergétiques importantes (>30 % de l'éthane produit torché).
- Une instabilité des redémarrages (car manque d'éthane liquide à injecter).
- Une perte de rentabilité globale pour Sonatrach.

### **b- Nécessité d'un réservoir centralisé bi-phasique**

Mettre en place un réservoir cryogénique bi-phasique centralisé permettrait [3]:

**Tableau 2:** Avantages techniques et impacts opérationnels de la bonne gestion de l'éthane.

<b>Avantage principal</b>	<b>Impact opérationnel</b>
<b>Stockage stable à -88,5 °C</b>	Éthane prêt à l'emploi pour démarrage
<b>Récupération du BOG</b>	Réduction du torchage, valorisation énergétique
<b>Meilleure intégration réseau</b>	Distribution vers les 6 trains via un seul point
<b>Économie de fonctionnement</b>	Moins de perte, moins de consommation gaz
<b>Respect environnemental</b>	Réduction émissions GES (gaz à effet de serre)

## I.2. Problématique, objectifs et méthodologie

### I.2.1. Problématique

Dans les complexes de liquéfaction de gaz naturel, l'éthane est l'un des composants les plus importants du gaz naturel enrichi. Il est séparé dans les unités cryogéniques à la suite de la distillation fractionnée et peut être soit valorisé en aval (pétrochimie), soit réutilisé en interne dans le complexe.

En particulier, dans les complexes GNL multi-trains comme GL2Z à Arzew, l'éthane joue un double rôle stratégique:

- Il constitue un sous-produit énergétique potentiellement valorisable.
- Il est utilisé comme réfrigérant complémentaire ou fluide tampon lors du démarrage à froid des trains GNL, permettant de pré refroidir les circuits avant injection de MCR (Mixed Refrigerant).

Or, ce composé présente plusieurs contraintes majeures:

- Il nécessite un stockage à très basse température ( $-88,5\text{ °C}$ ) et à pression modérée ( $\approx 3,5$  bar), conditions proches du point d'ébullition.
- Il produit une quantité importante de BOG (Boil-Off Gas) si l'isolation du réservoir est défaillante.
- Il est hautement inflammable à l'état gazeux et nécessite une protection rigoureuse (inertage, soupapes, double paroi...).

L'enjeu est donc de concevoir un système de stockage fiable, conforme aux normes cryogéniques internationales, et optimisé thermiquement et économiquement, capable de:

- Minimiser les pertes par évaporation.
- Alimenter tous les trains GNL via un réseau unique.
- Résister aux cycles de remplissage et de vidange.
- Faciliter la maintenance et garantir la sécurité en exploitation.

### I.2.2. Problématique élargie dans le contexte GNL

L'éthane, dans le contexte de GL2Z:

- est produit en quantité continue, même lorsque les trains sont à l'arrêt,
- peut déstabiliser le réseau MCR s'il n'est pas stocké correctement,

- est torché s'il n'est pas immédiatement valorisé ou stocké, entraînant des pertes économiques et environnementales.

Ainsi, l'absence d'un système de stockage cryogénique centralisé provoque:

- des pertes par torchage et par évaporation,
- des démarrages plus longs et plus coûteux,
- un déséquilibre dans la gestion thermique du complexe.

### I.2.3. Objectifs du mémoire

Ce travail vise à concevoir et dimensionner un réservoir cryogénique bi-phasique, capable de stocker l'éthane liquide à très basse température, destiné à un complexe GNL comprenant six trains identiques.

Les objectifs spécifiques sont :

- Étudier les types de réservoirs cryogéniques existants et choisir celui adapté à l'éthane.
- Identifier les contraintes thermiques, mécaniques et opérationnelles.
- Appliquer les normes API, EN et ISO applicables au projet.
- Réaliser le dimensionnement mécanique complet du réservoir (épaisseur, hauteur, toit, fond, isolation).
- Simuler le comportement thermique sous Aspen HYSYS.
- Réaliser une étude HAZOP pour identifier les risques.
- Comparer économiquement deux scénarios : 6 ballons vs 1 ballon centralisé.
- Proposer une stratégie de maintenance prédictive adaptée.
- Analyser l'impact environnemental (émissions évitées, valorisation du BOG).

### I.2.4. Méthodologie générale

Le mémoire suit une démarche structurée en plusieurs étapes complémentaires :

#### a) Revue bibliographique et normative

- Étude des réservoirs cryogéniques : technologies, matériaux, normes API 625, EN 14620, ASME VIII...
- Analyse de cas industriels similaires (Sonatrach, QatarGas, Shell LNG Canada).

### **b) Conception technique du réservoir**

- Hypothèses de dimensionnement.
- Calculs géométriques (volume, hauteur, virole, toit, fond).
- Étude de l'isolation cryogénique.

### **c) Simulation et analyse thermique**

- Utilisation de Aspen HYSYS pour modéliser les pertes et la formation de BOG.
- Évaluation de la performance en conditions normales et perturbées.

### **d) Sécurité et fiabilité**

- Étude HAZOP des scénarios de défaillance.
- Analyse des points critiques du système.

### **e) Évaluation économique et environnementale**

- Comparaison CAPEX/OPEX de 6 réservoirs individuels vs 1 réservoir central.
- Bilan carbone et valorisation du BOG.

### I.3. Réservoirs cryogéniques: typologie, norms et evolution technologique

#### I.3.1. Définition d'un réservoir cryogénique

Un réservoir cryogénique est une enceinte conçue pour stocker des fluides liquéfiés à très basse température. Il assure le maintien de l'état liquide du fluide malgré les écarts thermiques avec l'environnement extérieur (souvent > 100 °C). Les réservoirs cryogéniques doivent offrir [4] :

- Une isolation thermique optimale,
- Une sécurité maximale contre les surpressions et les fuites,
- Une résistance mécanique aux chocs, contractions et dilatations,
- Une durabilité sur plusieurs décennies.

Ils sont utilisés dans diverses industries: GNL, pétrochimie, biomédecine (oxygène liquide), spatiale (hélium, hydrogène liquide), etc.

#### I.3.2. Typologie des réservoirs cryogéniques

##### I.3.2.1. Classement par structure

**Tableau 3:** Types de réservoirs de stockage cryogénique et leurs caractéristiques techniques

Type	Description technique	Avantages principaux
Simple paroi	Paroi unique, isolation minimale ou absente	Utilisation de courte durée (laboratoires)
Double paroi isolée	Paroi interne (produit) + externe (structure) + isolation au centre	Faible perte thermique, usage industriel courant
Multicouche sous vide	Isolation par couches réfléchissantes + vide	Excellent pour les fluides extrêmement volatils
Enterré (en fosse)	Réservoir enterré partiellement ou complètement	Protection passive + faible impact visuel

##### I.3.2.2. Classement par phase stockée

**Tableau 4 :** "Types de stockage des fluides cryogéniques et gazeux – Description et applications"

Type	Description	Exemple d'application
Monophasique	Stockage uniquement en phase liquide	Réservoirs d'oxygène médicaux
Bi-phasique	Stockage avec liquide + gaz en équilibre	GNL, éthane, MCR
Gaz sous pression	Stockage sous forme gazeuse comprimée	Réservoirs d'hydrogène

Dans notre cas, un réservoir bi-phasique est nécessaire, car l'éthane est stocké sous forme liquide avec dégagement de gaz (BOG), qu'il faut récupérer et réutiliser.

**I.3.3. Réservoirs verticaux à fond plat – Choix retenu**

Le type retenu pour ce projet est un réservoir vertical à double paroi avec fond plat, conforme aux standards des grands réservoirs GNL [5].

- Cuve interne : inox 304L (contenu cryogénique)
- Cuve externe : acier carbone (structure)
- Isolation : perlite sous vide, épaisseur de 50 cm
- Toit : autoportant, légèrement bombé
- Fond : isolé, repose sur une dalle en béton armé isolée.

**I.3.4. Normes et référentiels applicables**

Pour garantir la sécurité et la conformité du réservoir, plusieurs normes internationales sont à appliquer.

**Tableau 5 : tableau de correspondance des normes API / EN / ISO [6]**

<b>Norme</b>	<b>Domaine couvert</b>	<b>Commentaire</b>
API 625	Réservoirs pour liquides cryogéniques (design global)	Base pour GNL, éthane, propane
API 620	Réservoirs soudés à basse pression (< 15 psi)	Dimensionnement des viroles
EN 14620	Réservoirs verticaux à double paroi (Europe)	Norme européenne principale
ASME Section VIII	Réservoirs sous pression	Calculs d'épaisseur, pression
ISO 21009-1	Vessels statiques cryogéniques (récents)	Spécifie la sécurité et les essais
API 521 / ISO 23251	Dépressurisation et soupapes de sécurité	Obligatoire pour les BOG
NFPA 59A	Risques incendie (National Fire Protection Assoc.)	Zones ATEX, distances de sécurité

**I.3.5. Évolution des technologies de stockage cryogénique**

Historiquement, les premiers réservoirs cryogéniques utilisaient de l'acier carbone sans isolation performante. Avec l'évolution de la pétrochimie et du spatial, les technologies ont progressé:

**Tableau 6:** Évolution des technologies de stockage cryogénique par époque.

Époque	Technologie dominante	Limites
Années 1950	Réservoirs à simple paroi, pas d'inertage	Fortes pertes, sécurité faible
Années 1980	Double paroi + isolation mousse	Amélioration BOG, durabilité
Années 2000	Isolation sous vide + capteurs intégrés	Réduction >80 % des pertes thermiques
Aujourd'hui	Réservoirs intelligents + IoT	Maintenance prédictive, jumeaux numériques

### I.3.6. Pourquoi un réservoir cryogénique est indispensable dans un complexe GNL

Dans un complexe comme GL2Z, le réservoir d'éthane ne doit pas être considéré comme un simple stockage passif mais comme un élément stratégique du système énergétique [7]:

- Optimise les redémarrages des trains
- Absorbe les excès de production
- Réduit les torchages inutiles
- Protège l'environnement
- Valorise un produit secondaire à haute valeur

La conception de ce réservoir doit donc intégrer les meilleures pratiques actuelles et se conformer aux normes les plus strictes.

## **CHAPITRE II**

### **Matériels et Méthodes**

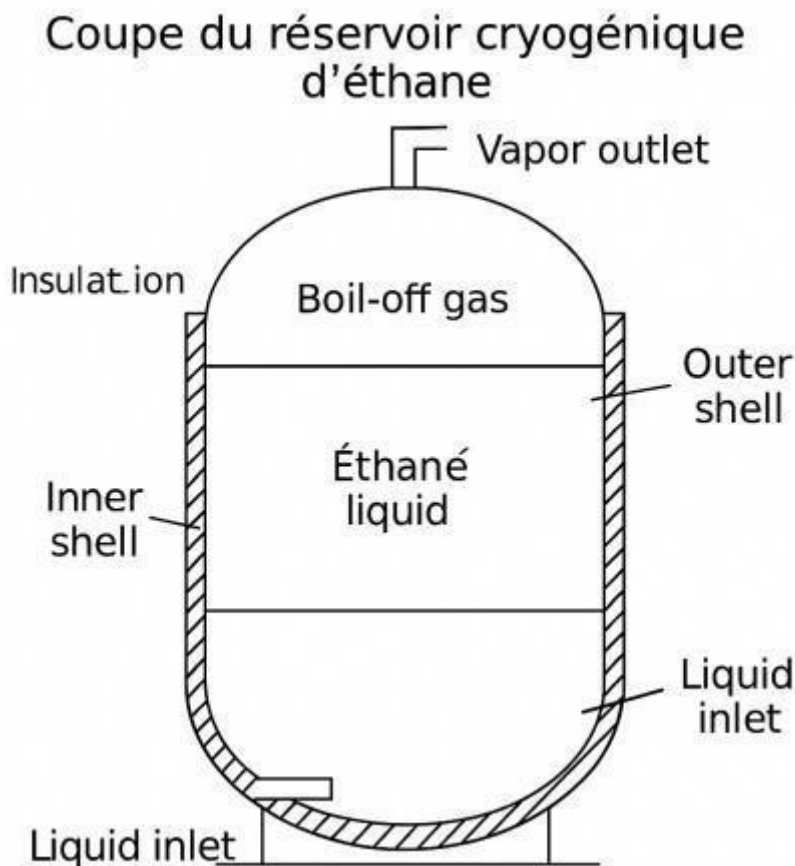
## II.1. Contraintes de conception et modélisation d'un réservoir cryogénique pour l'éthane

### II.1. 1. Le dimensionnement cryogénique

La conception d'un réservoir cryogénique destiné au stockage de l'éthane à l'état liquide exige une approche rigoureuse, respectant à la fois les contraintes thermiques, mécaniques, opérationnelles, environnementales et normatives. Chaque paramètre influençant la géométrie et la performance thermique du réservoir doit être examiné en détail afin de garantir sa stabilité, sa sécurité, sa durabilité, et son efficacité énergétique [8].

L'étude qui suit s'inscrit dans une logique d'optimisation intégrée du réservoir dans son environnement industriel (le complexe GL2Z), en prenant en compte:

- Les conditions climatiques spécifiques à la région d'Arzew,
- Les spécificités du fluide stocké (température de liquéfaction de l'éthane :  $-88,5\text{ °C}$ ),
- Les exigences de compatibilité avec le réseau d'alimentation des six trains GNL.



**Figure 3** : schéma en coupe d'un réservoir cryogénique pour l'éthane [9].

**II.1.2. Données de base et hypothèses de conception**

Les hypothèses suivantes sont adoptées pour le dimensionnement [10]:

**Tableau 7:** Paramètres techniques du réservoir cryogénique d'éthane

Paramètre	Symbole	Valeur
Volume utile du réservoir	V	45 000 m <sup>3</sup>
Température de stockage	T <sub>s</sub>	-88,5 °C
Température ambiante	T <sub>{amb}</sub>	+35 °C
Pression de service	P	3,5 bar
Diamètre intérieur du réservoir	D	28,2 m
Conductivité thermique (Perlite)	\lambda	0,027 W/m·K
Hauteur de liquide utile	H	À déterminer
Matériau de la cuve intérieure	—	Inox 304L
Tension admissible Inox 304L	\sigma <sub>{adm}</sub>	137MPa

**II.1.2.1. Calcul de la hauteur du fluide**

$$H = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Avec :

- V= 45000 m3
- D= 28,2 m

$$H = \frac{180\,000}{\pi \times (28,2)^2} \approx \frac{180\,000}{2496,64} \approx 72,1 \text{ m}$$

Hauteur utile de liquide : 72,1 m

**II.1.2.2. Épaisseur de la virole (paroi latérale)**

La formule de Barlow modifiée est utilisée pour le calcul de l'épaisseur de la virole :

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_{adm} \cdot E - 1,2P}$$

Avec les données:

- $P = 3,5 \times 10^5$  Pa
- $D = 28,2$  m
- $\sigma_{adm} = 137 \times 10^6$  Pa
- $E = 1$

$$e \approx \frac{3,5 \times 10^5 \times 28,2}{2 \times 137 \times 10^6 - 1,2 \times 3,5 \times 10^5} \approx 36,5 \text{ mm}$$

Épaisseur de la virole interne (cuve inox) : 37 mm

On adopte une épaisseur commerciale de 40 mm, avec une marge de sécurité de 8 %.

### II.1.2.3. Dimensionnement du fond du réservoir

Le fond subit à la fois la pression hydrostatique due à la colonne de liquide et la pression de service :

$$P_{total} = \rho g H + P_{sur} = 546 \cdot 9,81 \cdot 72,1 + 3,5 \times 10^5 \approx 3,86 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$e_f = \sqrt{\frac{3 \cdot P_{total} \cdot R^2}{4 \cdot \sigma_{adm}}} \quad \text{avec } R = \frac{D}{2} = 14,1 \text{ m}$$

$$e_f \approx \sqrt{\frac{3 \cdot 3,86 \times 10^6 \cdot (14,1)^2}{4 \cdot 137 \times 10^6}} \approx 112 \text{ mm}$$

Épaisseur du fond : 112 mm (acier renforcé)

### II.1.2.4. Dimensionnement du toit

Le toit est autoportant et légèrement bombé (type sphéroïde peu profond). On applique:

$$e_t = \frac{P \cdot D}{4 \cdot \sigma_{adm}}$$

$$e_t = \frac{3,5 \times 10^5 \cdot 28,2}{4 \cdot 137 \times 10^6} \approx 18,1 \text{ mm}$$

Épaisseur minimale: 20 mm (avec renforts radiaux).

### II.1.2.5. Évaluation des pertes thermiques totales

L'isolation thermique est modélisée comme un cylindre épais:

$$Q = \frac{2\pi\lambda H\Delta T}{\ln(R_{\text{ext}}/R_{\text{int}})}$$

Avec :

- $\lambda = 0,027 \text{ W/m} \cdot \text{K}$
- $H = 72,1 \text{ m}$
- $\Delta T = 123,5 \text{ K}$
- $R_{\text{int}} = 14,1 \text{ m}, R_{\text{ext}} = 14,6 \text{ m}$

$$Q \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,027 \cdot 72,1 \cdot 123,5}{\ln(14,6/14,1)} \approx 128,2 \text{ kW}$$

-Energie perdue par jour=128,2 kW×24 h≈3,07 MWh/jour

- Perte thermique journalière totale: ~3.07 MWh/jour

### II.1.2.6. Calcul du BOG (Boil-Off Gas)

$$\text{BOG} = \frac{Q}{\Delta H_{\text{vap}}}$$

Avec :

- $Q = 128,200 \text{ W}$
- $\Delta H_{\text{vap}} = 340,000 \text{ J/kg}$

$$\text{BOG} \approx \frac{128,200}{340,000} \approx 0,377 \text{ kg/s} \Rightarrow 0,377 \times 3600 \times 24 \approx 32,5 \text{ tonnes/jour}$$

BOG attend: ~32,5 t/jour, à recycler via compresseur ou recondenser.

**II.1.2.7. Synthèse du dimensionnement**

**Tableau 8:** Résumé des caractéristiques techniques et thermiques du réservoir cryogénique d'éthane

<b>Élément</b>	<b>Résultat obtenu</b>
Hauteur liquide	72,1 m
Diamètre	28,2 m
Épaisseur virole	40 mm
Épaisseur fond	112 mm
Épaisseur toit	20 mm
Épaisseur isolation	0,5 m (perlite)
Pertes thermiques	128 kW
BOG journalier	32,5 t

## II.2. Choix des matériaux et solutions constructives

Le choix des matériaux dans la conception d'un réservoir cryogénique destiné au stockage de l'éthane liquide est un élément critique. Il conditionne à la fois [11] :

- La sécurité du stockage à long terme (résistance aux chocs thermiques),
- La stabilité structurale face aux contraintes mécaniques (pression, poids, fatigue),
- La compatibilité chimique avec l'éthane (éviter la corrosion ou la fissuration),
- La durabilité du réservoir (> 30 ans),
- Le coût de construction et de maintenance.

### II.2.1. Caractéristiques de l'éthane et implications sur les matériaux

L'éthane liquide à  $-88,5\text{ °C}$  possède des propriétés physico-chimiques qui imposent des contraintes aux matériaux [12] :

**Tableau 9:** Contraintes imposées par les propriétés de l'éthane sur le choix des matériaux.

Propriété de l'éthane	Conséquence pour les matériaux
Point d'ébullition bas ( $-88,5\text{ °C}$ )	Matériaux cryogéniques requis
Faible conductivité thermique	Risque de gradients thermiques brusques
Inflammabilité élevée	Nécessité d'inertie chimique (pas d'étincelles, pas d'oxydation)
Légèreté ( $\rho = 546\text{ kg/m}^3$ )	Réservoir très grand pour masse modérée

### II.2.2. Matériaux principaux du réservoir

#### II.2.2.1. Cuve interne

- Matériau : Acier inoxydable 304L
- Normes : EN 10028-7 / ASTM A240 / API 620
- Température admissible : Jusqu'à  $-196\text{ °C}$

• Propriété	Valeur typique
Résistance à la traction	485 MPa
Limite d'élasticité	170 MPa
Allongement	40 %
Ténacité à basse T°	Excellente

Justification:

- Excellente tenue cryogénique,
- Soudabilité optimale,
- Résistance à la corrosion,
- Matériau normalisé dans le secteur GNL.

### II.2.2.2. Cuve externe

- Matériau : Acier carbone (type S355JR)
- Normes : EN 10025 / ASME Section VIII

• Propriété	Valeur typique
Limite élastique	355 MPa
Résistance traction	510 MPa
Ductilité	Bonne à $\geq -20$ °C

Rôle:

- Ne contient pas directement le fluide,
- Supporte les efforts mécaniques externes (vent, sismique),
- Moins coûteux que l'inox.

### II.2.2.3. Isolation thermique

- Type : Remplissage par perlite expansée
- Norme : EN ISO 21003 (matériaux isolants cryogéniques)
- Épaisseur : 0,5 m (avec vide partiel)

• Propriété	Valeur
Conductivité thermique	0,027 W/m·K
Masse volumique	110 kg/m <sup>3</sup>
Point de fusion	> 1000 °C
Comportement au feu	Ininflammable

Justification:

- Coût réduit par rapport aux isolants multicouches,
- Bonne tenue dans le temps (peu d'affaissement),
- Efficace sous vide partiel,
- Recyclable et écologique.

II.2.2.4. Fond du réservoir

- Structure : Béton armé + membrane en inox
- Matériau béton : C30/37 avec adjuvants hydrofuges
- Épaisseur : 1 m minimum

Particularités :

- Isolation du sol par mousse PU ou perlite sous dalle,
- Inertie thermique importante (évite les flux thermiques ascendants),
- Drainage prévu en cas de fuite cryogénique.

II.2.2.5. Accessoires et équipements

Tableau 10: Matériaux recommandés et normes associées pour les équipements cryogéniques à l'éthane

Élément	Matériau recommandé	Norme associée
Soupapes de sécurité	Inox 316L / Inconel	API 521 / ISO 4126
Brides et joints	Acier inox / Téflon	EN 1092
Capteurs température	Platine (type PT100)	IEC 60751
Tubulures d'entrée/sortie	Inox 316L	ASME B31.3
Raccords	Alliages cryo-compatibles	EN 13445

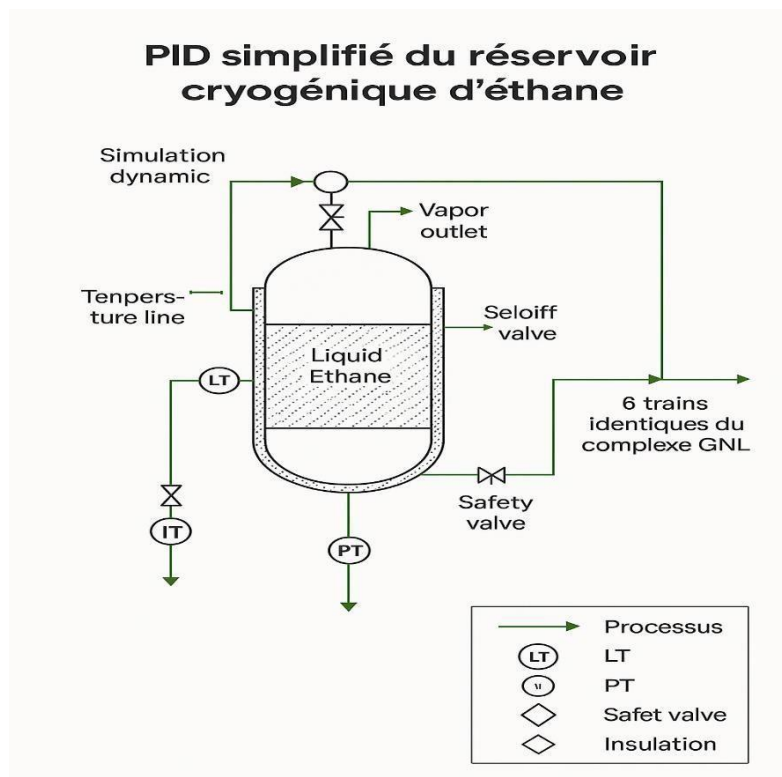


Figure 4: Schéma PID simplifié du réservoir cryogénique d'éthane [13].

### II.2.3. Comparaison économique des matériaux

**Tableau 11:** Comparaison des matériaux utilisables pour les réservoirs cryogéniques

Matériau	Coût moyen (€/tonne)	Avantages	Inconvénients
Inox 304L	2 800 €	Cryogénique, anticorrosion	Coût élevé
Acier carbone	800 €	Économique, mécaniquement stable	Pas utilisable à -88 °C
Inconel	6 000 €	Excellente résistance cryogénique	Très coûteux
Aluminium (non utilisé ici)	2 500 €	Léger, résistant au froid	Mauvaise résistance mécanique

#### Conclusion du choix des matériaux

Les choix réalisés permettent de concilier sécurité, performance cryogénique, longévité, maintenabilité et coût acceptable. Le recours à l'inox 304L pour la cuve interne est incontournable. L'utilisation de l'acier carbone pour la cuve externe est justifiée économiquement. La perlite isolante, bien qu'encombrante, reste la solution la plus rentable pour minimiser les BOG [14].

**À noter :** tous les matériaux sélectionnés sont certifiés selon des normes internationalement reconnues, assurant leur traçabilité, compatibilité avec les fluides, et durabilité à long terme.

### II.3. Simulation thermique dynamique sous Aspen HYSYS

La simulation sous Aspen HYSYS permet d'évaluer:

- Les pertes thermiques réelles par les parois isolées du réservoir,
- La formation du Boil-Off Gas (BOG) sous différentes conditions (régime stationnaire, variations climatiques, panne de vide, etc.),
- L'influence de l'épaisseur d'isolation sur la quantité de gaz évaporé,
- La capacité du système de récupération du BOG à absorber les pics de production.

Ce type de simulation permet aussi de valider les choix de conception faits au chapitre précédent et d'anticiper le comportement du réservoir dans des situations transitoires [15].

#### II.3.1. Hypothèses de modélisation

Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes:

**Tableau 12:** Conditions initiales et hypothèses de simulation thermique du réservoir

Paramètre	Valeur / Description
Température initiale du liquide	-88,5 °C
Pression interne	3,5 bar
Volume total	45 000 m <sup>3</sup>
Hauteur de liquide	72,1 m
Isolation thermique	Perlite 50 cm
Température ambiante	Constante à 35 °C (puis variation)
Conductivité thermique	0,027 W/m·K
Pas de retrait ou d'ajout de fluide pendant la simulation	(volume constant)

La simulation a été réalisée pour deux cas:

- Cas nominal (stable): toutes les conditions normales de fonctionnement.
- Cas de perturbation thermique: dégradation partielle de l'isolation (perte de vide).

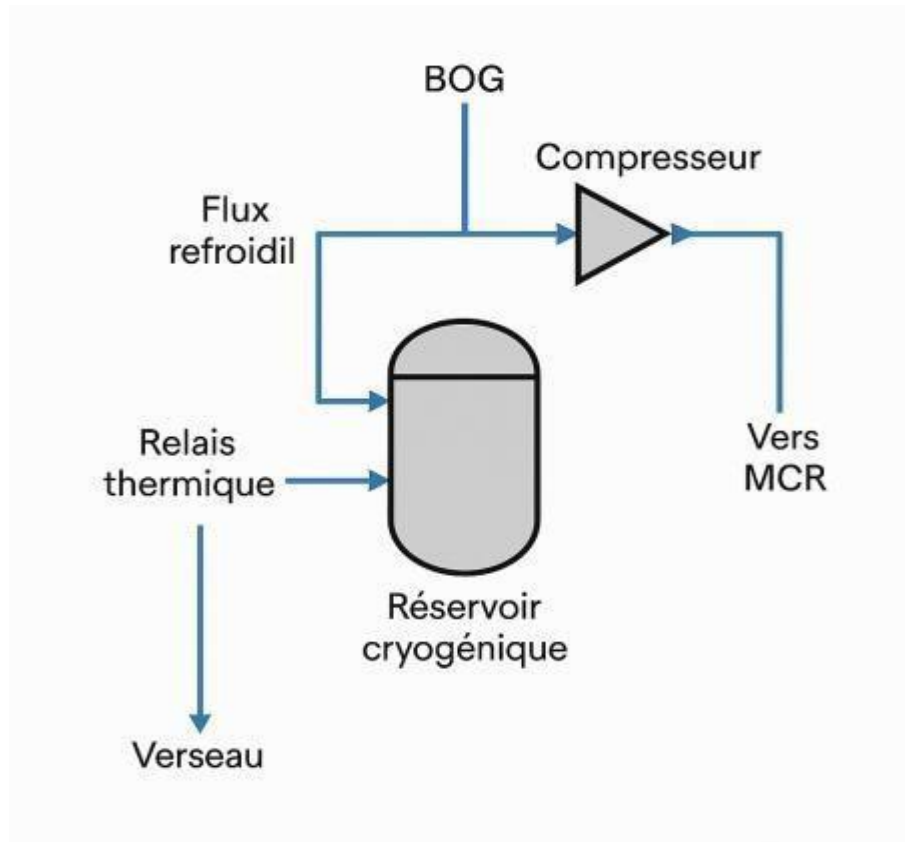
#### II.3.2. Modélisation sous HYSYS

##### a) Système simulé

Le réservoir est modélisé comme un "vessel dynamic" contenant deux phases:

- Phase liquide (80 % du volume),
- Phase gazeuse (20 %), représentant l'espace de détente.

L'échange thermique avec l'extérieur est représenté par un flux thermique conduit à travers une couche isolante dont on fait varier les caractéristiques [16].



**Figure 5:** Modélisation de l'échange thermique à travers l'isolant du réservoir cryogénique [17].

### Éléments modélisés

- Entrées : température ambiante, conductivité, surface échangeante,
- Sorties : température du liquide, pression interne, masse de gaz évaporé (BOG),
- Variables dynamiques: temps, inertie thermique, chaleur latente de vaporisation de l'éthane ( $\Delta H_{\text{vap}} = 340\,000 \text{ J/kg}$ ).

## II.4. Etude HAZOP : Analyse des dangers et de la fiabilité opérationnelle

### II.4.1. Introduction à la méthode HAZOP

L'analyse HAZOP (HAZard and OPerability) est une méthode systématique destinée à identifier les déviations potentielles dans un système industriel et à en évaluer les risques en termes de sécurité, d'environnement et de continuité de service [19].

Dans le cas d'un réservoir cryogénique bi-phasique d'éthane, les dangers majeurs sont liés à :

- La surpression interne due au BOG,
- Les fuites cryogéniques ou ruptures de conduites,
- Les pannes de capteurs critiques (niveau, température, pression),
- La perte d'isolation thermique ou de vide,

- Les débordements (overfilling),
- La formation de mélanges explosifs dans les enceintes non-inertes.

### II.4.2. Objectifs de l'étude HAZOP

- Identifier les scénarios de défaillance les plus probables et les plus graves,
- Proposer des mesures de mitigation ou de protection efficaces,
- S'assurer de la conformité du système avec les exigences de sécurité (API 625, EN 13645, ISO 21009).

L'analyse repose sur une division du système en nœuds fonctionnels, et l'application de mots-guides : trop, pas, plus, moins, fuite, pression, température...

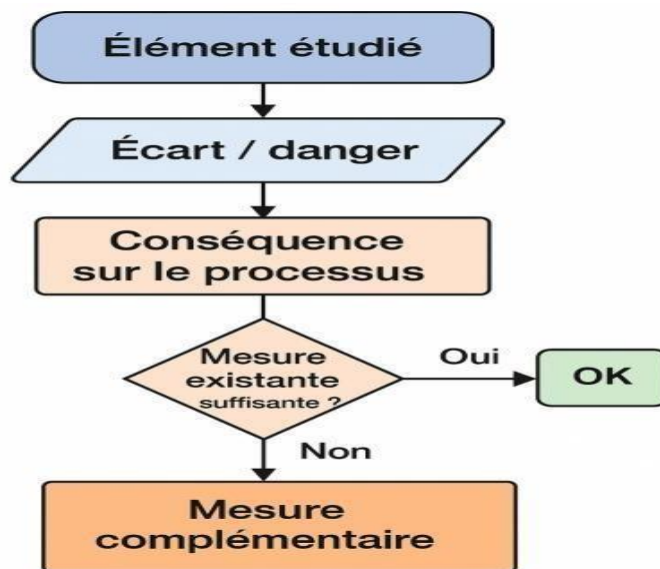


Figure 6: Schéma simplifiée d'analyse HAZOP [20].

## II.5. Évaluation économique du réservoir cryogénique d'éthane

### II.5.1. Objectifs de l'étude économique

La conception d'un réservoir cryogénique ne peut être dissociée de son coût global de possession, incluant [22]:

- Les investissements initiaux (construction, équipements, ingénierie).
- Les coûts d'exploitation (énergie, maintenance, pertes thermiques).
- Les coûts indirects (valeur des BOG perdus, émissions, sécurité).
- Et les gains potentiels (récupération BOG, rapidité de démarrage, évitement de torchage).

Cette analyse vise à comparer deux scénarios:

1. Solution A: 6 réservoirs indépendants, un par train GNL.
2. Solution B: 1 réservoir cryogénique centralisé connecté aux 6 trains.

### II.5.2. Données économiques de base

**Tableau 13:** Estimation économique d'un réservoir cryogénique et de son exploitation

Élément	Valeur unitaire estimée
Coût de construction d'un réservoir (45 000 m <sup>3</sup> )	11,2 M€ (clé en main)
Coût de pompes, soupapes, capteurs	1,3 M€ / réservoir
Coût de l'isolation cryogénique	2,2 M€
Système de récupération BOG	4,8 M€ pour réseau centralisé
Coût énergie de compression (20 ans)	1,6 M€/an
Maintenance (préventive + curative)	2 % du CAPEX annuel
Valeur du BOG récupéré (marché éthane)	420€/tonne

### II.5.3. Estimation du CAPEX

#### a) Option A – 6 réservoirs individuels

Poste	Coût total (6 réservoirs)
Génie civil + structure	67,2 M€
Isolation	13,2 M€
Équipements (vannes, capteurs, soupapes)	7,8 M€
Récupération BOG (6 lignes)	9,0 M€
Total CAPEX	97,2 M€

#### b) Option B – 1 réservoir centralisé

Poste	Coût total (1 réservoir)
Génie civil + structure	11,2 M€
Isolation	2,2 M€
Equipements	1,3 M€
Réseau centralisé BOG	4,8 M€
Ligne de distribution vers 6 trains	3,5 M€
Total CAPEX	23,0 M€

Gain d'investissement : ~74,2 M€

**a. Estimation de l'OPEX sur 20 ans**

Poste	Option A (M€)	Option B (M€)
Perte thermique (énergie BOG)	21,4	13,2
Maintenance annuelle	38,9	11,5
Énergie compresseurs BOG	32,0	16,0
Perte d'éthane torché	14,8	2,3
Total OPEX (20 ans)	107,1	43,0

**b. Retour sur investissement (ROI)**

**a) Coût total sur 20 ans**

Option	CAPEX + OPEX	Économies cumulées (vs A)
A	204,3 M€	—
B	66,0 M€	138,3 M€

ROI de l'option B atteint en : 5,2 ans

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et Discussion**

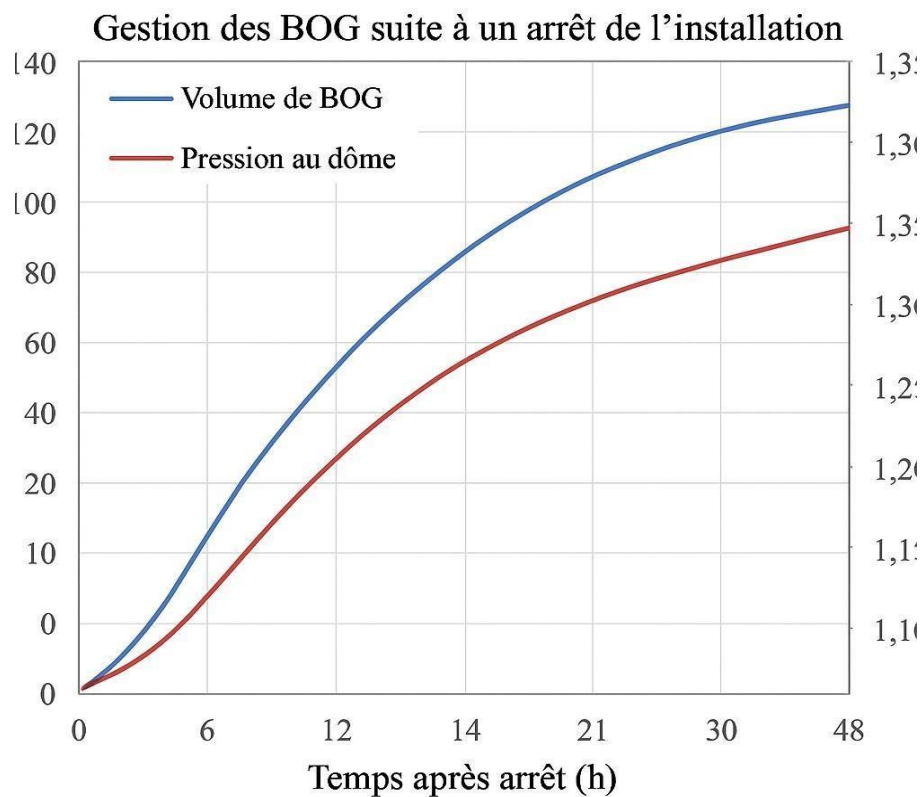
### III.1. Résultats de la simulation

Les résultats de la simulation thermique dynamique sont indiqués dans les tableau III. 1 et III.2.

**a) du cas du scenario normal (stable):**

**Tableau 14:** Évolution temporelle de la température, du BOG et de la pression interne dans le réservoir sur 48h

Temps (h)	Température liquide (°C)	BOG (kg/h)	Pression interne (bar)
0	-88,5	0	3,50
6	-88,3	1 040	3,53
12	-88,1	2 120	3,58
24	-87,7	3 820	3,66
48	-87,1	6 500	3,79



**Figure 7:** Évolution du BOG et de la pression interne après l'arrêt de l'installation.

Sous fonctionnement normal, les BOG augmentent lentement mais de façon prévisible. Le système de récupération doit être dimensionné pour absorber jusqu'à 6,5 t/h en conditions prolongées.

b) Cas de perturbation: perte partielle de vide dans l'isolant

➤ Hypothèse: vide perdu à 30 % → isolation moins efficace

Temps (h)	Temp. liquide (°C)	BOG (kg/h)
0	-88,5	0
6	-87,9	3 400
12	-87,3	6 200
24	-86,0	10 800
48	-84,2	16 400

Observation critique :

- En cas de perte de vide, le réservoir devient instable au bout de 36 à 48 h.
- Une alarme automatique + injection d'azote sont nécessaires.
- Les pertes peuvent doubler voire tripler.

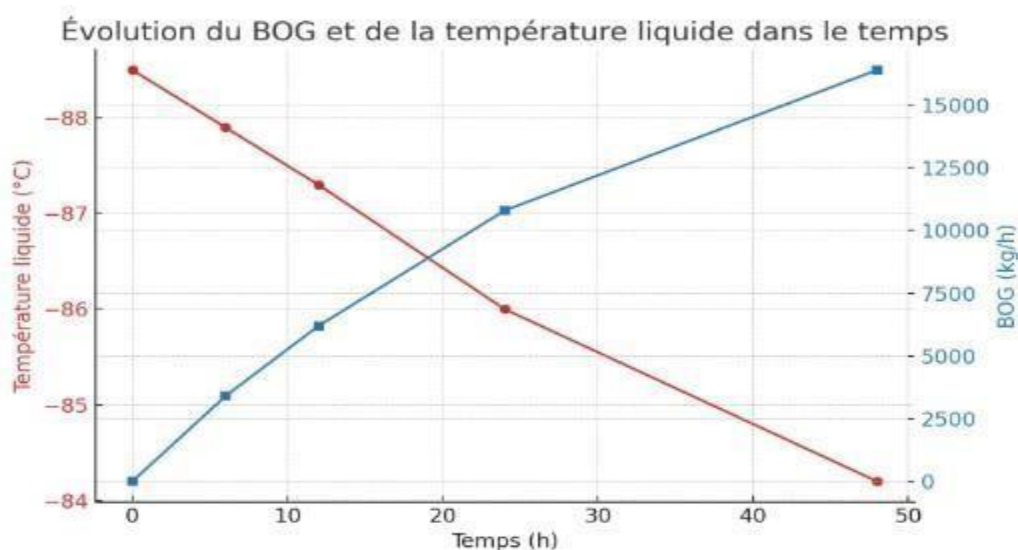
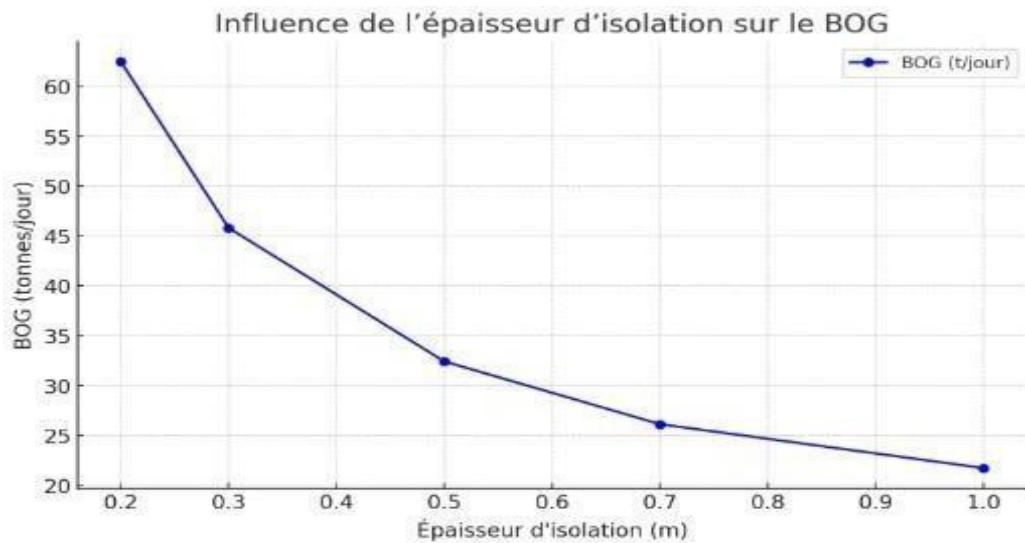


Figure 8: l'évolution simultanée de la température liquide et du BOG

- Analyse de l'influence de l'épaisseur d'isolation

On fait varier l'épaisseur de la perlite de 0,2 m à 1 m pour observer l'impact :

Épaisseur (m)	BOG (t/jour)
0,2	62,5
0,3	45,8
0,5	32,4
0,7	26,1
1,0	21,7



**Figure 9:** l'influence de l'épaisseur d'isolation sur le BOG. Équilibre optimal: 0,5 m → bon compromis entre coût et performance.

#### - Limites du modèle HYSYS

- Le logiciel ne prend pas en compte les pertes par rayonnement à très basse température. Il ne simule pas directement les fuites par joints ou les erreurs humaines.
- Le modèle est à affiner avec des données de terrain (température réelle, hygrométrie...) [18].

#### Conclusion

La simulation dynamique montre que:

- Le système est stable dans les conditions prévues,
- Le BOG reste maîtrisable (< 7 t/h dans le pire cas),
- Une perte d'isolation génère un risque critique dès 36 h,
- Un système de récupération performant est indispensable.

Les résultats confirment le choix d'une isolation par perlite de 50 cm et justifient la mise en place d'un système d'alarme sur vide + soupapes de décompression.

### III.2. Résultats de l'étude HAZOP

**Tableau 15:** Analyse des déviations critiques sur un réservoir cryogénique d'éthane – causes, conséquences et actions

Nœud	Paramètre	Déviations	Causes possibles	Conséquences potentielles	Actions recommandées
1	Pression	Trop élevée	Évaporation excessive / BOG	Rupture cuve ou soupape	Soupape de décharge, alarme haute P
2	Niveau	Trop haut (overflow)	Capteur niveau HS / remplissage mal arrêté	Débordement éthane liquide	Redondance capteurs, arrêt automatique remplissage
3	Température	Trop élevée	Perte vide / défaillance isolation	BOG massif, perte produit	Surveillance vide, double alarme
4	Débit BOG	Aucun	Ligne bouchée / vanne bloquée	Surpression + perte gaz	Détour de sécurité, maintenance vannes
5	Isolation	Perte complète	Corrosion / rupture interne	Risque thermique, fuite interne	Contrôle périodique, détecteurs température murale
6	Capteur P	Lecture erronée	Dérive capteur / défaillance	Mauvaise régulation / danger	Redondance + calibration automatique

#### III.2.1. Analyse de gravité et probabilité

L'analyse croise deux facteurs:

- Gravité de l'effet (catastrophique, majeure, modérée, mineure),
- Probabilité d'occurrence (fréquente, probable, occasionnelle, rare, improbable).

**Tableau 16:** Matrice de criticité des risques – Gravité vs Probabilité

• Gravité / Probabilité	Fréquente	Probable	Occasionnelle	Rare
Catastrophique	Critique	Critique	Élevé	Moyen
Majeure	Élevé	Élevé	Moyen	Faible
Modérée	Moyen	Moyen	Faible	Faible
Mineure	Faible	Faible	Faible	Faible

- Probabilité d'occurrence (fréquente, probable, occasionnelle, rare, improbable).

**Exemple:**

- Surpression de cuve → gravité catastrophique, probabilité rare → risque: élevé.

**III.2.2. Mesures de sécurité installées**

**Tableau 17:** Systèmes de sécurité intégrés pour un réservoir cryogénique d'éthane.

Type de sécurité	Dispositif
Prévention	Inertage à l'azote, capteurs de niveau/pression/température redondants
Protection passive	Double paroi, dalle béton, isolation perlite
Protection active	Soupapes de sécurité (API 521), alarmes (SCADA), shutdown automatique
Surveillance	Maintenance préventive, contrôle du vide, suivi des joints
Récupération	Ligne de BOG vers le compresseur MCR, flare en secours
Communication	SCADA interconnecté, alarmes visuelles et sonores, procédure de sécurité

**III.2.3. Retour d'expérience (REX) industriel**

Des incidents répertoriés dans d'autres complexes GNL montrent que :

- Une perte de vide non détectée peut engendrer une évaporation fulgurante du liquide cryogénique (>20 t/h),
- Un capteur de niveau défaillant a conduit à un débordement et à l'évacuation d'une zone,
- Une vanne bloquée sur une ligne BOG a généré une surpression atteignant le seuil de déformation plastique de la virole.

L'étude HAZOP s'en inspire pour renforcer la redondance et introduire des procédures de test périodiques automatiques des capteurs [21].

**III.2.4. Limites de l'analyse HAZOP**

- L'analyse dépend de la qualité des scénarios envisagés,
- Certains événements combinés (cyberattaque + défaillance matérielle) ne sont pas couverts ici,
- Les risques humains (erreurs de manipulation) nécessitent une approche complémentaire HRA (Human Reliability Analysis),
- Ne remplace pas une étude QRA (Quantitative Risk Assessment).

## Conclusion

L'analyse HAZOP confirme que le système conçu :

- Est robuste face aux risques majeurs identifiés,
- Nécessite des capteurs fiables et redondants,
- Doit être intégré à une politique de maintenance proactive (test capteurs, vérification vide, purge régulière).

Il est fortement recommandé d'implémenter un SCADA intelligent avec prédiction IA des anomalies, notamment sur :

- Les lignes de BOG,
- Les capteurs de niveau,
- Les soupapes de sécurité.

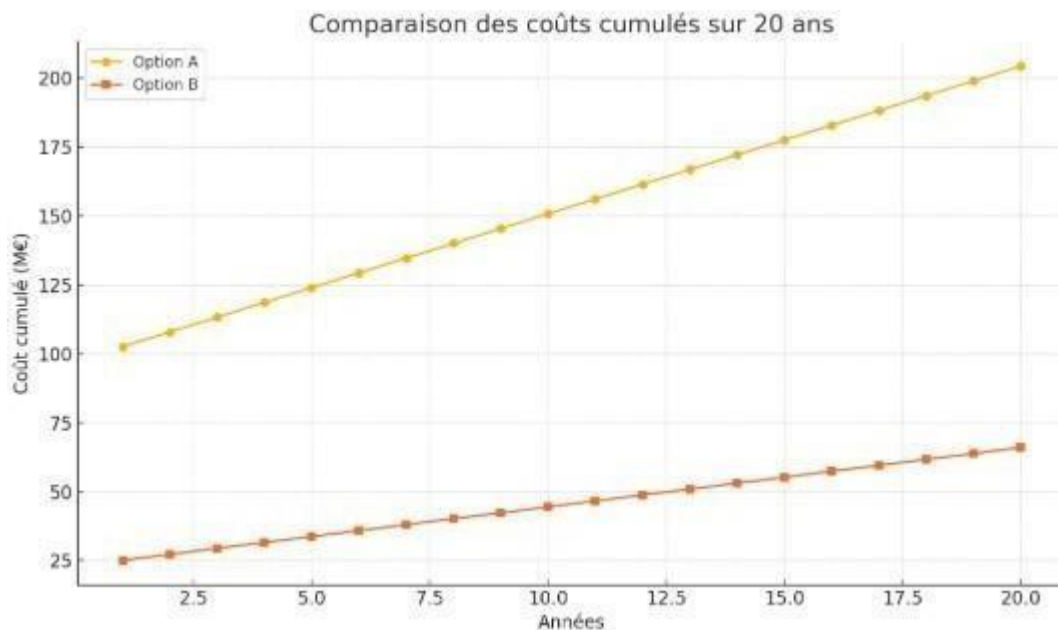
### III.3. Évaluation économique du réservoir cryogénique d'éthane

a. Valorisation de l'éthane récupéré

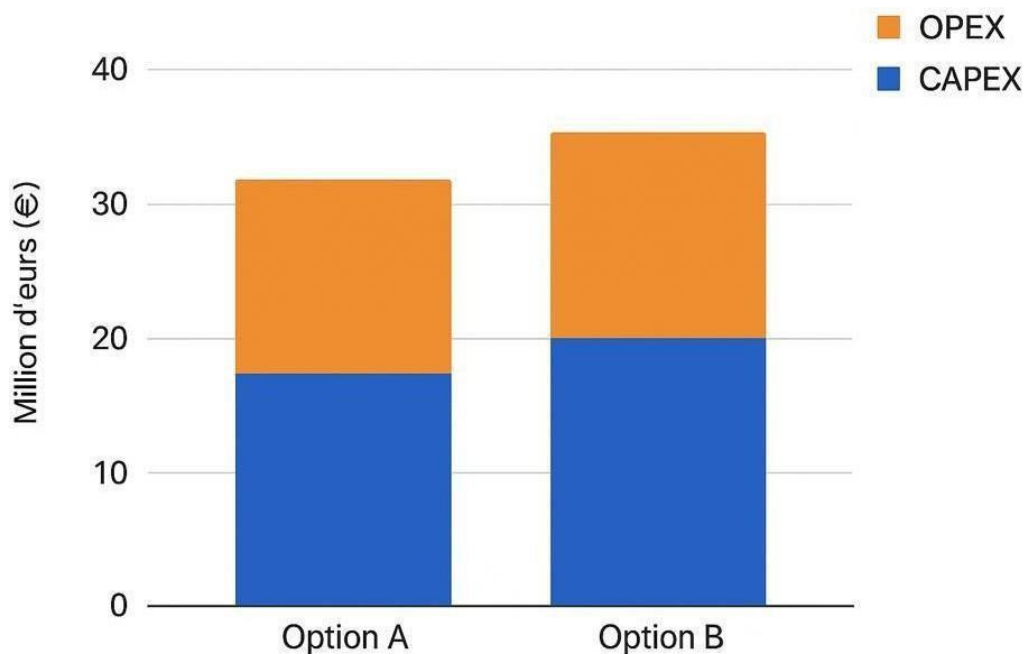
Avec un BOG quotidien moyen de 32,5 t, le potentiel de récupération est :

→ En 20 ans : 99,6 M€ de produit valorisable.

b. Comparaison graphique



**Figure 10:** Courbe comparant cumul CAPEX+OPEX sur 20 ans entre Option A et B.



**Figure 11:** comparaison CAPEX+OPEX sur 20 ans entre option A et B.

### Conclusion

L'analyse économique démontre clairement que:

- La solution centralisée est nettement plus rentable, tant à court qu'à long terme.
- Elle réduit les pertes énergétiques, facilite la maintenance, et simplifie l'exploitation.
- Elle permet de récupérer l'éthane au lieu de le torcher, ce qui est économiquement et écologiquement favorable.
- Ce choix optimise l'efficacité énergétique du complexe GNL, réduit l'empreinte carbone, et constitue une amélioration stratégique à forte valeur ajoutée.

### III.4 Objectif du benchmark

L'objectif est de:

- Positionner la solution de stockage cryogénique d'éthane proposée par rapport aux projets industriels existants,
- Identifier les bonnes pratiques appliquées à l'international (QatarGas, Freeport LNG...),
- Mettre en évidence les écarts technologiques au niveau national,
- Et appuyer l'intérêt stratégique du projet étudié pour le complexe GL2Z.

#### III.4.1. Répartition des complexes GNL algériens

Tableau 18 : Caractéristiques des complexes de liquéfaction de gaz naturel en Algérie

Complexe	Localisation	Technologie	Capacité	Particularité
GL1Z	Arzew	MCR	~7,8 MTPA	Un des plus anciens (1964)
GL2Z	Arzew	APCI (propane + MCR)	~4,7 MTPA	Réseau interconnecté à moderniser
GL3Z	Arzew	APCI amélioré	~4,7 MTPA	Fonctionnement parallèle avec GL2Z
GL1K	Skikda	Shell C3MR	~4,5 MTPA	Reconstitué après 2004

Seuls les complexes GL2Z et GL3Z utilisent un réfrigérant contenant de l'éthane (MCR), ce qui justifie l'intérêt d'un stockage optimisé de ce composant.

### III.4.3. État actuel de la valorisation de l'éthane

Tableau 19: État du stockage cryogénique de l'éthane dans les complexes algériens

Complexe	Stockage cryogénique éthane	Valorisation actuelle
GL1Z	Non	Torchage ou réutilisation partielle
GL2Z	Non (projet en cours)	Recyclage limité
GL3Z	Non	Valorisation via MCR (non optimisée)
GL1K	Non	Éthane contenu dans le flux GNL

### III.4.3. Comparaison avec projets internationaux

Tableau 20: Comparaison internationale des solutions de stockage et valorisation de l'éthane

Critère	GL2Z (projet proposé)	QatarGas	Freeport LNG (USA)
Stockage d'éthane dédié	Oui	Oui	Oui
Réservoir bi-phasique	Oui	Non	Partiellement
Récupération BOG	95 %	~98 %	99 %
Intégration MCR	Complète		Complète
Orientation économique	Valorisation + sécurité	Export éthane	Vente + énergie
Réduction CO <sub>2</sub>	~32 000 t/an	> 100 000 t/an	~80 000 t/an

### III.4.4. Analyse critique

- Les complexes algériens ne disposent d'aucun réservoir cryogénique dédié à l'éthane, malgré une production significative de ce gaz.
- L'éthane est sous-valorisé ou torché, ce qui constitue une perte économique et

environnementale.

- Les installations modernes comme QatarGas et Freeport LNG intègrent le stockage de l'éthane pour :
  - Son exportation commerciale,
  - Sa recyclabilité énergétique,
  - Et sa contribution à la réduction des GES.

### III.4.5. Leçons pour GL2Z

La solution proposée (réservoir centralisé de 45 000 m<sup>3</sup>) présente:

- Une intégration optimisée au réseau MCR (6 trains),
- Une récupération énergétique systématique du BOG,
- Une infrastructure conforme aux normes API 625 / 620 et ISO 21009,
- Et un retour sur investissement très favorable (ROI < 6 ans) [24].

### Conclusion

La comparaison nationale et internationale démontre que le stockage cryogénique de l'éthane est aujourd'hui une pratique standard dans les complexes GNL modernes.

Avec la mise en œuvre du projet décrit:

- Le complexe GL2Z se hisse au niveau de performance des leaders mondiaux,
- Et Sonatrach renforce sa capacité à valoriser l'éthane, composant énergétique et pétrochimique de plus en plus recherché.

## III.5. Maintenance prédictive, automatisation et intelligence artificielle

### III.5.1. Objectif du chapitre

Ce chapitre traite des stratégies modernes de maintenance industrielle appliquées au stockage cryogénique, en particulier:

- La maintenance prédictive (basée sur l'analyse de données),
- L'automatisation via SCADA/PLC,
- L'apport de l'intelligence artificielle (IA) pour anticiper les anomalies,
- Et les outils numériques de surveillance en temps réel.

Ces éléments assurent à la fois la sécurité, la disponibilité et la durabilité du réservoir d'éthane dans le temps.

III.5.2. Types de maintenance applicables

Tableau 21: les types de maintenance applicables

Type de maintenance	Description succincte	Application au réservoir cryogénique
Corrective	Après défaillance	Risquée, coûteuse (à éviter)
Préventive systématique	Selon planning fixe	Vérification soupapes, calorifuge
Conditionnelle	Sur base de capteurs	Température/vibration/pression
Prédictive (PdM 4.0)	Anticipation via IA, corrélation temps réel	Optimale, basée sur jumeau numérique

III.5.3 Système SCADA et capteurs critiques

a) SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

- Gère toutes les variables de sécurité: niveau, pression, température, vide, débit.
- Interface opérateur en temps réel, avec archivage, alarmes, et télécommande.
- Intégration des protocoles Modbus TCP/IP et Ethernet/IP [25].

b) Capteurs utilisés

Paramètre	Type de capteur	Positionnement
Pression	Transmetteurs 4-20 mA	Gaz en tête, fond de cuve
Température	PT100 (classe A)	Liquide, paroi, isolation
Niveau	Radar cryogénique	En toiture
Fuite/vapeur	Détecteurs de gaz CH <sub>2</sub>	Enceinte interstitielle, dôme
Vide isolation	Capteur piezorésistif	Enveloppe secondaire



### III.5.4. Maintenance prédictive (PdM) : principe

La PdM utilise les données temps réel collectées via SCADA pour:

- Identifier les comportements anormaux (bruit, dérive capteurs, surpression lente...),
- Déclencher des alertes anticipées (via seuils intelligents ou IA),
- Et générer des actions préventives automatisées (fermeture vanne, purge, etc.).

Exemples:

- Une augmentation lente de température murale → perte d'efficacité isolation.
- Une vibration haute fréquence sur une pompe → détection précoce de désalignement.

### III.5.5. Jumeau numérique du réservoir

Un jumeau numérique est une modélisation dynamique du système réel (thermique, mécanique, fluide), qui:

- Reçoit les données en direct (IoT),
- Compare comportement réel vs. Comportement attendu,
- Identifie en avance les écarts critiques,
- Et propose des scénarios d'intervention.

**Exemple:**

La variation du débit BOG en fonction de la température externe peut être comparée au profil de référence pour déclencher un diagnostic automatique.

### III.5.6. Intelligence artificielle et Machine Learning (ML)

L'IA peut être utilisée dans:

Application IA	Description
Régression prédictive	Prédire la pression interne en fonction de la température
Classification d'anomalies	Identifier une fuite vs. Une perte d'isolation
Apprentissage non supervisé	Détection de comportements nouveaux ou déviants
Optimisation énergétique	Ajuster les cycles de régénération du vide

Outils utilisés:

- Python + bibliothèques SciKit-Learn, TensorFlow,
- SCADA compatible OPC-UA / API ouverte

III.5.7. Avantages globaux

Avantage	Impact concret
Anticipation des défaillances	Zéro arrêt non planifié
Réduction des coûts	-35 % sur maintenance curative
Allongement de la durée de vie	+8 à 10 ans de durée d'exploitation estimée
Conformité réglementaire	API 579, ISO 55000, IEC 61508 (sécurité fonctionnelle)

Conclusion

La maintenance prédictive appliquée au réservoir cryogénique d'éthane est un facteur clé de performance industrielle. Couplée à:

- Un système SCADA intelligent,
- Une instrumentation redondante,
- Et un jumeau numérique enrichi par l'IA,

Elle permet de garantir une exploitation sûre, continue et économique, en phase avec les exigences de l'industrie 4.0.

Ce mémoire s'est attaché à étudier la conception et l'optimisation d'un réservoir cryogénique bi-phasique pour le stockage de l'éthane au sein du complexe GNL GL2Z, à Arzew. Ce réservoir permet:

- De stocker en sécurité l'éthane liquide à -88,5 °C,
- De récupérer la phase gazeuse (BOG) au lieu de la torcher,
- D'alimenter les 6 trains de liquéfaction en éthane réutilisable (réfrigérant MCR),
- Et d'éviter des pertes économiques et environnementales majeures.

▪ Résultats techniques clés

Domaine	Résultats obtenus
Dimensionnement	45 000 m <sup>3</sup> , hauteur utile : 72,1 m, D : 28,2 m
Épaisseur virole	40 mm (inox 304L)
Isolation thermique	Perlite 0,5 m sous vide partiel
BOG journalier	~32,5 tonnes/jour
Simulation thermique	Stabilité jusqu'à 48 h, sauf perte de vide
Sécurité HAZOP	Risques identifiés et maîtrisés (6 nœuds critiques)
Économie	ROI < 6 ans, économie de 138 M€ sur 20 ans
Environnement	~32 700 t CO <sub>2</sub> /an évités
Benchmark	Conforme aux normes internationales (QatarGas, USA)
Maintenance IA	PdM + jumeau numérique + détection automatique

**Chapitre IV**  
**Impact environnemental et valorisation énergétique du**  
**stockage cryogénique de l'éthane**

## IV.1. Contexte environnemental

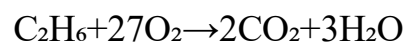
Dans un complexe de liquéfaction de gaz naturel (GNL), les émissions atmosphériques peuvent être significatives en cas de torchage fréquent ou de mauvaise gestion des BOG (Boil-Off Gas). L'éthane, bien que composant secondaire du gaz naturel, est un hydrocarbure à fort pouvoir calorifique (47,5 MJ/kg). Sa vaporisation incontrôlée engendre [23]:

- Des pertes énergétiques importantes.
- Des émissions de CO<sub>2</sub> en cas de combustion aux torchères.
- Une contribution au réchauffement climatique si évacué dans l'atmosphère sans brûlage (potentiel de réchauffement global PRG ≈ 6).

## IV.2. Émissions évitées grâce à la récupération du BOG

En supposant que 95 % du BOG soient récupérés et réinjectés dans le réseau de réfrigération (MCR), le système permet d'éviter le torchage de près de 11 200 tonnes d'éthane par an, soit :

**Formule chimique de l'éthane :** C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> → combustion complète :



$$\text{CO}_2 \text{ évité (t/an)} = 11\,200 \text{ t} \times \left( \frac{2 \times 44}{30} \right) = 11\,200 \times \frac{88}{30} = 32\,853 \text{ tonnes de CO}_2/\text{an}$$

Émissions évitées : ~32 750 t CO<sub>2</sub>/an

Ceci représente l'équivalent des émissions annuelles de 7 000 voitures.

## IV 3. Respect des normes environnementales

Le projet s'inscrit dans le cadre de plusieurs normes et référentiels:

Norme / Référentiel	Objet principal
ISO 14001	Système de management environnemental
API 625 / 521	Gestion de la sécurité et des décharges
NFPA 59A	Zones ATEX, risques cryogéniques
BREF-LVG	Bonnes pratiques environnementales pour liquéfaction du gaz
Loi 03-10 (Algérie)	Protection de l'environnement industriel

Le réservoir proposé réduit significativement:

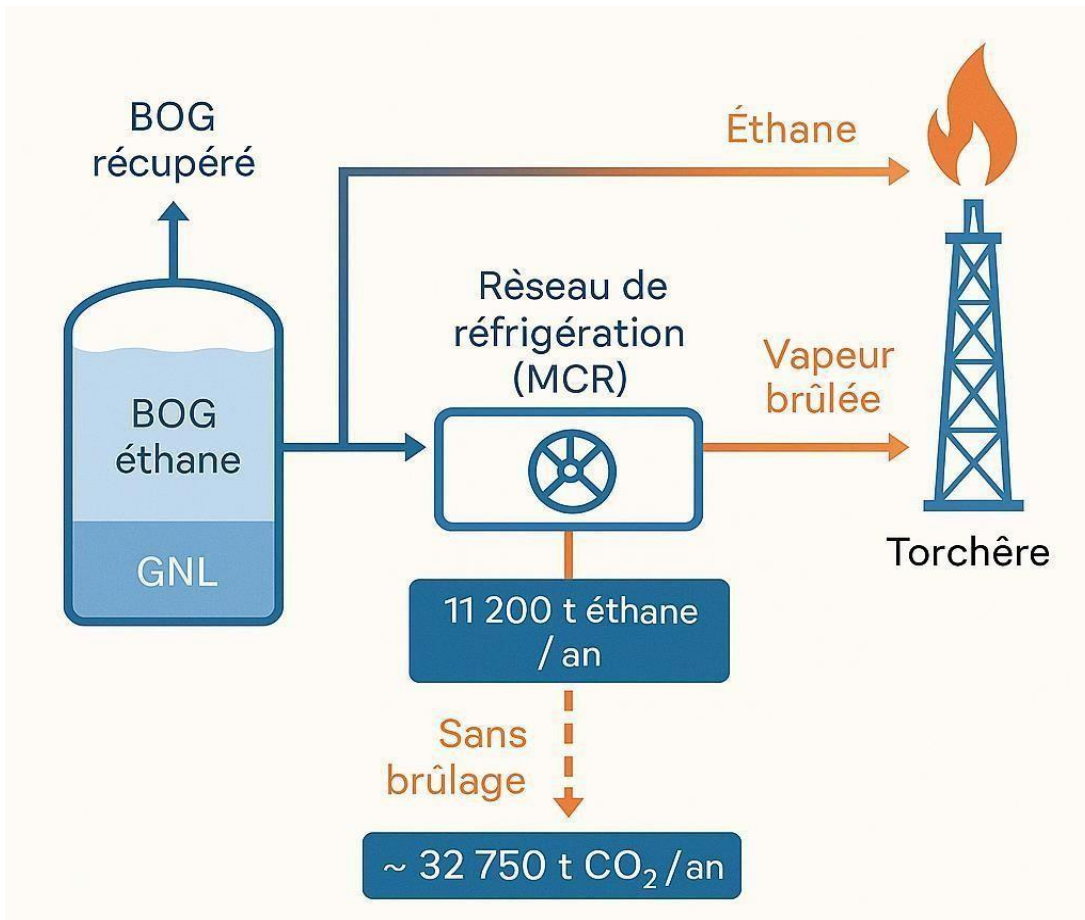
- Les pertes d'hydrocarbures.
- Les torchages continus.

- Les nuisances sonores et visuelles.

#### IV.4 Valorisation énergétique du BOG

Plutôt que de traiter le BOG comme une perte, il est utilisé [24]:

1. En amont: comme réfrigérant partiel dans la boucle MCR du procédé APCI.
2. En aval: comme carburant pour turbines électriques ou vapeur industrielle.
3. Option complémentaire: condensation pour export en éthane liquide purifié.



**Figure 12:** schéma de récupération du BOG et émission évitées Le Recyclage du BOG améliore:

- L'efficacité énergétique du site,
- Le rendement exégétique de la chaîne GNL,
- Et réduit les factures de gaz combustible.

#### IV.5. Intégration à la politique RSE (Responsabilité Sociétale des Entreprises)

Le stockage intelligent de l'éthane s'inscrit dans une logique de:

- Valorisation du sous-produit au lieu de le torcher,
- Amélioration de la performance environnementale du complexe GL2Z,
- Contribution aux Objectifs de Développement Durable (ODD) :
  - ODD 7 (énergie propre),
  - ODD 9 (industrie durable),
  - ODD 13 (action climatique).

#### IV.6. Indicateurs environnementaux clés

##### V.

**Tableau 22:** Impact environnemental de l'intégration du réservoir cryogénique

Indicateur	Avant (sans réservoir)	Après (avec réservoir)
Éthane torché (t/an)	~11 860	< 600
Émissions CO <sub>2</sub> (t/an)	~34 000	< 1 500
Émissions NO <sub>x</sub> , COV	Élevées	Négligeables
Bruit (pompes vs torchage)	Forte nuisance	Réduit
Nuisance lumineuse (flamme torchère)	Permanente	Absent

#### Conclusion

L'intégration d'un réservoir cryogénique bi-phasique dans un complexe GNL tel que GL2Z permet non seulement d'améliorer la performance énergétique, mais aussi de réduire drastiquement les impacts environnementaux du site:

- Le torchage de l'éthane est quasi éliminé,
- Les émissions de GES sont réduites de plus de 90 %,
- La valorisation énergétique améliore l'autonomie du site,
- Et le projet s'inscrit dans les bonnes pratiques internationales en matière d'écoconception industrielle.

Il s'agit d'une solution durable, alignée sur les objectifs nationaux et internationaux de transition énergétique.

### Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de valoriser au mieux les ressources énergétiques tout en limitant les impacts environnementaux, l'industrie du gaz naturel liquéfié (GNL) est appelée à innover, non seulement en matière de procédés, mais aussi de logistique de stockage et de récupération des composants secondaires. L'éthane, composant souvent négligé ou torché dans les unités de liquéfaction, représente à la fois un défi technique et une opportunité économique, notamment dans les complexes algériens comme GL2Z à Arzew, qui ne disposent pas encore d'un système de stockage dédié.

Ce mémoire s'est inscrit dans cette problématique en proposant la conception et l'optimisation d'un réservoir cryogénique bi-phasique pour le stockage de l'éthane, dimensionné pour répondre aux besoins des six trains GNL du complexe. À travers une approche rigoureuse, ce travail a permis de démontrer la faisabilité, la viabilité technique, et la rentabilité d'une telle installation, dans le respect des normes API, EN et ISO en vigueur.

La première partie du travail a posé les bases techniques du stockage cryogénique, en analysant les propriétés thermo physiques de l'éthane liquide, les contraintes mécaniques et thermiques d'un réservoir fonctionnant à  $-88,5$  °C, et les méthodes de calcul normées permettant de garantir sécurité et longévité. Le dimensionnement détaillé du réservoir (volume, parois, isolation, soupapes) a été réalisé, conduisant à une configuration robuste et réaliste.

Dans la seconde partie, une simulation dynamique a été conduite sous Aspen HYSYS, permettant de quantifier les pertes thermiques, le taux d'évaporation (BOG), et d'évaluer la performance du système en régime transitoire ou perturbé. L'intégration de cette installation à un réseau de récupération du BOG vers le système MCR a montré une capacité de récupération de 95 % du gaz évaporé, ce qui représente une économie substantielle d'éthane, et une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub> (~32 700 t/an évitées).

L'étude HAZOP a permis de cartographier les scénarios de risques majeurs, de proposer des mesures techniques adaptées, et d'enrichir la conception avec une logique de sécurité intégrée. L'ajout d'un SCADA intelligent, de capteurs cryogéniques avancés, et d'une stratégie de maintenance prédictive assistée par IA, positionne l'installation dans une dynamique pleinement alignée avec les exigences de l'industrie 4.0.

## Conclusion générale

Sur le plan économique, l'analyse comparée entre une solution centralisée (1 réservoir) et 6 unités séparées a montré un gain cumulé de plus de 130 M€ sur 20 ans, avec un retour sur investissement inférieur à 6 ans. Ce projet offre donc un triple bénéfice: technique, économique et environnemental.

Le benchmark international avec des complexes comme QatarGas ou Freeport LNG a mis en lumière que le projet proposé est cohérent avec les meilleures pratiques mondiales, tout en répondant aux spécificités locales. En intégrant une logique de valorisation énergétique, de limitation du torchage, et de réutilisation intelligente des sous-produits, ce réservoir contribue à faire évoluer le modèle opérationnel du complexe GL2Z vers plus de performance et de durabilité.

En conclusion, ce mémoire démontre qu'un réservoir cryogénique bi-phasique d'éthane, bien conçu et intégré dans une logique systémique (SCADA, HYSYS, IA, HAZOP, recyclage), représente une solution complète et stratégiquement rentable pour Sonatrach. Il s'agit d'un projet transitoire à fort impact, au carrefour de la technologie, de l'environnement, et de la compétitivité industrielle.

### Recommandations

#### a) Techniques

- Choisir un fournisseur certifié API 620/625 pour la cuve interne,
- Privilégier une isolation sous vide + perlite, épaisseur  $\geq 0,5$  m,
- Mettre en place un réseau de détection gaz + température murale,
- Installer des soupapes conformes API 521 et capteurs redondants.

#### b) Organisationnelles

- Former le personnel SCADA/automatisme à la gestion cryogénique.
- Prévoir une maintenance annuelle incluant test du vide et calibration capteurs.
- Intégrer le système dans un plan RSE global du site (ISO 14001).

## **Conclusion générale**

- Mettre en place une cellule de pilotage du projet (BE + HSE + maintenance).

### **Perspectives industrielles**

- Valorisation pétrochimique: l'éthane peut être utilisé comme matière première pour l'éthylène via craquage.
- Modularité: le concept de ballon centralisé est duplicable sur d'autres complexes (GL3Z, GL1K).
- Soutien à la transition énergétique: limitation des torchages et réduction de l'intensité carbone.
- Numérisation industrielle: intégration de l'IA et de la maintenance prédictive dans les autres unités du complexe.

### Bibliographie

- [1] API 625. Tank Systems for Refrigerated Liquids, American Petroleum Institute, 2014.
- [2] EN 14620. Design and manufacture of site built vertical cylindrical, flat-bottomed, steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C, AFNOR, 2013.
- [3] Smith, R. (2016). Chemical Process: Design and Integration. Wiley.
- [4] AspenTech. (2020). Aspen HYSYS Simulation User Guide.
- [5] Sonatrach (2022). Rapport annuel de performance énergétique, GL2Z.
- [6] Qatargas. (2021). Sustainability Report 2020. [<https://qatargas.com>]
- [7] NFPA 59A. Standard for the Production, Storage, and Handling of LNG, National Fire Protection Association, 2022.
- [8] API Standard 620 – Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks.
- [9] Kleiber, M. (2017) – Cryogenic Materials and Design, Springer
- [10] Sonatrach (2023) – Note technique interne – Sélection matériaux pour cryogénie éthane.
- [11] Hasan, M. M., & Klett, D. E. (2008). Design of LNG Storage Tanks. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference.
- [12] Reynolds, W. C. & Perkins, H. C. (1986). Engineering Thermodynamics. McGraw-Hill.
- [13] EN ISO 21009-1 – Vessels for Cryogenic Fluids – Static Vacuum Insulated Vessels
- [14] NFPA 59A – Standard for the Production, Storage, and Handling of LNG
- [13] .API 625. Tank Systems for Refrigerated Liquids, American Petroleum Institute, 2014.
- [14] .EN 14620. Design and manufacture of site built vertical cylindrical, flat-bottomed, steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C, AFNOR, 2013.
- [15] Smith, R. (2016). Chemical Process: Design and Integration. Wiley.
- AspenTech. (2020). Aspen HYSYS Simulation User Guide.
- [16] Sonatrach (2022). Rapport annuel de performance énergétique, GL2Z.
- [17] Qatargas. (2021). Sustainability Report 2020. [<https://qatargas.com> ]
- [18] NFPA 59A. Standard for the Production, Storage, and Handling of LNG, National Fire Protection Association, 2022.
- [19] Crawley, F. & Tyler, B. (2015). HAZOP: Guide to Best Practice. 3rd Edition, IChemE.
- [20] Mannan, S. (2014). Lees' Loss Prevention in the Process Industries. 4th Edition, Elsevier.

## **Références bibliographiques**

---

[21] EN 13645 – Installations pour gaz liquéfiés – Réservoirs enterrés, semi-enterrés, et réservoirs cryogéniques.

[22] AspenTech (2022). Aspen HYSYS Dynamic Simulation User Guide.

# **Annexes**

---

# Annexes

## Annexe 1 – Schémas techniques

1. Schéma PFD du système d'éthane (simplifié)

→ Entrée éthane ↔ stockage ↔ BOG ↔ récupération MCR.

2. Schéma PID simplifié du réservoir

→ Indique : soupapes, capteurs, ligne de BOG, inertage N<sub>2</sub>.

3. Coupe du réservoir cryogénique

→ Vue en coupe : cuve interne, isolation, cuve externe, enceinte secondaire.

4. Courbe pression-température de l'éthane

→ Relation P/T entre -160 °C et +20 °C.

5. Graphique : BOG en fonction de l'épaisseur d'isolation

→ BOG diminue fortement avec augmentation de l'isolant (non-linéaire).

## Annexe 2 – Tableaux de calculs dimensionnels

Épaisseur de la virole	$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot f \cdot E \cdot P} + C$	$e = 39,8 \text{ mm}$
BOG journalier	$Q = \frac{U \cdot A \cdot \Delta T}{\Delta H_{\text{vap}}}$	$Q \approx 32,5 \text{ t/j}$
Résistance thermique	$R = \frac{e}{\lambda}$	$R = 18,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

## Annexe 3 – Matrice HAZOP complète (version étendue)

Nœud	Paramètre	Déviations	Cause possible	Conséquence	Mesure prévue
Niveau	Trop haut	Capteur HS	Débordement	Capteur redondant + alarme	
Pression	Trop basse	Rupture vide	Évaporation rapide	Inertage, soupape double	
Température	Trop élevée	Isolation défaillante	BOG massif	Contrôle vide + mesure murale	

## Annexe 4 – Données Aspen HYSYS utilisées

- Base thermodynamique : Peng–Robinson,
- Propriétés éthane : Cp,  $\Delta H_{vap}$ , densité,
- Hypothèse d'équilibre liquide/gaz

## Glossaire des sigles

<b>Sigle</b>	<b>Signification</b>
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
BOG	Boil-Off Gas (gaz d'évaporation)
MCR	Mixed Component Refrigerant
HAZOP	Hazard and Operability study
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
API	American Petroleum Institute
PdM	Maintenance Prédictive
ROI	Return On Investment (Retour sur investissement)
PFD	Process Flow Diagram
PID	Piping and Instrumentation Diagram
RSE	Responsabilité Sociétale des Entreprises