



Faculty of Sciences and Technology

كلية العلوم والتكنولوجيا

Department of Process Engineering

قسم هندسة الطرائق

Ref :...../U.M/F.S.T/2026

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت// 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **INDUSTRIES PÉTROCHIMIQUES**

Option: **GÉNIE PÉTROCHIMIQUE**

THÈME

Étude de l'unité d'extraction de l'hélium par membranes Separex™ au sein du complexe SORFERT d'Arzew – Performances, dégradation et optimisation

Présenté par :

- 1- KAOUBA Asmaa
- 2- HATTAB Hiba

Soutenu le 24/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	DRIOUCH Aouatef	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	MOHAMED SGHIR Zahira	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2025/2026

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu, le Clément et le Miséricordieux, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dr MEZOUAGH Amina pour avoir accepté d'encadrer ce travail. Ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son accompagnement bienveillant ont été des atouts précieux tout au long de ce projet.

Nous remercions également les membres du jury Pr DRIOUCH Aouatef et Dr MOHAMED SEGHIR ZAHIRA qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et de participer à notre soutenance.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce mémoire et de participer à notre soutenance.

Nous adressons nos sincères remerciements à MILOUDI Imad Eddine pour son encadrement au niveau du complexe SORFERT, KAOUANE Ahmed et HARB Abdenour pour leurs explications techniques et pour l'accès aux données opératoires.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Nous dédions ce travail :

À Dieu, pour la force et la persévérance qu'Il nous a accordées.

À nos familles, pour leur patience et leurs encouragements.

À notre encadrant, pour ses précieux conseils et sa disponibilité.

À l'équipe de SORFERT, pour leur accueil et leurs explications techniques.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'unité d'extraction de l'hélium du complexe SORFERT (Arzew, Algérie) utilise la technologie membranaire Separex™ de Honeywell UOP. Après plusieurs années de fonctionnement, une dégradation progressive des membranes a été constatée, entraînant une chute du taux de récupération de l'hélium de 81,3 % à 47,6 %. La production annuelle est passée de 232 à 136 tonnes.

Ce mémoire porte sur l'étude détaillée de cette unité. Un modèle numérique a été développé sous Excel, basé sur les équations de perméation gazeuse, et calibré à partir des bilans matière réels fournis par UOP. Les perméances obtenues sont : Hélium (0,01237), Méthane (0,000697), Azote (0,000773) kgmole/(h·m²·bar). Le modèle reproduit les données avec un écart inférieur à 0,1 %.

L'optimisation des paramètres opératoires (pression, débit) n'a montré qu'un gain marginal. Le remplacement des membranes (coût 2,3 M\$) génère un gain annuel de marge de 20,9 M\$, avec un retour sur investissement de 4.7 mois. Une nouvelle installation hybride (membrane nouvelle génération + PSA) est proposée, permettant d'atteindre une production de 237 t/an, une pureté de 99,99 % et une marge annuelle de 28,4 M\$, avec un retour sur investissement inférieur à six mois.

Mots-clés : Hélium, membranes Separex™, SORFERT, dégradation, modélisation, optimisation.

المخلص

تستخدم وحدة استخراج الهيليوم في مجمع سورفيرت (أرزيو، الجزائر) تقنية الأغشية من Separex™ Honeywell. UOP بعد عدة سنوات من التشغيل، لوحظ تدهور تدريجي للأغشية، مما أدى إلى انخفاض معدل استرجاع الهيليوم من 81.3 % إلى 47.6 %. انخفض الإنتاج السنوي من 232 إلى 136 طنًا.

يتناول هذا البحث دراسة تفصيلية لهذه الوحدة. تم تطوير نموذج رقمي باستخدام Excel يعتمد على معادلات نفاذية الغازات، وتمت معايرته باستخدام بيانات التوازن المادي الحقيقية المقدمة من UPO، النفاذية المحسوبة هي: الهيليوم (0.01237)، الميثان (0.000697)، النيتروجين (0.000773) كجم مول/(ساعة·م²·بار)، يعيد النموذج إنتاج البيانات بفارق أقل من 0.1 %.

لم يُظهر تحسين المعايير التشغيلية (الضغط، التدفق) سوى مكاسب هامشية. استبدال الأغشية (تكلفة 2,3 مليون دولار) يحقق ربحًا سنويًا قدره 20.9 مليون دولار مع عائد استثمار 4.7 شهر. تم اقتراح منشأة هجينة جديدة (غشاء جيل جديد PSA+) لتحقيق إنتاج 237 طن/سنة، ونقاء 99.99 %، وهامش سنوي 28.4 مليون دولار، مع عائد استثمار أقل من 6 شهر.

Abstract

The helium extraction unit at the SORFERT complex (Arzew, Algeria) uses Honeywell UOP Separex™ membrane technology. After several years of operation, progressive membrane degradation was observed, causing a drop in helium recovery from 81.3 % to 47.6 %. Annual production fell from 232 to 136 tons.

This study focuses on a detailed analysis of this unit. A numerical model was developed using Excel, based on gas permeation equations, and calibrated with actual mass balance data provided by UOP. The calculated permeances are : Helium (0.01237), Methane (0.000697), Nitrogen (0.000773) kgmole/(h·m²·bar). The model reproduces the data with a deviation of less than 0.1 %.

Optimization of operating parameters (pressure, flow) showed only marginal gains. Replacing the membranes (cost \$2,3M) generates an annual margin gain of \$20.9M, with a payback period of 4.7 months. A new hybrid installation (next-generation membranes + PSA) is proposed, achieving a production of 237 t/year, 99.99 % purity, and an annual margin of \$28.4M, with a payback period of less than six months.

Keywords : Helium, Separex™ membranes, SORFERT, degradation, modeling, optimization.

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale 1

Chapitre I : Présentation du complexe SORFERT3

I.1. Fiche d'identité 3

I.2. Situation géographique 3

I.3. Organisation fonctionnelle 4

I.4. Matières premières et produits finis 5

I.5. Zones du complexe et procédés de fabrication 7

I.6. Laboratoire et contrôle qualité 10

I.7. Système de sécurité industrielle 11

I.8. Politique environnementale 12

Chapitre II : L'hélium et la technologie membranaire Separex™ - Performances réelles et dégradation.....13

II.1. Propriétés physico-chimiques de l'hélium 13

II.2. Marché et enjeux stratégiques 14

II.3. Problématique de l'accumulation de l'hélium 15

II.4. Intérêt de la récupération de l'hélium 16

II.5. Méthodes de séparation de l'hélium 17

II.6. Principe de la séparation par membranes 19

II.7. Présentation du système Separex™ 21

II.8. Données de conception 23

II.9. Paramètres opératoires 25

II.10. Bilans matière et calculs 25

II.11. Surveillance et maintenance	26
II.12. Données opératoires réelles	27
II.13. Bilans matière actualisés	28
II.14. Comparaison avec les performances neuves	28
II.15. Tableau d'évolution temporelle de la dégradation	28
II.16. Effet de la température et de la pression sur le taux de récupération	29
II.17. Conclusion du chapitre.....	30
Chapitre III : Modélisation, analyse de sensibilité et optimisation	31
III.1. Objectifs du chapitre	31
III.2. Modélisation du procédé membranaire	31
III.3. Analyse de sensibilité	31
III.4. Optimisation du système	33
Chapitre IV : Proposition d'une nouvelle installation hybride pour la récupération de l'hélium	38
IV.1. Justification du projet	38
IV.2. Comparaison des technologies disponibles	38
IV.3. Configuration proposée pour SORFERT	39
IV.4. Dimensionnement et performances attendues	40
IV.5 Conclusion du chapitre	41
Conclusion	43
Conclusion générale	43
Références bibliographiques	44

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Situation géographique du complexe SORFERT	4
Figure I.2 : Plan général du complexe SORFERT	4
Figure I.3 : Molécule d'ammoniac (NH_3)	6
Figure I.4 : Molécule d'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	6
Figure I.5 : Unité de production d'ammoniac	8
Figure I.6 : Schéma simplifié du train ammoniac (avec unité 000)	9
Figure I.7 : Unité de production d'urée	10
Figure I.8 : Laboratoire du complexe SORFERT	11
Figure II.1 : Structure atomique de l'hélium	14
Figure II.2 : Répartition des réserves mondiales d'hélium	15
Figure II.3 : Unité de séparation d'hélium.....	18
Figure II.4 : Schéma d'un module membranaire spiral-wound	21
Figure II.5 : Élément Separex™ de Honeywell UOP	22
Figure II.6 : Prétraitement du gaz naturel	23
Figure II.7 : schéma de unité d'hélium.....	23
Figure II.8 : Chromatographe GC du laboratoire SORFERT	27
Figure II.9 : Courbe de l'évolution temporelle de la dégradation.....	29
Figure III.1 : Courbe de l'évolution de la récupération en fonction de la pression	32
Figure III.2 : Courbe de l'évolution de la pureté en fonction de la pression	32
Figure III.4 : Diagramme à barres comparant les scénarios	35
Figure III.5 : Courbe d'évolution temporelle de la dégradation	36
Figure IV.1 : Schéma du procédé hybride Membrane+PSA pour la séparation et l'enrichissement de l'hélium.....	40

Figure IV.2 : Diagramme en barres des performances par étage	41
--	----

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Composition du gaz naturel alimentant SORFERT	5
Tableau I.2 : Principales unités du train ammoniac (ammonia 1)	8
Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques de l'hélium	13
Tableau II.2 : Comparaison des technologies d'extraction	18
Tableau II.3 : Facteurs de séparation pour Separex™	20
Tableau II.4 : Conditions opératoires nominales – Unité Separex™	24
Tableau II.5 : Composition molaire des flux (% molaire)	24
Tableau II.6 : Données opératoires de l'unité membrane	25
Tableau II.7 : Bilans matière de l'unité d'extraction	26
Tableau II.8 : Conditions opératoires mesurées	27
Tableau II.9 : Comparaison neuf vs actuel	28
Tableau II.10 : Évolution des performances en fonction du temps	29
Tableau II.11 : Sensibilité du taux de récupération	30
Tableau III.1 : Effet de la pression d'alimentation sur les performances	32
Tableau III.2 : Effet du débit d'alimentation sur les performances	33
Tableau III.3 : Résultats de l'optimisation – Comparaison des scénarios	34
Tableau III.4: Seuils de rentabilité du remplacement	36
Tableau IV.1 : Comparaison des technologies de récupération d'hélium	39
Tableau IV.2 : Performances attendues de la nouvelle installation hybride	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

A. Symboles chimiques et composés

Symbole	Signification
Ar	Argon
C ₂ H ₆	Éthane
C ₃ H ₈	Propane
C ₄ H ₁₀	Butane
C ₅ H ₁₂	Pentane
C ₆ H ₁₄	Hexane
CH ₄	Méthane
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂	Hydrogène
H ₂ O	Eau (vapeur)
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
He	Hélium
Hg	Mercure
N ₂	Azote
NH ₃	Ammoniac
O ₂	Oxygène
S	Soufre

B. Unités de mesure

Symbole	Signification
---------	---------------

bar	Unité de pression (1 bar = 10 ⁵ Pa)
°C	Degré Celsius
g	Gramme
h	Heure
J	Joule
K	Kelvin
kg	Kilogramme
kgmole	Kilomole
kmol	Kilomole
m	Mètre
m ²	Mètre carré
m ³	Mètre cube
mm	Millimètre
mol	Mole
Nm ³	Normal mètre cube (conditions normales : 0°C, 1 atm)
ppm	Partie par million
t	Tonne
µg	Microgramme

C. Abréviations techniques

Abréviation	Signification
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials

BASF	Badische Anilin- und Soda-Fabrik
BFW	Boiler Feed Water (eau d'alimentation de chaudière)
DCS	Distributed Control System (système de contrôle distribué)
EPI	Équipement de Protection Individuelle
ESD	Emergency Shutdown (arrêt d'urgence)
GC	Gas Chromatography (chromatographie en phase gazeuse)
HSE	Hygiène, Sécurité, Environnement
HTS	High Temperature Shift (conversion à haute température)
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
ISO	International Organization for Standardization
LIMS	Laboratory Information Management System
LTS	Low Temperature Shift (conversion à basse température)
MDEA	Méthyl-diéthanolamine
MMSCFD	Million Metric Standard Cubic Feet per Day
OCI	Orascom Construction Industries
PFD	Process Flow Diagram (schéma de procédé)
POI	Plan d'Opération Interne
PSA	Pressure Swing Adsorption (adsorption modulée en pression)
RTO	Région de Transport Ouest (Algérie)
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMR	Steam Methane Reforming (vaporeformage)
SONATRACH	Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation et la Commercialisation des Hydrocarbures
SOP	Système Opérationnel de Procédure

SORFERT	Sonatrach Orascom Fertiliser
TKIS	ThyssenKrupp Industrial Solutions
UAN	Urée Ammoniac Nitrate
UOP	Universal Oil Products (Honeywell)
UV	Ultraviolet

D. Symboles mathématiques et grandeurs physiques

Symbole	Signification	Unité
A	Surface membranaire	m ²
C _p	Chaleur massique à pression constante	J/(kg·K)
D _i	Coefficient de diffusion du composant i	m ² /s
E _a	Énergie d'activation	kJ/mol
J _i	Flux molaire du composant i	kgmole/h
l	Épaisseur de la membrane	m
P	Perméabilité	kgmole/(h·m ² ·bar)
P ₀	Facteur pré-exponentiel (loi d'Arrhenius)	kgmole/(h·m ² ·bar)
P _i /l	Perméance du composant i	kgmole/(h·m ² ·bar)
P _f	Pression côté alimentation	bar
P _p	Pression côté perméat	bar
Q	Débit molaire	kgmole/h
Q _f	Débit d'alimentation	kgmole/h

Qp	Débit de perméat	kgmole/h
R	Constante universelle des gaz parfaits 8,314	J/(mol·K)
R (He)	Taux de récupération de l'hélium	%
S	Surface	m ²
S _i	Coefficient de solubilité du composant i	—
T	Température absolue	K
X	Fraction molaire (alimentation)	—
x _i	Fraction molaire du composant i (alimentation)	—
Y	Fraction molaire (perméat)	—
y _i	Fraction molaire du composant i (perméat)	—
α	Facteur de séparation (sélectivité)	—
ΔH	Enthalpie de réaction	kJ/mol
ΔP	Perte de charge (delta de pression)	bar
Δp _i	Force motrice du composant i	bar
θ	Taux de coupure (stage-cut)	—
ρ	Masse volumique	kg/m ³
μ	Micro (préfixe 10 ⁻⁶)	—

E. Abréviations spécifiques au projet SORFERT

Symbole	Signification
TP1	Flux d'alimentation du système membranaire
TP2	Gaz résiduel (appauvri en hélium)

TP3	Gaz de perméat (enrichi en hélium)
Unité 000	Unité d'extraction de l'hélium et du mercure
Unité 101-110	Unités du train de production d'ammoniac (désulfurisation, reformage, synthèse, etc.)
Separex™	Marque commerciale des membranes Honeywell UOP
D-G6125-001	Référence du document PFD UOP pour l'unité membranaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Algérie dispose de réserves considérables de gaz naturel, ce qui lui a permis de développer une industrie pétrochimique compétitive, particulièrement dans la région d'Arzew [1]. Parmi les complexes majeurs de cette zone, SORFERT Algérie se distingue comme une unité intégrée de production d'ammoniac et d'urée, destinés à l'exportation et au marché local [2].

Cependant, le gaz naturel n'est pas constitué uniquement de méthane. Il s'agit d'un mélange complexe contenant également d'autres gaz, dont certains possèdent une très haute valeur ajoutée [3]. C'est le cas de l'hélium (He). Selon les analyses du laboratoire de SORFERT, la teneur en hélium du gaz alimentant l'usine est d'environ 0,18 % en volume [4]. Pendant des années, cet hélium n'était pas valorisé.

Pour remédier à cette situation, SORFERT a franchi une étape technologique importante en intégrant une unité de séparation de l'hélium par membranes, identifiée sous le code Unité 000 [5]. Cette unité, située en amont du procédé, permet d'extraire l'hélium avant que le gaz naturel n'entre dans le cycle de production des engrais. La technologie retenue est le système Separex™ de la société Honeywell UOP [6].

Cependant, après plusieurs années de fonctionnement, des relevés récents ont mis en évidence une dégradation progressive des membranes. La teneur en hélium dans le gaz résiduel est passée de 0,04 % (spécification neuve) à 0,10 % , entraînant une chute du taux de récupération de 81,3 % à 47,6 % . Cette situation justifie une étude approfondie des performances de l'unité et la recherche de solutions pour restaurer, voire améliorer, la production d'hélium.

Notre travail de fin d'études porte sur l'étude détaillée de cette unité. Les objectifs principaux sont :

1. Présenter le complexe SORFERT et situer l'unité d'extraction d'hélium dans son schéma global de production.
2. Décrire le principe de fonctionnement de la séparation par membranes appliquée au couple gaz naturel/hélium [7].
3. Calculer les bilans matière de l'unité à partir des données réelles de l'usine afin de quantifier la production d'hélium et d'évaluer la dégradation [8].

4. Proposer une modélisation sous Excel, optimiser les paramètres opératoires et formuler des recommandations pour améliorer les performances.

Pour répondre à ces objectifs, notre mémoire est structuré en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente le complexe SORFERT, son organisation, ses procédés de fabrication et son laboratoire de contrôle qualité.
- Le second chapitre est consacré à l'hélium (propriétés, applications, marché) et à la technologie membranaire Separex™ et analysé les performances réelles de l'unité, quantifie la dégradation des membranes et étudie l'influence de la température et de la pression.
- Le troisième chapitre développe un modèle numérique, réalise une analyse de sensibilité et propose une optimisation économique.
- Le quatrième chapitre propose une nouvelle installation hybride (membrane nouvelle génération + PSA) pour améliorer significativement la production et la pureté de l'hélium.

.

Chapitre I : Présentation du complexe SORFERT

I.1. FICHE D'IDENTITÉ

SORFERT (Société algérienne de production d'engrais) est l'un des complexes pétrochimiques les plus modernes d'Algérie. Il est issu d'un partenariat stratégique entre le groupe public SONATRACH (détenant 49 % des parts) et le groupe égyptien ORASCOM Construction Industries OCI (détenant 51 % des parts).

FICHE D'IDENTITÉ DE SORFERT	
Nom complet	SORFERT Algérie
Localisation	Zone industrielle d'Arzew, Oran
Superficie	37 hectares
Date mise en service	2014
Activité principale	Ammoniac (NH_3) et Urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
Capacités	2 x 2 200 t/j ammoniac 3 450 t/j urée
Effectif	Environ 1 200 employés
Technologies	ThyssenKrupp Uhde, Stamicarbon
Partenariat	SONATRACH (49%) / OCI (51%)

Le projet a été officiellement lancé en 2006, avec une phase de construction entre 2007 et 2010 pour un investissement estimé à plus de 2 milliards de dollars. Les tests industriels ont eu lieu en 2013, et la production commerciale a débuté en 2014.

I.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

Le complexe SORFERT est situé dans la zone industrielle d'Arzew, à environ 6 km de la ville d'Arzew et à 40 km à l'est d'Oran. Cette localisation stratégique offre plusieurs avantages :

- Proximité des ressources : Le gaz naturel est acheminé depuis les champs de Hassi R'Mel via le réseau de gazoducs de la région de transport ouest (RTO).

- Accès maritime : Le port méthanier d'Arzew permet l'exportation rapide des produits finis vers les marchés internationaux (Europe, Amérique latine, Asie).
- Infrastructures développées : Le site bénéficie de réseaux électriques performants, de stations de dessalement, et de voies de communication.

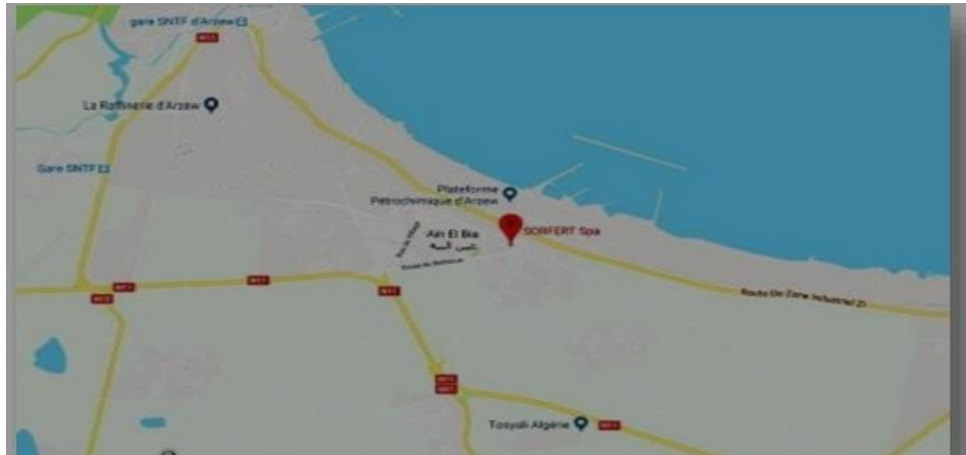


Figure I.1 : Situation géographique du complexe SORFERT

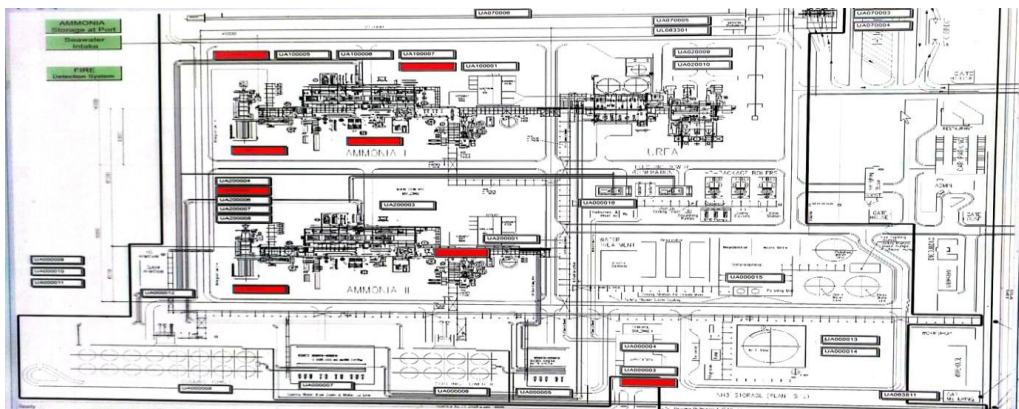


Figure I.2 : Plan général du complexe SORFERT

I.3. ORGANISATION FONCTIONNELLE

L'organisation du complexe repose sur une structure matricielle :

- Direction Générale : Supervise toutes les opérations.
- Direction des Opérations : Regroupe les unités de production d'ammoniac, d'urée et les utilités.
- Département Maintenance : Assure la disponibilité des équipements (mécanique, électrique, instrumentation).
- Département HSE-Q (Hygiène, Sécurité, Environnement, Qualité) : Garantit la

Conformité réglementaire.

- Département Laboratoire et Contrôle Qualité : Réalise les analyses.
- Département Logistique et Exportation : Gère le transport et le stockage.

Le complexe dispose également d'un centre de formation interne.

I.4. MATIÈRES PREMIÈRES ET PRODUITS FINIS

I.4.1. Matières premières

La principale matière première est le gaz naturel. Sa composition, déterminée par le laboratoire interne, est présentée dans le tableau I.1.

Tableau I.1 : Composition du gaz naturel alimentant SORFERT

Composants de GN	Unité	Quantité
Eau	Eau	0
Hélium	% mol	0.18
Azote	% mol	5.57
Dioxyde de carbone	% mol	0.22
Méthane	% mol	83.38
Ethane	% mol	7.68
Propane	% mol	1.99
I-butane	% mol	0.30
n-butane	% mol	0.45
i-pentane	% mol	0.09
n-pentane	% mol	0.10
n-hexane	% mol	0.04
Mercure	µg\Nm ³	50
Soufre	Ppm	<10

- Note : La teneur de 0,18 % d'hélium (soit 1 800 ppm) est économiquement exploitable. C'est cette fraction que l'unité de séparation par membranes va capter.

Outre le gaz naturel, l'usine utilise également :

- L'azote (N_2) : Extrait de l'air, nécessaire à la synthèse de l'ammoniac
- L'oxygène (O_2) : Extrait de l'air, utilisé dans le reformage secondaire
- La vapeur d'eau : Produite sur site par des chaudières à récupération

I.4.2. Produits finis

Le complexe fabrique deux principaux produits :

- L'ammoniac (NH_3) : Gaz incolore produit par le procédé Haber-Bosch.
stocké à l'état liquide (un réservoir de 15 000 m³ sur site).

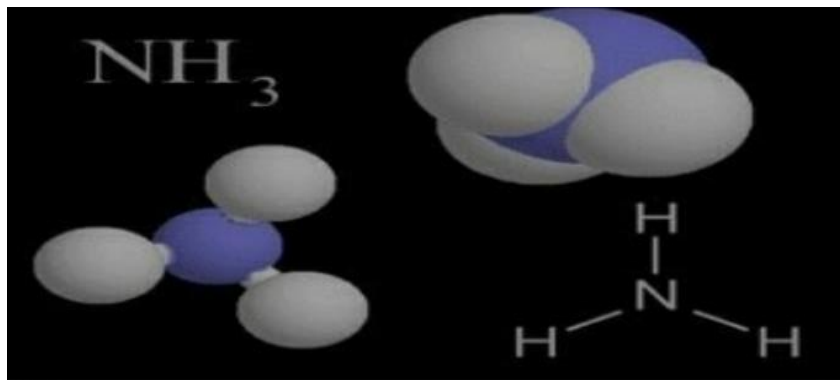


Figure I.3 : Molécule NH_3

- L'urée $CO(NH_2)_2$: Composé organique solide obtenu par réaction entre l'ammoniac et le CO_2 . C'est l'engrais azoté le plus répandu.

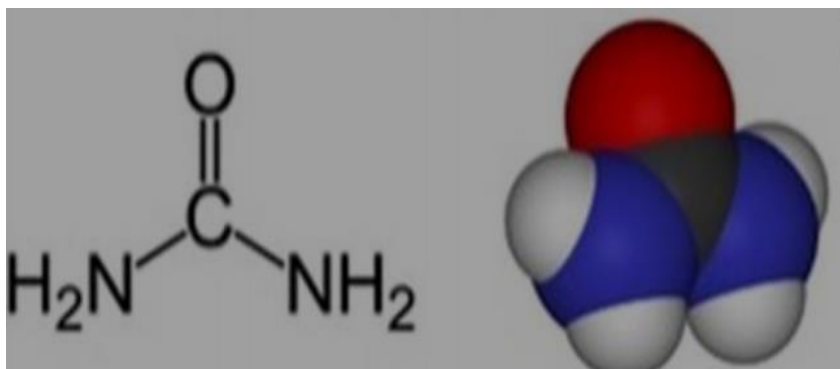


Figure I.4 : Molécule $CO(NH_2)_2$

I.5. ZONES DU COMPLEXE ET PROCÉDÉS DE FABRICATION

I.5.1. Zone utilités

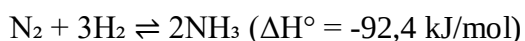
Les utilités regroupent l'ensemble des services de soutien :

- Production de vapeur (unité 083)
- Production d'air instrument et de service (084)
- Production d'électricité (085)
- Production et stockage d'azote (086)
- Refroidissement à l'eau de mer (087, 088)
- Production d'eaux dessalées et déminéralisées (089, 090)
- Réseau d'eau anti-incendie (091)

I.5.2. Zone process – Train ammoniac

A. Généralités sur le procédé Haber-Bosch (Procédé de fabrication de l'ammoniac chez SORFERT)

L'ammoniac (NH_3) est synthétisé industriellement par le procédé Haber-Bosch, mis au point au début du XXe siècle et qui reste à ce jour la principale voie de production mondiale. La réaction fondamentale est la suivante [8] :



Cette réaction est exothermique et s'accompagne d'une diminution du volume (4 volumes de réactifs donnent 2 volumes d'ammoniac). Selon le principe de Le Chatelier, les conditions favorisant l'équilibre sont donc les basses températures et les hautes pressions. Cependant, la cinétique de réaction est très lente à basse température. Un compromis est donc nécessaire : l'industrie opère généralement à des températures comprises entre 400 et 450°C et à des pressions très élevées, de l'ordre de 150 à 250 bar, en présence d'un catalyseur à base de fer (magnétite promue) qui accélère la réaction sans en modifier l'équilibre.

Dans les installations modernes comme celles de SORFERT, l'hydrogène (H_2) nécessaire à la synthèse est produit à partir du gaz naturel par vaporeformage (Steam Methane Reforming – SMR), procédé le plus mature et le plus répandu industriellement pour la production d'hydrogène.

L'air, quant à lui, constitue la source d'azote (N_2). Le schéma de production d'ammoniac à partir du gaz naturel et de l'air comporte ainsi plusieurs étapes successives de transformation et de purification.



Figure I.5 : Unité de production d'ammoniac

B. Le procédé de fabrication de l'ammoniac chez SORFERT

Le complexe SORFERT est équipé de deux unités de production d'ammoniac identiques, d'une capacité unitaire de 2 200 tonnes par jour (soit environ 1,6 million de tonnes par an pour les deux unités). La technologie utilisée est celle de ThyssenKrupp Uhde (TKIS), un leader mondial de l'ingénierie chimique pour ce type d'installation.

Chaque unité met en œuvre une succession d'opérations unitaires, de l'extraction de l'hélium à la synthèse finale de l'ammoniac. Le tableau ci-dessous détaille les différentes étapes du train d'ammoniac.

Tableau I.2 : Principales unités du train ammoniac (ammonia 1)

Code	Désignation	Rôle
000	Extraction hélium/mercure	CIBLE DE NOTRE ÉTUDE
101	Désulfurisation + compres.	Prépare le gaz
102	Compression air	Fournit N_2 et O_2
103	Reformage (primaire + sec)	Convertit CH_4 en H_2+CO
104	Conversion CO (HTS & LTS)	Transforme CO en CO_2
105	Extraction CO_2	Capture CO_2 pour urée
106	Méthanation	Purifie l'hydrogène
107	Compression gaz synthèse	Élève pression
108	Synthèse ammoniac	Haber-Bosch

- Point crucial : L'unité 000 est située en AMONT de toute réaction chimique. C'est dans cette unité que le gaz naturel brut est débarrassé de son hélium.

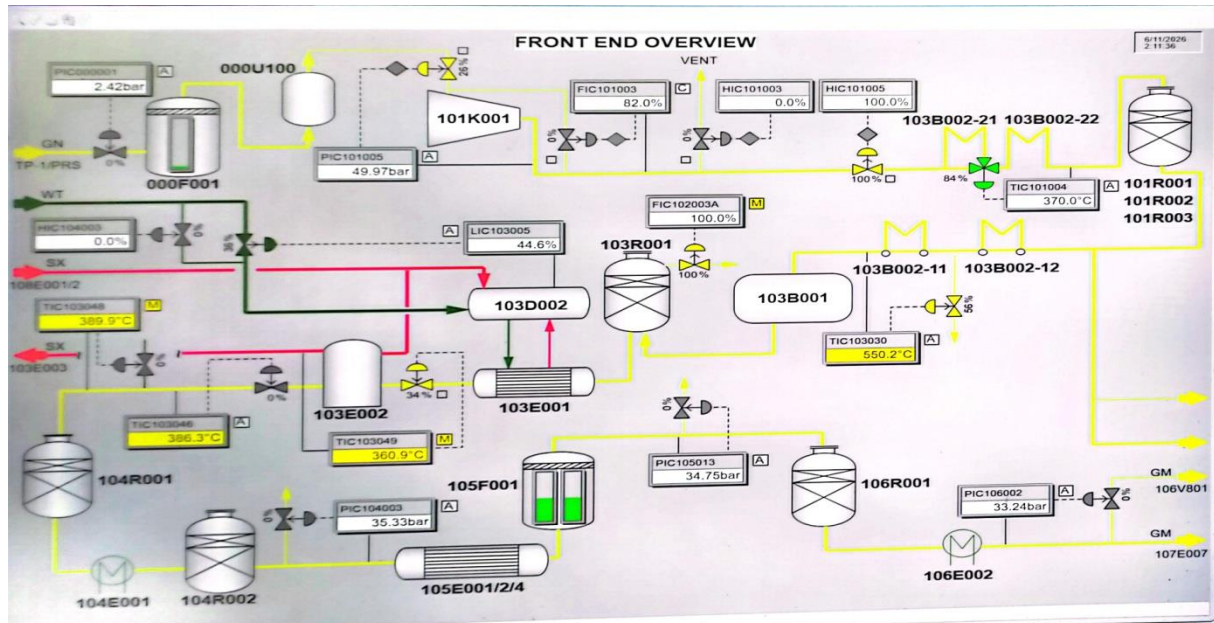


Figure I.6 : Schéma simplifié du train ammoniac avec l'unité 000

I.5.3. Zone process – Train urée

Capacité : 3 450 tonnes par jour. Étapes principales :

- Synthèse urée (022) : formation de carbamate puis déshydratation
- Recirculation des gaz non convertis (023)
- Évaporation (024)
- Granulation (027) : refroidissement, tamisage, enrobage



Figure I.7 : Unité de production d'urée

I.5.4. Zone de stockage

- Stockage sur site : 1 réservoir NH_3 (15 000 m^3), hangar urée (100 000 m^3)
- Stockage au port : 2 réservoirs NH_3 (30 000 m^3 chacun), station pompage

I.6. LABORATOIRE ET CONTRÔLE QUALITÉ

Le laboratoire central de SORFERT est accrédité selon la norme ISO 17025.

Équipements principaux :

- Chromatographie en phase gazeuse (GC) : Analyse la composition du gaz, y compris la teneur en hélium.
- Spectrophotomètre UV-Visible
- pH-mètres, conductimètres, turbidimètres
- Balances analytiques de haute précision

Fréquence des analyses :

- Horaire : Unités critiques (NH_3 , CH_4 , He)
- Quotidienne : Produits finis (urée, ammoniac)
- Hebdomadaire : Rejets environnementaux



Figure I.8 : Laboratoire du complexe SORFERT

I.7. SYSTÈME DE SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Risques identifiés :

- Chimiques : fuites de gaz, réactions incontrôlées
- Thermiques : températures $> 900^{\circ}\text{C}$ dans les fours
- Mécaniques : équipements sous pression (jusqu'à 250 bar)
- Feu/explosion : mélanges inflammables.

Moyens de prévention :

- Détecteurs de gaz (NH_3 , CH_4 , H_2)
- Capteurs de température, pression, débit
- Soupapes de sécurité et disques de rupture
- Extincteurs, bouches d'incendie, mousse anti-feu
- Équipements de protection individuelle (EPI)

Gestion des urgences :

- Plan d'Opération Interne (POI)
- Sirènes d'alarme sur tout le site
- Équipes d'intervention rapide
- Exercices d'évacuation semestriels

Le complexe est certifié ISO 45001 (santé et sécurité).

I.8. POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE

SORFERT a mis en place une politique environnementale ambitieuse :

- Traitement des eaux : Station physico-chimique et biologique avec recyclage
- Épuration des gaz : Scrubbers, torchage sécurisé, surveillance des émissions
- Gestion des déchets : Tri, valorisation des catalyseurs, enfouissement
- Réduction empreinte carbone : Optimisation énergétique, récupération chaleur
 - Un rapport environnemental est publié chaque année.

**CHAPITRE II : L'hélium et la technologie membranaire Separex™ - Performances
réelles et dégradation**

II.1. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DE L'HÉLIUM

L'hélium (symbole He, numéro atomique 2) est un gaz noble incolore, inodore et
Insipide. Il possède des propriétés uniques qui le rendent indispensable.

Tableau II.1 : Propriétés physico-chimiques de l'hélium

Propriété	Valeur
Masse molaire	4,0026 g/mol
Point d'ébullition (à 1 atm)	-268,93 °C (4,2 K)
Point de fusion	-272,20 °C (0,95 K)
Densité (0°C, 1 atm)	0,1785 g/L
Chaleur spécifique (Cp, 25°C)	5,193 kJ/(kg·K)
Conductivité thermique (25°C)	0,1513 W/(m·K)
Indice de réfraction (20°C, 1 atm)	1,000035

Propriétés remarquables :

1. Le point d'ébullition le plus bas de tous les éléments : Seul l'hélium
reste liquide à des températures proches du zéro absolu.
2. Gaz inerte : Ne réagit avec aucun autre élément ni composé chimique.
3. Très faible densité : Environ 7 fois moins dense que l'air.
4. Haute conductivité thermique : Meilleure que celle de tous les autres gaz, à l'exception
de l'hydrogène.
5. Superfluidité en dessous de 2,17 K : L'hélium liquide devient superfluide, avec une
viscosité nulle.

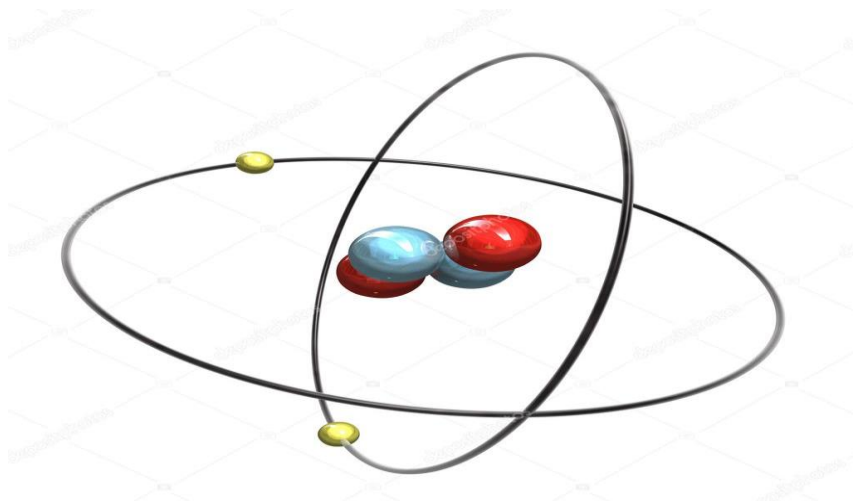


Figure II.1 : Structure atomique de l'hélium

II.2. MARCHÉ ET ENJEUX STRATÉGIQUES

II.2.1. Applications de l'hélium

L'hélium est indispensable dans de nombreux secteurs de haute technologie :

- Imagerie médicale (IRM) : Les aimants supraconducteurs des IRM nécessitent de l'hélium liquide pour leur refroidissement (environ 25 % de la demande).
- Aérospatiale : Purge des réservoirs de carburant, pressurisation.
- Fibres optiques : Refroidissement rapide des préformes de verre.
- Soudage : Gaz de protection pour le soudage des métaux non ferreux.
- Détection de fuites : Sa faible taille moléculaire permet de détecter les moindres fuites.
- Cryogénie : Refroidissement des capteurs infrarouges et des expériences de physique fondamentale.

II.2.2. Ressources et production mondiale

L'hélium est principalement extrait du gaz naturel, où il est présent à l'état de traces (0,01 % à 0,5 %). Les réserves mondiales sont limitées.

Principaux pays producteurs :

- États-Unis (environ 40 % de la production mondiale)
- Qatar (environ 30 %)
- Algérie (environ 10 %)

- Russie (environ 10 %)
- Australie, Pologne (parts mineures)



Figure II.2 : Répartition des réserves mondiales

II.2.3. Enjeux géopolitiques et économiques

L'hélium est classé parmi les matières premières critiques par plusieurs pays. La demande mondiale croît d'environ 5 % par an, tirée par les applications médicales et technologiques. Le prix a connu une forte volatilité ces dernières années, passant de 30 \$/m³ en 2010 à plus de 80 \$/m³ en 2025.

II.3. Problématique de l'accumulation de l'hélium

II.3.1. Gaz inertes dans la boucle ammoniacale

Dans le procédé de synthèse de l'ammoniac, les gaz inertes tels que l'argon, et l'hélium ne participent pas à la réaction chimique.

Ces gaz proviennent principalement du gaz naturel et s'accumulent progressivement dans la boucle de recyclage.

II.3.2. Effet de l'hélium sur le procédé

L'accumulation de l'hélium entraîne :

- Diminution des pressions partielles des réactifs ;
- Baisse du rendement de synthèse ;
- Augmentation du débit de recyclage ;
- Surcharge des compresseurs ;
- Baisse de performance globale du procédé.

II.3.3. Purge industrielle

Pour éviter cette accumulation, une purge est réalisée en continu ou en intermittence afin d'évacuer les gaz inertes.

Cependant, cette purge entraîne également :

- Perte d'hydrogène ;
- Perte d'azote ;
- Diminution du rendement global ;
- Coût économique important.

II.3.4. Pertes d'hydrogène

L'hydrogène étant un réactif principal, sa perte dans la purge représente un enjeu majeur :

- Pertes énergétiques élevées ;
- Augmentation du coût de production ;
- Diminution de l'efficacité du procédé.

II.4. Intérêt de récupération de l'hélium

La récupération de l'hélium présent dans le courant de purge permet :

- Valorisation d'un gaz rare et cher ;
- Réduction des pertes en hydrogène ;
- Amélioration de l'efficacité globale ;
- Intégration possible de technologies membranaires comme solution optimale.

II.5. Méthodes de séparation de l'hélium

L'hélium est généralement présent à faible concentration dans différents mélanges gazeux industriels. Sa récupération exige des procédés capables de séparer un gaz léger et inerte à partir de matrices complexes. Les principales méthodes industrielles sont la séparation cryogénique, l'adsorption PSA et la séparation membranaire.

II.5.1. Séparation cryogénique

La séparation cryogénique repose sur les différences de températures de liquéfaction des constituants du mélange gazeux. Les gaz condensables sont liquéfiés à très basse température tandis que l'hélium, possédant un point d'ébullition extrêmement bas, reste à l'état gazeux. Cette méthode permet d'obtenir une très haute pureté d'hélium. Toutefois, elle nécessite des installations complexes, une forte consommation énergétique et des investissements élevés. Elle est donc surtout utilisée pour les grandes capacités industrielles.

II.5.2. Adsorption PSA

Le procédé PSA (Pressure Swing Adsorption) utilise des adsorbants solides capables de retenir sélectivement certains gaz sous haute pression puis de les désorber lors de la détente. Dans le cas des mélanges contenant l'hélium, les impuretés telles que l'azote, le méthane ou le dioxyde de carbone peuvent être adsorbées préférentiellement, permettant d'enrichir le courant en hélium. Cette technique présente une bonne flexibilité opératoire, mais ses performances dépendent fortement du choix de l'adsorbant et des cycles de pression.

II.5.3. Séparation par membranes

La séparation membranaire repose sur la différence de vitesse de passage des constituants à travers une membrane sélective. Les gaz les plus perméables traversent la membrane plus rapidement que les autres. Cette technologie présente plusieurs avantages : compacité, fonctionnement continu, faible consommation énergétique et facilité d'intégration industrielle.

CHAPITRE II L'hélium et la technologie membranaire Separex™ - Performances réelles et dégradation

Tableau II.2 : Comparaison des technologies d'extraction

Critère	Cryogénie	PSA	Membranes	Hybride
Principe	Distillation à très basse T	Adsorption sélective	Diffusion sélective	Combinaison
Pureté obtenue	> 99,999 %	95 – 99 %	70 – 90 %	99,999 %
Consommation énergétique	Très élevée	Moyenne	Faible	Moyenne
Encombrement	Grand	Moyen	Compact	Moyen
Coût investissement	Élevé	Moyen	Modéré	Élevé
Maintenance	Complexe	Simple	Très simple	Modérée
Impact sur production	Arrêt usine nécessaire	Aucun (by-pass)	Aucun (by-pass)	Partiel

Choix de SORFERT : La technologie membranaire (système Separex™) a été retenue principalement pour sa compacité, sa faible consommation énergétique et surtout son fonctionnement en dérivation (by-pass) qui ne nécessite pas d'arrêter la production d'engrais.



Figure II.3 : Unité de séparation d'hélium

II.6. PRINCIPE DE LA SÉPARATION PAR MEMBRANES

II.6.1. Principe de séparation par membranes

La séparation gazeuse par membranes est fondée sur la capacité de certains matériaux à laisser passer préférentiellement certains constituants d'un mélange gazeux. Sous l'effet d'une différence de pression partielle entre les deux faces de la membrane, les espèces les plus perméables traversent plus rapidement la barrière sélective, ce qui permet d'obtenir un courant enrichi en composés rapides du côté perméat et un courant appauvri du côté rétentat.

Dans le cas du mélange contenant l'hélium, ce gaz présente généralement une diffusivité élevée en raison de sa faible taille moléculaire et de sa masse molaire réduite. Il peut ainsi traverser certaines membranes plus rapidement que des gaz plus lourds tels que l'azote, le méthane ou l'argon.

II.6.2. Mécanisme de solution-diffusion

Le transport des gaz à travers une membrane polymère suit le mécanisme dit de

« solution-diffusion » :

1. Adsorption : Les molécules de gaz se dissolvent à la surface de la membrane
2. Diffusion : Elles se déplacent à travers l'épaisseur du polymère
3. Désorption : Elles ressortent de l'autre côté de la membrane

Chaque gaz possède une perméabilité propre, fonction de sa capacité à se dissoudre dans le polymère et à y diffuser.

II.6.3. Loi de perméation

Le flux molaire d'un constituant i à travers la membrane est proportionnel à la différence de pression partielle entre les deux faces :

$$J_i = \frac{P_i}{l} \times A \times (P_f \times x_i - P_p \times y_i) \quad \dots (II.1)$$

- Cette relation montre que l'augmentation de la force motrice, c'est-à-dire la différence de pression partielle, améliore directement le transfert du gaz.

II.6.4. Diffusion et solubilité

La perméabilité d'un gaz dans une membrane résulte généralement de deux phénomènes couplés : la diffusion et la solubilité.

$$P_i = D_i \times S_i \quad \dots (II.2)$$

Un gaz peut donc être très perméable soit parce qu'il diffuse rapidement, soit parce qu'il possède une forte affinité avec le matériau membranaire.

II.6.5. Facteurs de séparation

Les facteurs de séparation pour le système Separex™ sont les suivants :

Tableau II.3 : Facteurs de séparation pour Separex™ (α = perméabilité gaz A/gaz B)

Couple de gaz	Facteur de séparation α (typique)
Hélium (He) / Méthane (CH ₄)	60 - 85
Hydrogène (H ₂) / Méthane (CH ₄)	45 - 55
Dioxyde de carbone (CO ₂) / CH ₄	20 - 30
Vapeur d'eau (H ₂ O) / CH ₄	200 - 400

- Interprétation : Un facteur de 60 à 85 signifie que l'hélium traverse la membrane 60 à 85 fois plus vite que le méthane. C'est cette forte sélectivité qui rend l'extraction économiquement viable.

II.6.6. Paramètres influençant la séparation

- Pression d'alimentation : Plus elle est élevée, meilleure est la force motrice.
- Température : Augmente la perméabilité mais diminue la sélectivité.
- Rapport de pression (alimentation / perméat) : Doit être > 10.
- Taux de coupe (stage-cut) : Pourcentage du débit qui traverse la membrane.

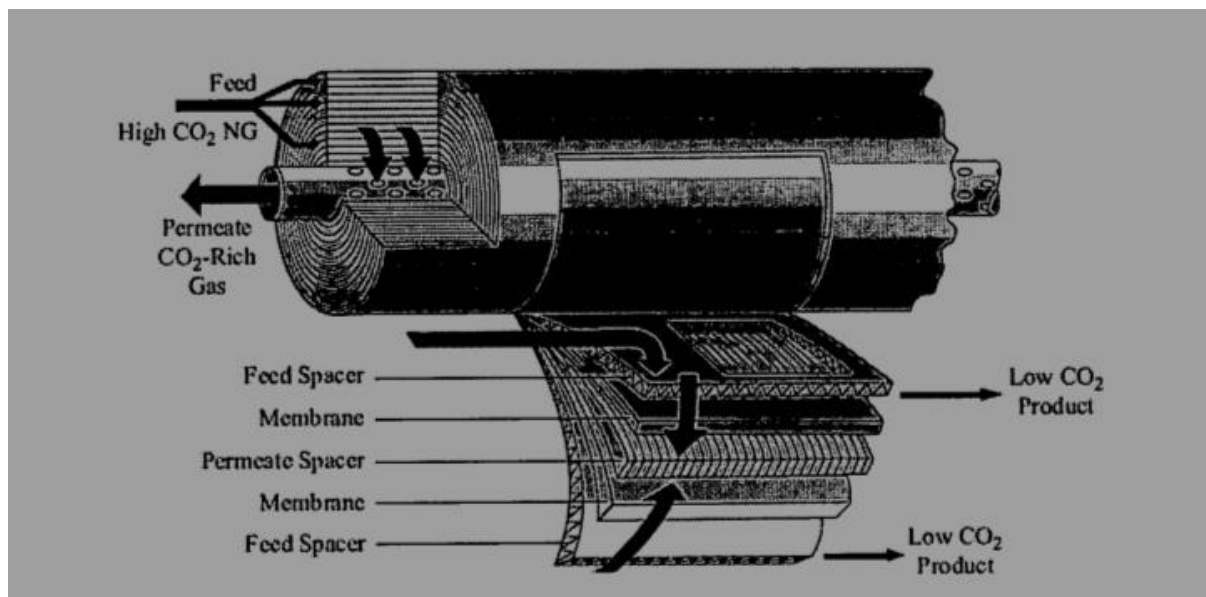


Figure II.4 : Schéma d'un module membranaire spiral-wound

II.7. PRÉSENTATION DU SYSTÈME SEPAREx™ DE HONEYWELL UOP

II.7.1. Historique et positionnement

Separex™ est une marque déposée de Honeywell UOP, l'un des leaders mondiaux du raffinage et de la pétrochimie. La technologie a été développée initialement dans les années 1980 et a été continuellement améliorée depuis.

Aujourd'hui, plus de 300 unités Separex™ sont en service dans le monde pour :

- L'élimination du CO₂ et du H₂S du gaz naturel
- La récupération d'hydrocarbures
- La purification de l'hydrogène
- L'extraction et la purification de l'hélium (notre cas)

II.7.2. Caractéristiques techniques des éléments Separex™

Les éléments sont du type « spiral-wound » (bobine en spirale) :

Caractéristiques techniques Separex™	
Diamètres disponibles	4, 6 ou 8 pouces
Longueur des éléments	Variable selon configuration
Matériau de la membrane	Acétate de cellulose ou polyimide
Pression maximale	49,6 bar
Température maximale	50 – 60 °C
Durée de vie typique	5 à 10 ans

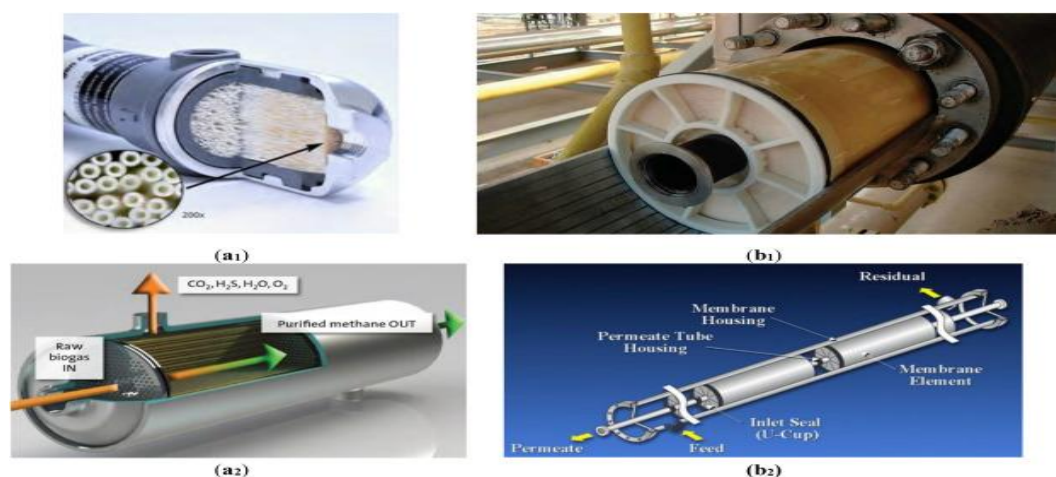


Figure II.5: Éléments Separex™ de Honeywell UOP

II.7.3. Avantages du système pour SORFERT

Le choix de Separex™ par SORFERT se justifie par :

1. Compacité : Montage sur skids (châssis métalliques), faible emprise au sol.
2. Simplicité : Peu de pièces mobiles, pas de réactifs chimiques.
3. Modularité : Possibilité d'ajouter des éléments pour augmenter la capacité.
4. Non-intrusif : Fonctionnement en dérivation sans arrêt de la production.
5. Rentable : Faible consommation énergétique et maintenance réduite.

II.7.4. Composants principaux du système

Le système membranaire Separex™ de SORFERT comprend les éléments suivants :

- Prétraitement : Filtration et séparation des liquides pour protéger les membranes
- Modules membranaires : Éléments spiral-wound assurant la séparation He/CH₄
- Système de contrôle DCS : Surveillance et régulation des paramètres opératoires
- ESD (Emergency Shutdown) : Arrêt d'urgence autonome en cas de dérive.

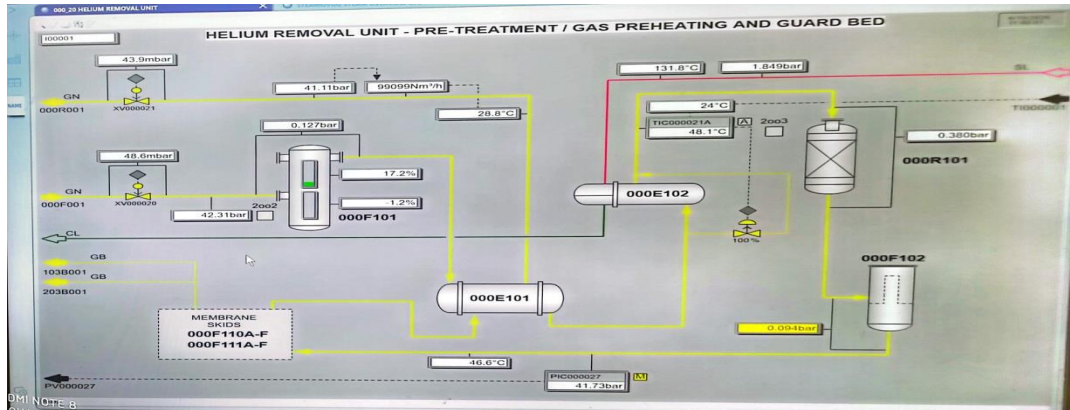


Figure II.6: prétraitement de GN

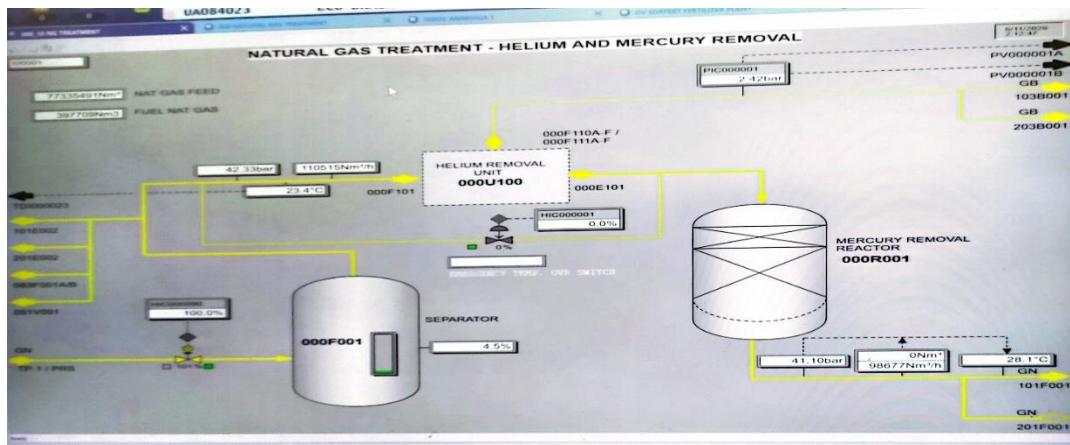


Figure II.7 : schéma de unité d'hélium

II.8. Données de conception

II.8.1. Conditions opératoires nominales

Le tableau II.4 présente les conditions de fonctionnement de l'unité en régime normal.

CHAPITRE II L'hélium et la technologie membranaire Separex™ - Performances réelles et dégradation

Tableau II.4 : Conditions opératoires nominales – Unité Separex™

Paramètre	Alimentation (TP1)	Gaz résiduel (TP2)	Perméat (TP3)	Unité
Pression	42,4	39,6	3,0	bars A
Température	30	34	43	°C
Débit volumique	126539.84	107822.4	18717.44	Nm³/h
Débit (MMSCFD)	115	97	18	MMSCFD
Poids moléculaire	18,9	19,1	17,5	kg/kmol

II.8.2. Composition des flux

Le tableau II.5 détaille la composition molaire des trois flux.

Tableau II.5 : Composition molaire des flux (% molaire)

Composant	Alimentation (TP1)	Gaz résiduel (TP2)	Perméat (TP3)
Hélium (He)	0,18	0,04	0,99
Azote (N ₂)	5,57	5,41	6,49
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,22	0,08	1,03
Méthane (CH ₄)	83,38	82,54	88,25
Éthane (C ₂ H ₆)	7,68	8,48	3,07
Propane (C ₃ H ₈)	1,99	2,31	0,14
i-Butane	0,30	0,35	0,01
n-Butane	0,45	0,53	0,02
i-Pentane	0,09	0,11	0,00
n-Pentane	0,10	0,12	0,00
n-Hexane	0,04	0,05	0,00
Total	100,00	100,00	100,00

Le point de rosée du gaz d'alimentation est de -19,2 °C, ce qui garantit l'absence de condensation dans les membranes.

II.9. PARAMÈTRES OPÉRATOIRES

Les données suivantes ont été collectées sur site et dans la documentation

Technique de SORFERT.

Tableau II.6 : Données opératoires de l'unité membrane

Paramètre	Valeur
Débit de gaz alimentant l'unité	126539.84 Nm ³ /h
Pression à l'entrée	42.2 bar
Pression à la sortie (résidu)	40.01 bar
Chute de pression ΔP	22.19 bar
Teneur en hélium à l'entrée	0,18 % molaire
Température de fonctionnement	40 – 60 °C
Facteur de séparation He/CH ₄	60 – 85
Taux de récupération (estimé)	81.35 %

II.10. BILANS MATIÈRE ET CALCULS

II.10.1. Calcul du débit molaire de gaz entrant

Le débit de gaz naturel alimentant l'unité est de Nm³/h (conditions normales : 0°C, 1 atm).
Sachant qu'une mole de gaz occupe 22,4 Nm³ :

$$\text{Débit molaire} = 126539.84 / 22,4 = 5649.1 \text{ kgmol/h}$$

II.10.2. Calcul du débit d'hélium entrant

La teneur en hélium dans le gaz est de 0,18 % (tableau I.1) :

$$\text{Débit He entrant} = 5649,1 \times (0,18 / 100) = 10,17 \text{ kmol/h}$$

Conversion en débit massique (masse molaire He = 4 kg/kmol) :

Débit massique He entrant = $10,17 \times 4 = 40,67$ kg/h

II.10.3. Calcul du débit d'hélium extrait

Avec un taux de récupération estimé à 81.35 % (hypothèse raisonnable compte tenu des performances Separex™ et de la configuration à trois étages) :

He extrait = $40,67 \times 0,81 = 32.94$ kg/h

II.10.4. Production annuelle

L'usine fonctionne en continu, avec des arrêts programmés pour maintenance. On retient généralement 330 jours de fonctionnement par an :

Production annuelle = $32.94 \times 24 \times 330 = 260884.6$ kg/an

Soit environ 260 tonnes d'hélium par an.

Tableau II.7 : Bilans matière de l'unité d'extraction

Débit d'alimentation = Débit d'extrait + Débit résidu

Flux	Débit (kg/h)	Débit (t/an)
Hélium à l'entrée (0,18 %)	40,67	351.39
Hélium extrait (récupération 81.35 %)	32.94	260.88
Hélium perdu (dans le résidu)	7.73	90.51

II.11. SURVEILLANCE ET MAINTENANCE

Le service Inspection de SORFERT assure un suivi régulier de l'unité via :

- Mesures de pression différentielle : Une augmentation anormale indique un colmatage progressif des membranes.
- Analyse chromatographique (GC) : Vérification quotidienne de la composition du gaz traité. Le GC (chromatographe en phase gazeuse) permet de mesurer précisément les teneurs en He, CH₄, N₂, etc.
- Inspection visuelle : Recherche de fuites ou de dommages mécaniques sur les skids et les raccords.

- Contrôle des températures : Vérification que la température ne dépasse pas la limite maximale (50-60 °C).



Figure II.8 : Chromatographe GC du laboratoire SORFERT

Fréquence de remplacement des éléments :

Les membranes Separex™ ont une durée de vie typique de 5 à 10 ans, selon :

- La qualité du prétraitement (élimination des particules et des liquides)
- La présence de contaminants (soufre, mercure, hydrocarbures lourds)
- La stabilité des conditions opératoires (pression, température).

II.12. Données opératoires réelles

Les mesures effectuées sur site (laboratoire SORFERT, analyse par chromatographie en phase gazeuse) ont fourni les valeurs suivantes

Tableau II.8 : Conditions opératoires mesurées

Paramètre	Alimentation (TP1)	Gaz résiduel (TP2)	Perméat (TP3)
Débit (Nm ³ /h)	112 000	105 600	6 400
Débit molaire (kgmole/h)	5 000	4 714,3	285,7
Pression (bars A)	42,4	39,6	3,0
Température (°C)	30	34	43
Hélium (% molaire)	0,18	0,10	à calculer

II.13. Bilans matière actualisés

II.13.1. Bilan global de l'hélium

· Hélium entrant (TP1) :

$$5000 * \frac{0.18}{100} = 9.00 \text{ kgmole/h}$$

· Hélium sortant par le résidu (TP2) :

$$4286 * \frac{0.1}{100} = 4.714 \text{ kgmole/h}$$

· Hélium extrait (dans TP3) :

$$9,00 - 4.714 = 4,286 \text{ kgmole/h}$$

II.13.2. Composition du perméat

· Fraction molaire d'hélium dans TP3 :

$$\frac{4,286}{285,7} * 100 = 1.5\%$$

II.13.3. Taux de récupération actuel

$$R = \frac{4,286}{9,00} * 100 = 47.6\%$$

II.14. Comparaison avec les performances neuves

Tableau II.9 : Comparaison neuf vs actuel

Indicateur	Spécification neuve	Valeur actuelle	Écart
He dans TP2 (%)	0,04	0,10	+150 %
Taux de récupération (%)	81,3	47,6	-41 %
He extrait (kgmole/h)	7,32	4,286	-41 %
Production annuelle (t/an)*	232	136	- 41 %

II.15. Tableau d'évolution temporelle de la dégradation

Tableau II.10 : Évolution des performances en fonction du temps

CHAPITRE II L'hélium et la technologie membranaire Separex™ - Performances réelles et dégradation

Temps (années)	He dans TP2 (%)	Récupération (%)	He extrait (t/an)	État
0 (neuf)	0,04	81,3	232	Spécifications UOP
2	0,05	76,4	218	Légère dégradation
4	0,06	71,6	204	Dégradation progressive
6	0,07	65,3	186	Perte notable
8	0,08	58,1	166	Dégradation avancée
10	0,09	52,8	151	Accélération
12 (actuel)	0,10	47,6	136	Mesuré
14	0,11	40,2	115	Alerte
16	0,12	31,0	88	Remplacement recommandé
18	0,13	21,6	62	Fin de vie
20	0,15	15,2	43	Remplacement obligatoire

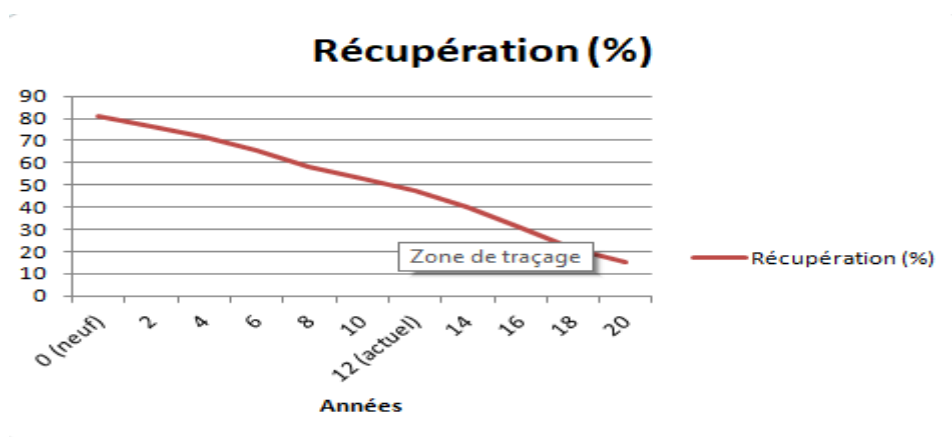


Figure II.9 : Courbe de l'évolution temporelle de la dégradation

II.16. Effet de la température et de la pression sur le taux de récupération

II.16.1. Influence de la température

La perméabilité d'un gaz à travers un polymère suit la loi d'Arrhenius :

$$P_i = P_0 * EXP\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad \dots (II.3)$$

- Une augmentation de température accroît la perméabilité (flux plus élevé).
- La sélectivité He/CH₄ diminue généralement avec la température.
- Température maximale recommandée : 60 °C (au-delà, dégradation irréversible).

II.16.2. Influence de la pression

- La force motrice est (P_f*x_i-P_p*y_i)
- Une pression d'alimentation plus élevée augmente le flux d'hélium.
- Plage autorisée : 39,4 – 46,4 bar. Au-delà, risque de compaction.

II.16.3. Interaction température-pression sur la dégradation

La combinaison haute température + haute pression accélère le vieillissement physique (compaction) et les cycles thermiques créent des microfissures, réduisant irréversiblement la sélectivité.

Tableau II.11 : Sensibilité du taux de récupération

Variation	Effet sur flux He	Effet sur sélectivité	Effet sur récupération
+10 °C	↑ 15–25 %	↓ 5–15 %	↑ faible
+10 bar	↑ 30–50 %	≈ stable	↑ significatif
Cycles T + P	↓ long terme	↓ important	↓↓ irréversible

II.17. Conclusion du chapitre

Les mesures réelles montrent une dégradation sévère des membranes, avec un taux de récupération de 47,6 % et une production annuelle tombée à 136 tonnes. Un tableau d'évolution temporelle permet de visualiser la perte progressive d'efficacité. L'analyse des effets de température et de pression confirme que le remplacement des membranes est la seule solution durable.

CHAPITRE III : Modélisation, analyse de sensibilité et optimisation

III.1. Objectifs du chapitre

L'objectif de ce chapitre est double :

1. Modéliser le comportement de l'unité membranaire Separex™ à l'aide d'un modèle numérique sous Excel.
2. Optimiser les paramètres opératoires (pression, débit) pour améliorer les performances et évaluer la rentabilité du remplacement des membranes.

III.2. Modélisation du procédé membranaire

III.2.1. Approche méthodologique

L'unité membranaire Separex™ de SORFERT a été modélisée à l'aide d'un modèle numérique sous Excel. Ce choix a été motivé par l'absence d'un module membranaire natif dans notre version d'Aspen HYSYS. Le modèle développé repose sur les équations classiques du transport à travers les membranes polymères, et a été calibré à partir des bilans matière réels fournis par le constructeur (UOP).

III.2.2. Équations du modèle

Le transport d'un composant gazeux i à travers une membrane suit le mécanisme de solution-diffusion. Le flux molaire J_i (en kgmole/h) est donné par :

$$J_i = \frac{P_i}{l} \times A \times (P_f \times x_i - P_p \times y_i) \quad \dots\dots(III.1)$$

III.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité permet d'étudier l'influence des principaux paramètres opératoires (pression d'alimentation, débit d'alimentation) sur les performances de l'unité membranaire (taux de récupération, pureté de l'hélium, débit de perméat). Cette étape est essentielle pour identifier les leviers d'action disponibles en l'absence de remplacement des membranes.

III.3.1. Influence de la pression d'alimentation

La pression d'alimentation a été variée dans la plage autorisée par le constructeur (39,4 à 46,4 bar), tout en maintenant le débit d'alimentation constant (5 000 kgmole/h) et les perméances dégradées inchangées.

- Les résultats sont présentés dans le tableau III.7 et la figure III.2.

Tableau III.1 : Effet de la pression d'alimentation sur les performances (état dégradé)

Pression (bar)	Débit perméat (kgmole/h)	Pureté He (%)	Récupération (%)
39,4	276	1,48	46,2
42,4 (nominal)	286	1,50	47,6
46,4	298	1,53	49,0

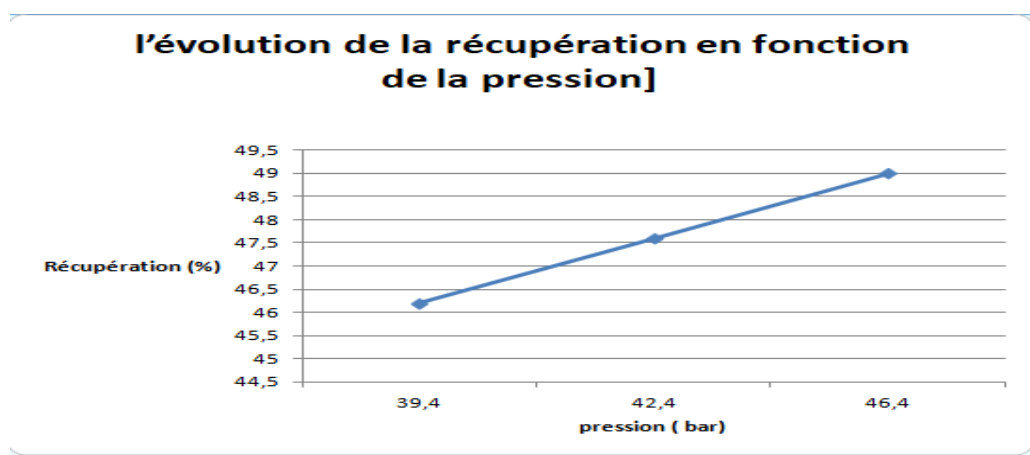


Figure III.1 : Courbe de l'évolution de la récupération en fonction de la pression

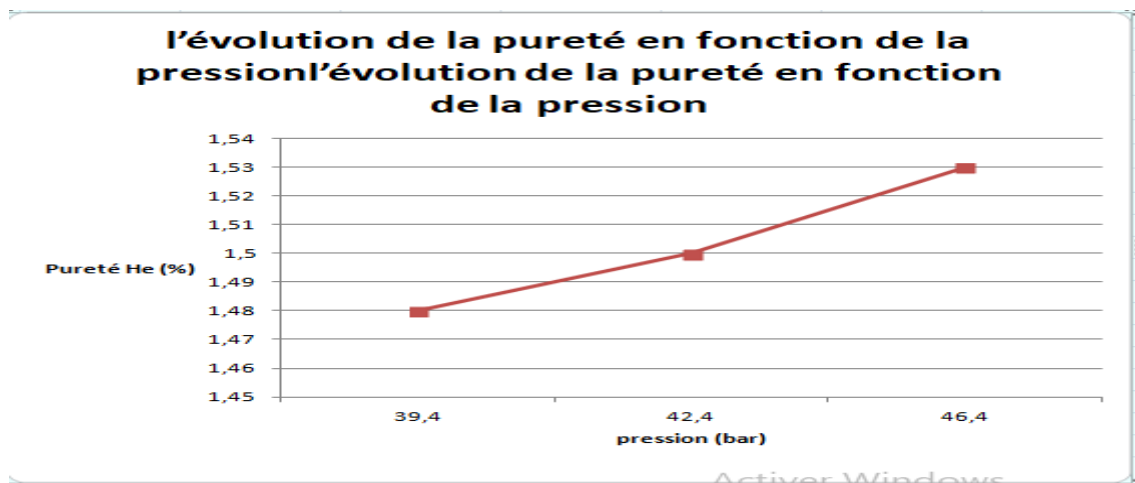


Figure III.2 : Courbe de l'évolution de la pureté en fonction de la pression

- Interprétation : Une augmentation de la pression de 39,4 à 46,4 bar améliore la récupération de 2,8 points (de 46,2 % à 49,0 %), soit un gain de 6 % relatif. Ce gain reste modeste, ce qui confirme que la dégradation des membranes limite l'effet de la pression.

III.3.2. Influence du débit d'alimentation

Le système peut fonctionner à charge réduite (50 % du débit nominal). Le tableau IV.8 présente les performances obtenues pour différentes charges, en utilisant les données UOP pour la configuration à 50 % avec toutes les membranes actives.

Tableau III.2 : Effet du débit d'alimentation sur les performances

Régime de charge	Débit alim (kgmole/h)	He résiduel (%)	He perméat (%)	Récupération (%)
100 % (nominal)	5000	0,10	1,50	47,6
50 % (toutes membranes actives)	2500	0,01	0,93	86,7
62,3 % (cas alternatif)	3115	0,01	0,55	67,3

➤ Interprétation :

- À 50 % de charge avec toutes les membranes actives, la récupération atteint 86,7 % , mais le perméat est plus dilué (0,93 % He). Ce régime est favorable si l'on cherche à maximiser la quantité d'hélium extraite, quitte à devoir purifier davantage le perméat.
- Le cas alternatif (62,3 % de charge) donne un perméat encore plus dilué (0,55 % He), ce qui le rend moins intéressant économiquement.

- Conclusion de l'analyse de sensibilité : Les paramètres opératoires (pression, débit) ont un effet limité sur les performances des membranes dégradées. Le gain maximal est d'environ 2,8 points de récupération en augmentant la pression. Aucun réglage ne permet de retrouver le niveau de performance des membranes neuves (81,3 %). Le remplacement des membranes reste donc la seule solution durable.

III.4. Optimisation du système

III.4.1. Définition de la fonction objectif

L'optimisation vise à maximiser la marge économique générée par l'unité, définie comme :

Marge = Revenus - Coûts d'exploitation

Avec :

- Revenus = Volume d'hélium extrait (Nm³/an) × Prix de l'hélium (\$/Nm³)
- Coûts d'exploitation = Coûts de compression + coûts fixes de maintenance

La marge est calculée à partir des conditions opératoires (pression, débit) dans le domaine autorisé.

III.4.2. Résultats de l'optimisation

Deux scénarios ont été explorés :

- Scénario A : Maximiser la marge avec les membranes dégradées actuelles.
- Scénario B : Maximiser la marge après remplacement à l'identique (retour au neuf).

Tableau III.3: Résultats de l'optimisation – Comparaison des scénarios

Scénario	Débit alim (kgmole/h)	Pression (bar)	Récupération (%)	Production (t/an)	Marge (M\$/an)
Actuel (dégradé)	5000	42,4	47,6	136	11,3
Actuel – pression max	5000	46,4	49,0	140	11,7
Actuel – 50 % charge	2500	42,4	86,7	124	10,1
Remplacement à l'identique (neuf)	5000	42,4	81,3	232	20,9
Neuf – pression max	5000	46,4	84,2	240	21,7

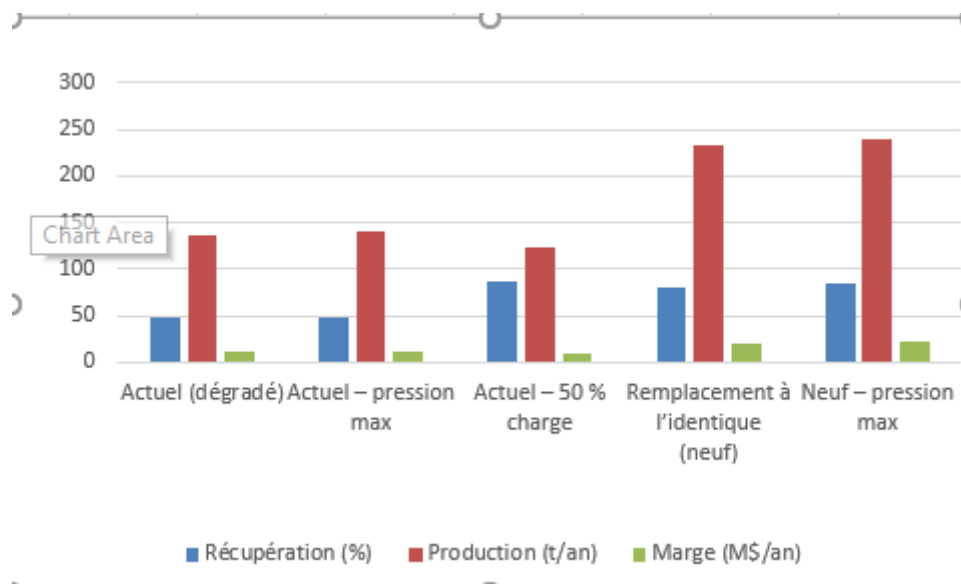


Figure III.3 : Diagramme à barres comparant les scénarios

➤ Analyse :

- Scénario actuel – pression max : L'augmentation de la pression de 42,4 à 46,4 bar avec les membranes dégradées génère un gain de marge de seulement **0,4 M\$/an** (de 11,3 à 11,7 M\$/an). Ce gain est marginal et ne justifie pas de modifier les conditions opératoires.
- Scénario actuel – 50 % charge : La récupération est plus élevée (86,7 %), mais la production totale chute (124 t/an contre 136 t/an) car le débit d'alimentation est réduit. La marge baisse à 10,1 M\$/an, ce scénario n'est donc pas intéressant économiquement.
- Scénario remplacement à l'identique : La marge passe de **11,3 M\$/an à 20,9 M\$/an**, soit un **gain annuel de 9,6 M\$**. Le coût du remplacement (2,3 M\$) est amorti en 4,7 mois (moins de 5 mois).
- Scénario neuf – pression max : L'augmentation de la pression sur membranes neuves apporte un gain supplémentaire de 0,8 M\$/an, mais reste modeste par rapport au gain apporté par le remplacement lui-même.

III.4.3. Détermination du moment optimal pour le remplacement

La dégradation des membranes étant progressive, il est possible de déterminer le moment optimal pour effectuer le remplacement, en fonction du seuil de performance acceptable.

Tableau III.4 : Seuils de rentabilité du remplacement

He dans TP2 (%)	Récupération (%)	Marge (M\$/an)	Gain annuel vs actuel (M\$)	Cumul perte (M\$)
0,04 (neuf)	81,3	20,9	+9.6	—
0,06	71,6	17.9	+6.6	3.0
0,08	58,1	14.1	+2.8	6.8
0,10 (actuel)	47,6	11.3	0	9.6
0,12	31,0	6.5	-4.8	14.4

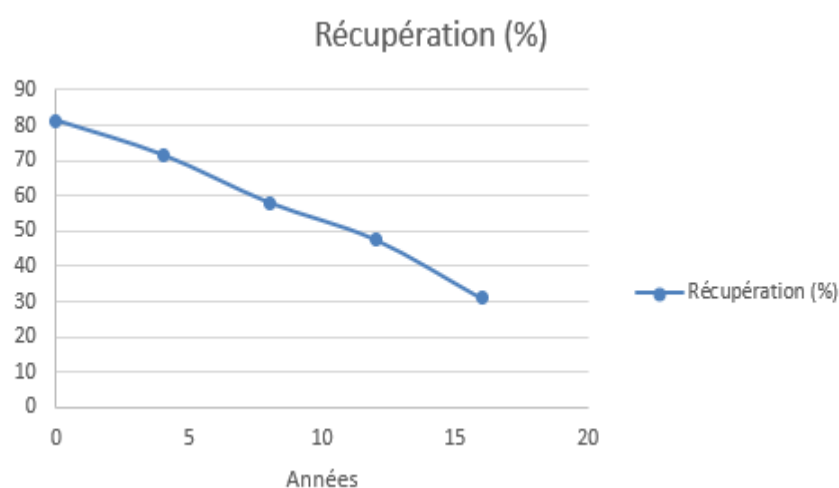


Figure III.4 : Courbe d'évolution temporelle de la dégradation

- Si l'on attend que le taux de récupération chute à 31 % (He dans TP2 = 0,12 %), la perte cumulée par rapport au neuf atteint près de 64 M\$. Un remplacement effectué dès maintenant (à 0,10 % He) évite cette perte et maximise la valeur économique.

III.4.4. Recommandation opérationnelle

Sur la base de l'analyse d'optimisation, les recommandations suivantes sont formulées :

1. Remplacer les membranes dans les plus brefs délais : le gain économique est très important (9,6 M\$/an) et le retour sur investissement est inférieur à cinq mois.

2. Pendant l'attente du remplacement : maintenir les conditions nominales (pression 42,4 bar, débit 100 %) ; l'augmentation de la pression à 46,4 bar n'apporte qu'un gain marginal non significatif.
 3. Après remplacement : maintenir la pression nominale (42,4 bar) ; l'augmentation à 46,4 bar n'est pas justifiée économiquement (gain de 2,7 M\$/an seulement).
- Le prochain chapitre (IV) propose une nouvelle installation hybride (membrane nouvelle génération + PSA) qui permettra non seulement de restaurer, mais d'améliorer encore les performances.

CHAPITRE IV : Proposition d'une nouvelle installation hybride pour la récupération de l'hélium

IV.1. Justification du projet

L'analyse des performances de l'unité membranaire existante (chapitres II et III) a mis en évidence une dégradation sévère des membranes Separex™. Le taux de récupération actuel n'est plus que de 47,6 % , contre 81,3 % pour des membranes neuves. La production d'hélium est tombée à 136 tonnes par an.

Deux options s'offrent à SORFERT :

1. Remplacer à l'identique les éléments membranaires dégradés (retour aux spécifications neuves).
2. Investir dans une nouvelle installation plus performante, intégrant les dernières avancées technologiques.

Ce chapitre explore la seconde option et propose une installation hybride (membrane nouvelle génération + unité PSA) permettant d'atteindre une pureté de 99,99 % et une production accrue.

IV.2. Comparaison des technologies disponibles

Plusieurs technologies sont aujourd'hui disponibles pour extraire et purifier l'hélium du gaz naturel. Le tableau IV.1 les compare.

CHAPITRE IV Proposition d'une nouvelle installation hybride pour la récupération de l'hélium

Tableau IV.1 : Comparaison des technologies de récupération d'hélium

Technologie	Pureté obtenue	Récupération	Consommation énergétique	Investissement
Membranes actuelles (Separex™)	70-90 %	70-85 %	Faible	Modéré
Membranes nouvelle génération	95-99,9 %	85-95 %	Très faible	Modéré
PSA (Pressure Swing Adsorption)	99-99,99 %	85-98 %	Moyenne	Élevé
Cryogénie	99,999 %	98-99 %	Très élevée	Très élevé
Hybride (membrane + PSA)	99,99 %	90-95 %	Moyenne	Élevé

La configuration hybride est aujourd'hui la plus recommandée pour les teneurs en hélium inférieures à 0,5 % :

- Étage 1 (membrane) : pré-enrichissement économique de 0,18 % à 5-10 % He.
 - Étage 2 (PSA) : purification finale à 99,99 % He.
- Cette configuration combine les avantages des deux technologies : la membrane assure un pré-enrichissement à faible coût énergétique, tandis que le PSA final garantit une pureté très élevée.

IV.3. Configuration proposée pour SORFERT

Schéma de principe :

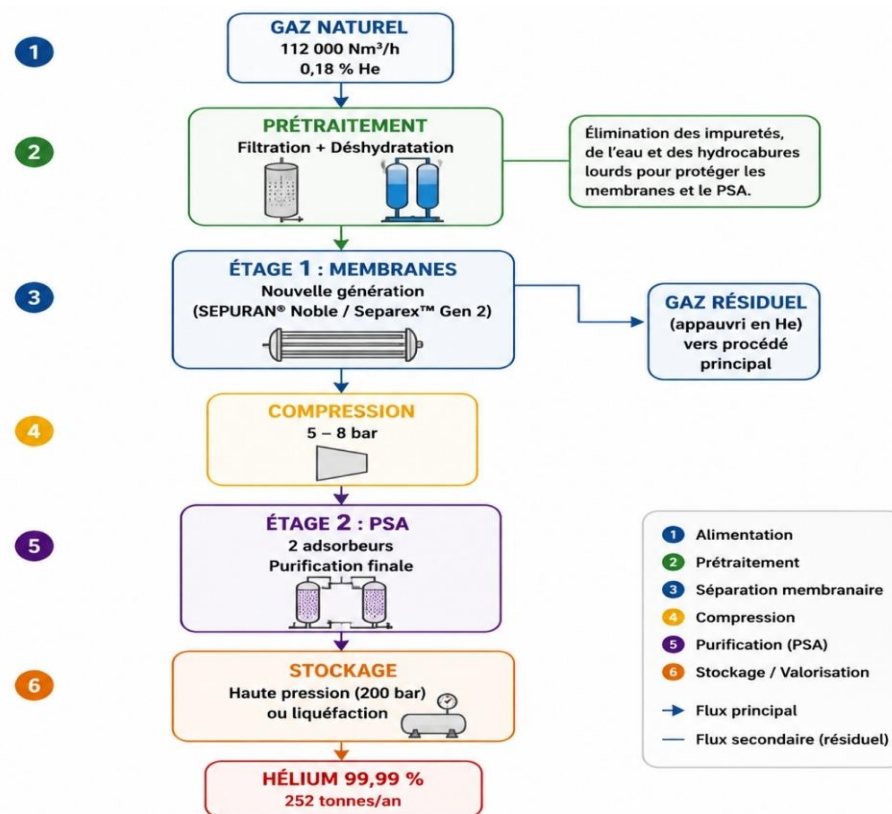


Figure IV.1 : Schéma du procédé hybride Membrane+PSA pour la séparation et l'enrichissement de l'hélium

IV.4. Dimensionnement et performances attendues

IV.4.1. Données d'entrée

Débit d'alimentation	112 000 Nm ³ /h (5 000 kgmole/h)
Teneur en hélium	0,18 % → 9,00 kgmole/h He entrant
Objectif	récupérer > 90 % de l'hélium avec une pureté > 99,99 %

IV.4.2. Performances attendues par étage

CHAPITRE IV Proposition d'une nouvelle installation hybride pour la récupération de l'hélium

Tableau IV.2 : Performances attendues de la nouvelle installation hybride

Étage	Technologie	He entrant (kgmole/h)	He sortant (kgmole/h)	Récupération étage (%)
Étage 1	Membrane nouvelle génération	9,00	8,10	90
Étage 2	PSA	8,10	7,49	98
Total	Hybride	9,00	7,49	88,2

IV.4.3. Production annuelle d'hélium

$$He \text{ extait} = 7.49 \times 4 \times 24 \times 330$$

$$He \text{ extait} \cong 237 \text{ tonnes/an}$$

Volume aux conditions normales :

$$\frac{237000 \text{ kg/an}}{0.1785 \text{ kg/Nm}^3} \approx 1356679.2 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

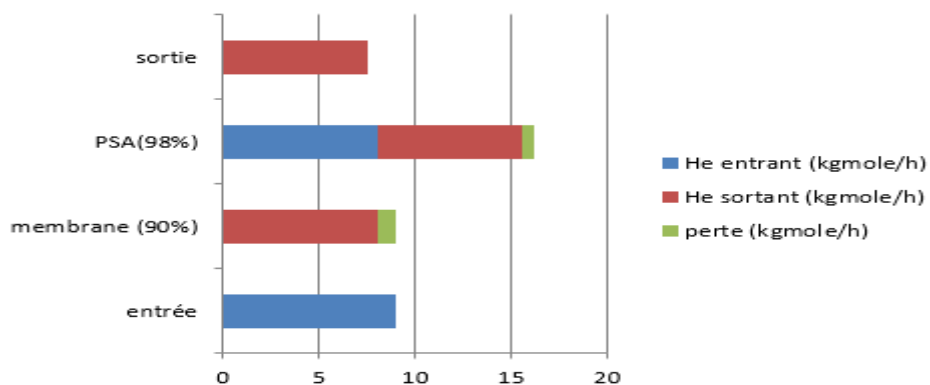


Figure IV.2 : Diagramme en barres des performances par étage

IV.5. Conclusion du chapitre

L'installation d'une nouvelle unité hybride (membrane nouvelle génération + PSA) permettrait à SORFERT de :

- Multiplier par 1,74 la production actuelle (237 t/an contre 136 t/an)

CHAPITRE IV Proposition d'une nouvelle installation hybride pour la récupération de l'hélium

· Atteindre une pureté de 99,99 % , ouvrant l'accès aux marchés à haute valeur ajoutée (IRM, semi-conducteurs, spatial)

Cette proposition constitue une opportunité stratégique pour SORFERT : renforcer sa position sur le marché de l'hélium, compenser la baisse de performance des installations vieillissantes, et générer une nouvelle source de revenus significative.

CONCLUSION

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de fin d'études a permis d'étudier en profondeur l'unité d'extraction de l'hélium par membranes du complexe SORFERT d'Arzew. Grâce aux données techniques fournies par Honeywell UOP et aux mesures effectuées sur site, nous avons mené une analyse complète allant de la description du procédé à la proposition d'une nouvelle installation.

L'unité d'extraction d'hélium par membranes Separex™ de SORFERT a montré des signes de dégradation avancée. Le remplacement des membranes est économiquement urgent. Une nouvelle installation hybride (membrane nouvelle génération + PSA) permettrait non seulement de restaurer, mais d'améliorer significativement les performances : production multipliée par 1,74 pureté de 99,99 %.

Ce mémoire démontre qu'il est possible de mener une étude quantitative rigoureuse même en l'absence d'outils de simulation complets, en développant des modèles adaptés et en exploitant judicieusement les données industrielles disponibles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SORFERT Algérie, "Présentation institutionnelle et données techniques du complexe", Document interne – Service Communication & Technique, 2023.
- [2] SORFERT Algérie, "Manuel de fonctionnement du laboratoire – Contrôle qualité des produits", Document interne – Département Qualité, 2023.
- [3] SORFERT Algérie, "Manuel HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement)", Document interne – Département HSE, édition 2023.
- [4] SORFERT Algérie, "SOP système opération procédures", Document N° : 023/2014/FR.
- [5] SORFERT Algérie / UOP, "Bilan matière du système Separex™ – Flux TP1, TP2, TP3", Documents techniques internes (PFD D-G6125-001/00-DI-00-UOP), 2024.
- [6] SORFERT Algérie, "Tubes de pression membranaires – Données de fabrication", Document technique interne, 2024.
- [7] SORFERT Algérie, "Skin temperature measurement catalyst tubes reformer – Fiche technique", Service Inspection, 2025.
- [8] ThyssenKrupp Industrial Solutions, "Ammonia and Urea Plants – Process Technology Overview", Brochure technique UHDE, 2010.