

	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 DEMASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie Chimique

Thème

**Procédés de production de l'hélium par élimination de l'hydrogène au
niveau de HELIOS**

Présenté par : **Amar Abdelkrim**

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

Présidente :	Dr. Belkafouf Nour El Houda	MCB	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Dr. Mezouagh Amina	MCA	Université de Mostaganem
Encadrant :	Dr. Saidj Merzouk	MCA	Université de Mostaganem

Année universitaire 2024/ 2025

Remerciements

Je rends grâce à Allah pour m'avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents pour leur amour, leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de mon parcours. Un grand merci également à mes frères et sœurs pour leur présence et leur motivation inestimable.

*Je remercie tout particulièrement **Dr. Saidj**, mon encadrant, pour son accompagnement, ses conseils pertinents et sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*J'exprime ma gratitude à Madame **MEZOUAGH Amina** pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements chaleureux s'adressent aussi à Madame **BELKAFOUF Nour El Houda** pour m'avoir honoré par sa présence en tant que présidente du jury.*

Ainsi que mes amies, dont la présence et les encouragements ont été une véritable source de motivation tout au long de ce parcours.

*Mes remerciements vont aussi à **Monsieur Fouzi**, pour son accueil chaleureux, sa bienveillance et l'aide précieuse qu'il m'a apportée au sein de l'entreprise.*

Son soutien m'a permis de mieux comprendre le milieu professionnel et d'enrichir significativement mon expérience.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à ma famille, dont l'amour et le soutien inconditionnels ont été ma force tout au long de ce parcours.

À mes parents, pour leurs sacrifices, leur patience et leurs encouragements constants.

À mon frère et à ma sœur, pour leur présence rassurante, leurs mots d'encouragement et leur confiance en moi.

À mes ami(e)s, pour leur soutien, leurs conseils et leur réconfort dans les moments difficiles.

Et à tous ceux qui ont cru en moi, même quand moi-même je doutais.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers des personnes chères qui ont marqué ce parcours par leur engagement, leur amitié et leur bienveillance.

*A **Monsieur Saidj** pour son assistance, son encouragement et ses conseils précieux.*

*Et à toute l'équipe de **Monsieur Fouzi** (Hélios), pour leur accueil chaleureux, leur professionnalisme et leur esprit d'équipe.*

Merci à vous tous d'avoir fait partie de cette aventure.

Résumé

ملخص

تركز هذه الأطروحة على إزالة الهيدروجين في عملية إنتاج الهليوم داخل مجمع هيليوس. إن وجود الهيدروجين في الهليوم قد يؤدي إلى تغيير نقائه ويسبب مشاكل في بعض التطبيقات الصناعية. وقد تمت دراسة العديد من طرق التنقية، بما في ذلك الامتزاز الانتقائي وعملية نيكوكس، التي تعتمد على التفاعل التحفيزي بين الهيدروجين والأكسجين. بعد عرض شركة هيليوس وخصائص الهيليوم والهيدروجين (الفصل الأول)، تتناول الرسالة عملية الإنتاج وتقنيات الفصل المستخدمة (الفصل الثاني)، ثم تحلل النتائج التي تم الحصول عليها (الفصل الثالث) وتؤكد الدراسة فعالية الطرق المستخدمة للحصول على الهليوم عالي النقاء والذي يلبي المتطلبات الصناعية.

Abstract

This thesis focuses on the removal of hydrogen from the helium production process at the Hélios complex. The presence of hydrogen in helium can compromise its purity and lead to performance issues in sensitive industrial applications. Several purification methods are examined, including selective adsorption, using materials such as activated carbon, zeolites, and molecular sieves, and the Niox process, which relies on a catalytic reaction between hydrogen and oxygen to convert hydrogen into water, leaving helium unaffected. Following an introduction to the Hélios Company and a review of the fundamental properties of helium and hydrogen (Chapter I), the study details the helium production process and purification techniques used (Chapter II), and presents the results and analysis (Chapter III). The findings demonstrate the effectiveness of these methods in achieving high-purity helium, meeting industrial quality standards.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'élimination de l'hydrogène dans le processus de production d'hélium au sein du complexe Hélios. La présence d'hydrogène dans l'hélium peut altérer sa pureté et poser problème dans certaines applications industrielles. Plusieurs méthodes de purification ont été étudiées, notamment l'adsorption sélective et le procédé Niox, basé sur une réaction catalytique entre l'hydrogène et l'oxygène. Après une présentation de l'entreprise Hélios et des propriétés de l'hélium et de l'hydrogène (chapitre I), le mémoire détaille le procédé de production et les techniques de séparation mises en œuvre (chapitre II), puis analyse les résultats obtenus (chapitre III).

L'étude confirme l'efficacité des méthodes utilisées pour obtenir un hélium de haute pureté répondant aux exigences industrielles.

Sommaire

Remerciements.....	
Dédicaces.....	
Résumé.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction générale.....	-1-

Chapitre I: Présentation de l'entreprise HELIOS Et généralités sur l'hélium et l'hydrogène

I.1	Présentation de l'entreprise HELIOS	- 4 -
I.1.1	Historique	- 4 -
I.1.2	Domaine d'activité de l'usine HELIOS	- 5 -
I.2	Généralités sur l'hélium.....	- 7 -
I.2.1	Propriétés fondamentales.....	- 7 -
I.2.2	Caractéristiques physiques et chimiques	- 8 -
I.2.3	Provenance de l'hélium	- 9 -
I.2.4	Applications industrielles de l'hélium.....	- 9 -
I.3	Informations générales sur l'hydrogène	- 10 -
I.3.1	Généralités	- 10 -
I.3.2	Usage industriel.....	- 11 -
I.3.3	Comportements spécifiques.....	- 12 -

Chapitre II : Procédés de production d'hélium

II.1	Présentation opérationnelle du procédé de production.....	- 14 -
II.1.1	Purification de l'hélium.....	- 15 -
II.1.1.1	Etape de compression.....	-18-
II.1.1.2	La boîte froide	-19-
II.1.1.3	La cuve de séparation	-20-
II.1.2	Fonctionnement de l'adsorption sous pression (PSA)	- 18 -
II.1.2.1	Cycle d'adsorption sous pression	-21-
II.1.3	Étape de liquéfaction et stockage.....	- 20 -
II.2	Élimination de l'hydrogène par réaction catalytique	- 21 -
II.2.1	Technologie de NIXOX.....	- 21 -
II.2.2	Composantes du système NIXOX	- 24 -
II.2.2.1	Réacteur principal C124	-26-
II.2.2.2	Refroidisseur E126 (admission)	-27-
II.2.2.3	Echangeur thermique à eau glacée E127	-29-
II.2.2.4	Refroidisseur mécanique E128	-29-
II.2.2.5	Séparateur C125	-30-
II.2.3	Système de compression de l'air.....	- 28 -
II.2.3.1	Description détaillée	-31-
II.2.3.2	Récipients TSA C128A/B	-32-
II.2.3.3	Réchauffeur de régénération électrique E182	-33-
II.2.4	Prétraitement des gaz d'alimentation (cuves séchantes)	- 31 -
II.2.4.1	Fonctionnement du sous-système	-33-
II.2.4.2	Réservoirs TSA C140A/B	-34-

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1	Introduction	- 35 -
-------	--------------------	--------

III.2	Logiciel SCADA	- 35 -
III.3	Composition du mélange à l'entrée	- 36 -
III.4	Analyse des résultats	- 37 -
III.5	La composition du gaz après élimination d'hydrogène	- 39 -
III.6	Détermination de l'efficacité.....	- 40 -
III.7	Analyse de l'évolution de la concentration d'hydrogène (H ₂).....	- 41 -

Liste des figures

Figure I-1 : Plan de mass.....	-6-
Figure I-2 : Propriétés d'hélium.....	-7-
Figure I-3 : Propriétés d'hydrogène.....	-11-
Figure II-1 : Schéma des étapes de production d'hélium.....	-17-
Figure II-2 : Le compresseur de charge.....	-19-
Figure II-3 : La boîte froide.....	-20-
Figure II-4 : Adsorption sous pression (PSA).....	-21-
Figure II-5 : Schéma du system NIXOX.....	-23-
Figure II-6 : System NIXOX.....	-25-
Figure II-7 : Schéma de réacteur C124.....	-26-
Figure II-8 : Refroidisseur d'admission.....	-28-
Figure II-9 : Compresseur d'air NIXOX.....	-31-
Figure II-10 : Récipients d'adsorption TSA.....	-33-
Figure II-11 : Réservoir sécheurs TSA.....	-35-
Figure III-1 : Procédé de NIXOX.....	-39-
Figure III-2 : Le contrôle graphique au niveau du séparateur.....	-40-
Figure III-3 : Evolution de la concentration d'hydrogène (H ₂).....	-44-

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Caractéristique de l'hydrogène.....	-10-
Tableau I-2 : Usages industriels.....	-11-
Tableau II-1 : Caractéristiques du gaz de charge.....	-16-
Tableau II-2 : Eléments du réacteur C124.....	-27-
Tableau II-3 : Les fonctions principales des composantes de refroidisseur d'admission....	-28-
Tableau III-1 : Concentrations du mélange à l'entrée.....	-38-
Tableau III-2 : Les paramètres de contrôle du procédé NIXOX.....	-39-
Tableau III-3 : Concentrations du mélange à la sortie.....	-42-
Tableau III-4 : Différence entre l'entrée et la sortie de gaz de charge.....	-44-

Liste des abréviations

COGIZ : Société de conditionnement et de commercialisation des gaz industriels

EEV : Electronic Expansion Valve

GNL : Gaz naturel liquéfié

IHM : interface homme-machine

PSA : Adsorption sous pression

PHE : Plate Heat Exchanger

SPA : société de production d'hélium en Algérie

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

SIAD : société de fabrication des machines et pièces

TSA : Train de Séparation d'Air

TPSA: Temperature and Pressure Swing Adsorption

Introduction Générale

Dans un contexte industriel en constante évolution, la maîtrise des gaz rares et légers comme l'hélium et l'hydrogène représente un enjeu stratégique majeur pour de nombreux secteurs, allant de l'aérospatial à la médecine, en passant par la cryogénie, l'électronique et l'énergie. L'hélium, en raison de ses propriétés physiques exceptionnelles, est un gaz particulièrement recherché pour ses applications à haute valeur ajoutée. Toutefois, pour répondre aux exigences de pureté requises par l'industrie, une purification rigoureuse est nécessaire, notamment pour éliminer l'hydrogène, souvent présent comme impureté.

L'élimination de l'hydrogène constitue donc une étape cruciale dans le processus de purification de l'hélium. Deux méthodes sont couramment utilisées à cet effet : l'adsorption et la réaction catalytique. Chacune de ces technologies présente des avantages, des limites, et des contraintes spécifiques, particulièrement lorsque les quantités d'hydrogène à traiter sont importantes.

L'adsorption repose sur l'utilisation de matériaux capables de capter sélectivement les molécules d'hydrogène à leur surface. Cette technique permet d'atteindre des niveaux de pureté très élevés, jusqu'à quelques parties par million. Néanmoins, en présence de concentrations élevées d'hydrogène, la saturation rapide du matériau adsorbant peut limiter l'efficacité du procédé. De plus, certains adsorbants manquent de sélectivité, pouvant capter d'autres composants indésirables et nuire à la qualité de l'hélium purifié.

La réaction catalytique constitue une alternative efficace, reposant sur la transformation chimique de l'hydrogène, généralement en présence d'oxygène, en vapeur d'eau, sous l'action d'un catalyseur et à haute température. Cette méthode permet une élimination définitive de l'hydrogène, mais elle implique une gestion rigoureuse de l'oxygène utilisé, ce qui peut représenter un défi en termes de sécurité et d'infrastructure.

Ce mémoire s'articule autour de trois grands axes. Le premier chapitre présente les informations fondamentales sur l'hélium, l'hydrogène et le rôle de l'entreprise HELIOS. Le second chapitre est consacré aux procédés d'adsorption utilisés pour purifier l'hélium,

Introduction générale

notamment à travers la technologie PSA (Pressure Swing Adsorption). Enfin, le troisième chapitre propose une étude de cas concrète au sein de l'unité NIXOX, en analysant les différentes étapes du processus de purification et les équipements impliqués.

À travers cette étude, l'objectif est de mieux comprendre les enjeux techniques liés à la purification de l'hélium, tout en mettant en lumière les solutions mises en œuvre pour éliminer efficacement l'hydrogène, dans un souci de performance industrielle et de respect des normes de qualité.

Chapitre I

Présentation de l'entreprise HELIOS Et généralités sur l'hélium et l'hydrogène

Ce premier chapitre vise à poser les fondations nécessaires à la compréhension globale du projet en présentant d'une part l'entreprise HELIOS SPA, acteur central de cette étude, et d'autre part l'hélium, matière première au cœur de son activité. La partie introductive consacrée à HELIOS s'attarde sur son historique, son positionnement stratégique ainsi que son domaine d'intervention. Elle permet ainsi de cerner les ambitions industrielles et les spécificités de l'entreprise. Dans un second temps, l'attention est portée sur l'hélium et l'hydrogène. He est un gaz rare aux propriétés physiques et chimiques singulières, qui occupe une place cruciale dans plusieurs secteurs de pointe. À travers une approche structurée, cette section présente la définition de deux gaz, leurs principales caractéristiques, origines naturelles ainsi que les procédés techniques utilisés pour ses extractions. Les données industrielles liées à la consommation et leurs nombreuses applications seront également analysées pour mettre en lumière les enjeux économiques et technologiques qu'ils représentent. Ce cadre théorique et contextuel est essentiel pour comprendre les perspectives de développement de l'entreprise HELIOS dans ce domaine spécifique.

I.1 Présentation de l'entreprise HELIOS

I.1.1 Historique

HELIOS Spa est une société par actions, de droit algérien. Elle a été créée en avril 1991, suite à la signature d'un Protocole d'Accord en juillet 1990 entre SONATRACH (Algérie), AIR LIQUIDE (France) et AIR PRODUCTS AND CHEMICALS (Etats-Unis). Elle est actuellement détenue à 51% par SONATRACH et à 49% par HELAP, sa société française appartenant à 100% à AIR PRODUCTS. En 2016 Air Liquide s'est séparé de son partenaire Air Products celui-ci a racheté ses actions et est devenu actionnaire à 100% de HELAP. Le projet de la société a été lancé en 1992 et le démarrage s'est fait en 1995, la première goutte d'hélium a été produite en mars 1995 et la première expédition sur le marché européen a eu lieu en 1995. Son activité principale est la production de l'Hélium, qui représente 98% de son chiffre d'affaires et qui est destinée dans sa majorité à l'exportation à travers l'unique client.

L'Azote (2% de son chiffre d'affaires) est destiné au marché local à travers l'unique client : COGIZ (filiale de Sonatrach). [1]

Les principales dates :

Novembre 1991 : Signature du contrat Air Product and Chemical.

Septembre 1992 : Signature du Contrat EN. GPT

Octobre 1991 : Ouverture du chantier.

Avril 1994 : Démarrage de l'usine. [2]

Capacité de production :

L'usine est conçue pour produire, par année :

- 16.08 millions de normaux mètres-cube d'hélium (équivalents à 600 millions de cft)
- 33000 tonnes d'azote (liquide et gazeux)
- Capacité totale de stockage :
- 2 Bacs d'hélium liquide (2 x 113 500 litres).
- 2 Bacs d'azote liquide (2 x 75 000 litres).

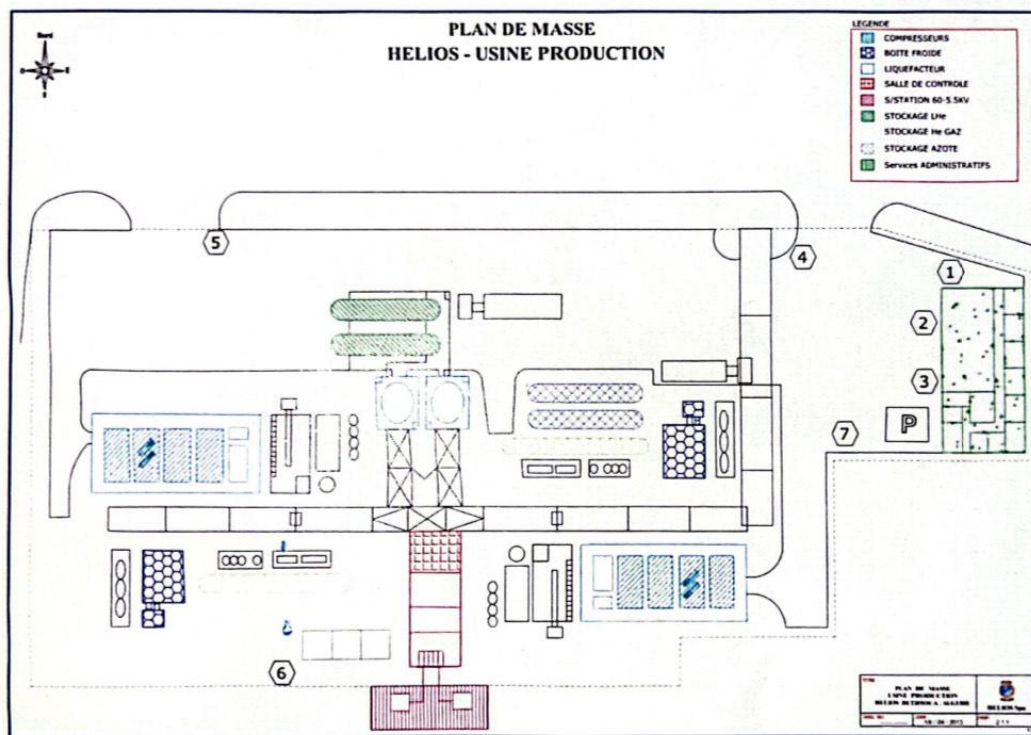
I.1.2 Domaine d'activité de l'usine HELIOS

Le processus industriel comprend l'extraction du gaz brut, sa purification, puis sa liquéfaction. L'hélium liquide ainsi obtenu est ensuite conditionné dans des citernes cryogéniques, stocké en extérieur, puis acheminé vers les clients. L'usine dispose de deux unités de traitement (trains) permettant la purification et la liquéfaction de l'hélium et de l'azote. Chaque train assure une production annuelle de 8,04 millions de mètres cubes normaux d'hélium liquide, 25 tonnes d'azote liquide, et 25 tonnes d'azote gazeux. Le gaz brut nécessaire est approvisionné par le complexe GNL2Z de Sonatrach.

L'usine comprend principalement :

1. Les canalisations du gaz de charge
2. Les boîtes froides (purificateurs)
3. Les compresseurs (9 par train)
4. Les séparateurs d'huile

5. Les pompes d'eau
6. Les réservoirs d'eau de refroidissement
7. Les transformateurs électriques 60 000 / 5500 V
8. Les liquéfacteurs d'hélium
9. Les salles de commutation électrique
10. Les unités PSA : tamis moléculaires
11. Un pont bascule de pesée des citernes d'azote liquide.
12. Un stockage d'azote liquide
13. Un stockage d'hélium liquide
14. Un bâtiment pour la sécurité, la maintenance et l'Administration
15. Des systèmes de détection feu et gaz.



FigureI-1 : Plan de masse

I.2 Généralités sur l'hélium

I.2.1 Propriétés fondamentales

L'hélium est un élément chimique classé dans la catégorie des gaz nobles du tableau périodique. De symbole He et de numéro atomique 2, il est le plus léger des gaz après l'hydrogène, mais il est nettement plus sûr en raison de sa non-inflammabilité. Il est monoatomique, ce qui signifie qu'il existe sous forme de particules uniques et non de molécules diatomiques comme l'hydrogène ou l'oxygène. Cette structure contribue à sa faible densité et à sa grande capacité de diffusion. Sa température d'ébullition de $-268,93\text{ °C}$ est la plus basse de tous les éléments, le rendant indispensable pour les applications nécessitant des températures proches du zéro absolu.

Sa stabilité chimique exceptionnelle découle de sa couche électronique complète, qui le rend pratiquement inerte, il ne réagit ni avec les acides ni avec les bases, ni même dans des conditions extrêmes. [3]

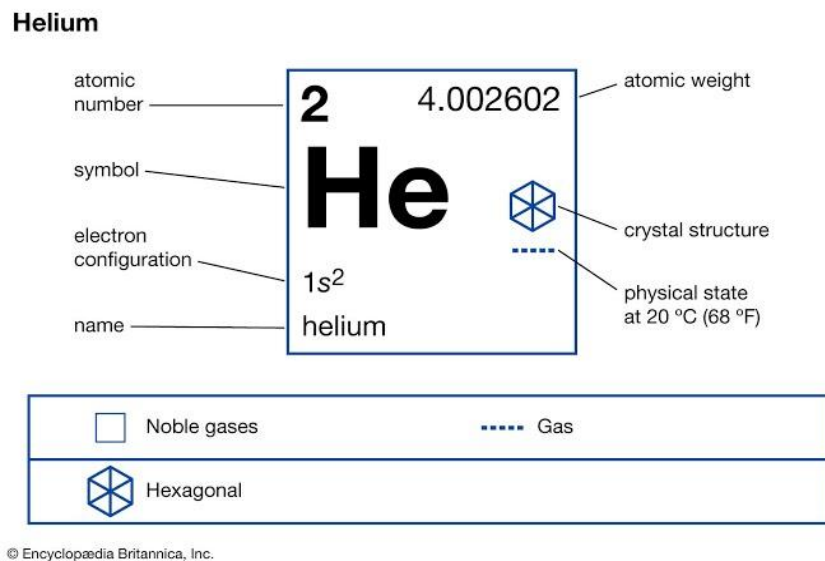


Figure I-2 : Propriétés d'hélium

I.2.2 Caractéristiques physiques et chimiques

A) Caractéristiques physiques de l'hélium :

- **État physique à température ambiante** : gaz
- **Couleur** : incolore
- **Odeur** : inodore
- **Goût** : insipide
- **Point d'ébullition** : $-268,93\text{ °C}$ ($4,2\text{ K}$) – c'est le point d'ébullition le plus bas de tous les éléments
- **Point de fusion** : $-272,2\text{ °C}$ ($0,95\text{ K}$) sous haute pression (car il ne gèle pas à pression atmosphérique normale)
- **Densité** : $0,1786\text{ g/L}$ à 0 °C et 1 atm (beaucoup plus léger que l'air)
- **Conductivité thermique** : très élevée à basse température
- **Masse moléculaire** : 4 (g/mol)

B) Caractéristiques chimiques de l'hélium :

- **Symbole chimique** : He
- **Numéro atomique** : 2
- **Configuration électronique** : $1s^2$
- **Groupe du tableau périodique** : 18 (gaz noble)
- **Réactivité chimique** : extrêmement faible – gaz inerte
- **Oxydation** : aucune (ne forme pas de composés chimiques stables dans des conditions normales)
- **Molécule diatomique** : non, il existe uniquement sous forme monoatomique (He)
- **Inflammabilité** : non inflammable
- **Composés connus** : très rares et instables [4]

I.2.3 Provenance de l'hélium

L'hélium est un gaz noble rare sur Terre, bien qu'il soit le deuxième élément le plus abondant dans l'univers après l'hydrogène. Sur notre planète, l'hélium ne se trouve pas en grande quantité dans l'atmosphère (environ 0,0005 % en volume), car sa légèreté lui permet de s'échapper dans l'espace. La majorité de l'hélium commercial provient des poches souterraines de gaz naturel. Ces gisements sont principalement situés dans des formations géologiques profondes où le gaz s'est accumulé pendant des millions d'années. L'hélium y est généré naturellement par la désintégration radioactive de certains éléments lourds comme l'uranium et le thorium, processus au cours duquel des particules alpha sont émises, ces particules sont en réalité des noyaux d'hélium.

Les principales réserves exploitables se trouvent dans :

- Les États-Unis (notamment au Texas, au Kansas et en Oklahoma)
- Le Qatar
- L'Algérie
- La Russie
- Le Canada

I.2.4 Applications industrielles de l'hélium

L'hélium est au cœur de nombreuses applications industrielles et scientifiques. Sa polyvalence s'explique par son inertie chimique, sa faible densité et ses propriétés thermiques uniques.

A) Secteur médical

L'un des usages majeurs de l'hélium est le refroidissement des aimants supraconducteurs utilisés dans les appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique). L'hélium liquide permet de maintenir ces aimants à une température proche du zéro absolu.

B) Industrie aérospatiale

L'hélium est utilisé pour purger les réservoirs de carburant, refroidir les instruments spatiaux et pressuriser les systèmes de propulsion. Sa non-réactivité et sa légèreté en font un gaz idéal pour les environnements sensibles et les missions orbitales.

C) Électronique et semi-conducteurs :

Dans la fabrication de semi-conducteurs et fibres optiques, l'hélium est utilisé comme atmosphère protectrice inerte, évitant toute contamination lors des procédés à haute température.

D) Détection de fuites :

Grâce à sa petite taille moléculaire, l'hélium est employé pour tester l'étanchéité de systèmes sous pression, notamment dans les secteurs nucléaires, pharmaceutique.

E) Recherche scientifique :

Utilisé comme fluide cryogénique dans des expériences de physique fondamentale. [5]

I.3 Informations générales sur l'hydrogène

I.3.1 Généralités

L'hydrogène est un gaz diatomique (H_2), incolore, inodore et hautement inflammable, représentant environ 75 % de la masse baryonique de l'univers. Sur Terre, il n'existe pas à l'état pur mais sous forme combinée, principalement dans l'eau (H_2O) et les hydrocarbures. C'est un vecteur énergétique prometteur en raison de sa densité énergétique massique élevée (120 MJ/kg), bien que sa faible densité volumique représente un défi logistique. [6]

Tableau I-1 : Caractéristique de l'hydrogène

Hydrogène	Caractéristiques
Formule chimique	H_2
Masse molaire	2,016 g/mol
Densité	Environ 0,08988 g/L (à 0 °C et 1 atm)
Point de fusion	-259,16 °C
Point d'ébullition	-252,87 °C
État à température ambiante	Gaz
Solubilité	Peu soluble dans l'eau
Couleur, odeur	Incolore, inodore, insipide
Conductivité thermique	Très élevée pour un gaz

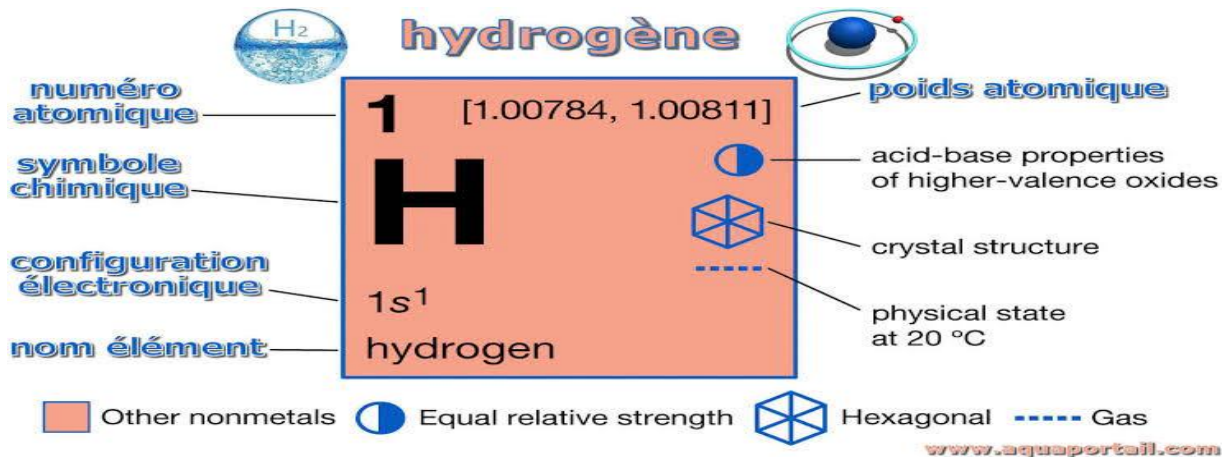


Figure I-3 : Propriétés d'hydrogène [7]

I.3.2 Usage industriel

I.3.3 Tableau I-2 : Usages industriels [8]

Secteur	Utilisation	Détail
Chimie	Synthèse de l'ammoniac NH ₃	Procédé Haber-Bosch pour engrais
	Hydrogénation d'huiles	Transformation des huiles liquides en graisses solides
	Production de méthanol (CH ₃ OH)	Intermédiaire chimique important
Métallurgie	Réduction des minerais métallique	Remplacement du carbone pour obtenir des métaux purs
	Traitement thermique des métaux	Protection contre l'oxydation (Atmosphère réductrice)
Pétrochimie	Raffinage de pétrole	Hydrocraquage et désulfuration des carburants
Energie	Carburant pour fusées	H ₂ liquide avec O ₂ (Moteur cryogénique)

I.3.4 Comportements spécifiques

A) Inflammabilité

- L'hydrogène est hautement inflammable, il s'enflamme à des concentrations de 4 % à 75 dans l'air.
- La température d'auto-inflammation est environ 560 °C.
- Mélangé avec de l'air ou de l'oxygène, il peut exploser violemment.
- Dissipation rapide dans l'atmosphère ouverte (car il est léger), ce qui réduit parfois les risques par rapport aux hydrocarbures.

B) Diffusivité

- L'hydrogène est le gaz le plus diffusif, car Il passe très facilement à travers des matériaux solides (acier, polymères non spéciaux).
- Problèmes : pertes de gaz, risques de fuite, fragilisation des matériaux.

C) Fragilisation des matériaux

- Fragilisation par l'hydrogène : à cause de son infiltration dans les métaux, l'hydrogène peut affaiblir certaines structures métalliques (ex : aciers, titane).

D) Réactivité chimique

- L'hydrogène est un réducteur très puissant. On cite la réduction des oxydes métalliques (Exemple : $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}$).
- Réagit avec de nombreux éléments : Fluor (très violent), Chlore (explosif sous lumière), Oxygène et composés organiques.

E) Cryogénie

- À très basse température (-253 °C), l'hydrogène devient liquide.
- L'hydrogène liquide est utilisé dans :
 - Fusées (carburant cryogénique)
 - Applications de stockage énergétique

F) Stockage :

- Sous forme gazeuse à haute pression (200-700 bars)
- Sous forme liquide à très basses températures (-253 °C)
- Stockage solide dans des hydrures métalliques (applications en piles à combustible) [9]

Chapitre II

Procédés de production d'hélium

II.1 Présentation opérationnelle du procédé de production

L'usine Hélios dispose de deux trains de production, chacun constitué d'un purificateur d'hélium brut, d'un liquéfacteur d'hélium, ainsi que de stations dédiées au stockage et au chargement de l'hélium liquide et de l'azote liquide. Le pilotage et la supervision de l'ensemble des opérations sont assurés par un système de contrôle distribué.

La matière première, appelée gaz de charge, provient du complexe GNL2Z et GNL3Z et de la société SONATRACH, producteur de gaz naturel liquéfié, où l'usine Hélios est implantée. Les caractéristiques du gaz de charge sont données par le tableau II.1.

Tableau II.1 : Caractéristiques du gaz de charge

Constituants du gaz de charge (% mol)	Charge maigre en He	Charge riche en He
Hélium 13,25	8,82	13,24
Azote 45,12	41,00	40,98
Méthane 50,15	50,15	45,75
Ethane 0,04	0,03	0,03

Le gaz traité est d'abord mélangé à un flux de recyclage provenant de l'unité PSA, puis comprimé à 22 bars absolus, ce qui permet à la fois son conditionnement et l'élimination des résidus d'huile. Il est ensuite acheminé vers la boîte froide du purificateur, où s'effectue la séparation cryogénique des principaux composants : hélium, méthane et azote.

Le méthane est dirigé vers le collecteur de gaz combustible du complexe GNL2Z, tandis qu'environ 50 % de l'azote est purifié, liquéfié et stocké. Une partie de cet azote est utilisée pour la réfrigération interne de l'installation, le reste étant livré à la société COGIZ pour distribution vers les complexes industriels d'Arzew. [1]

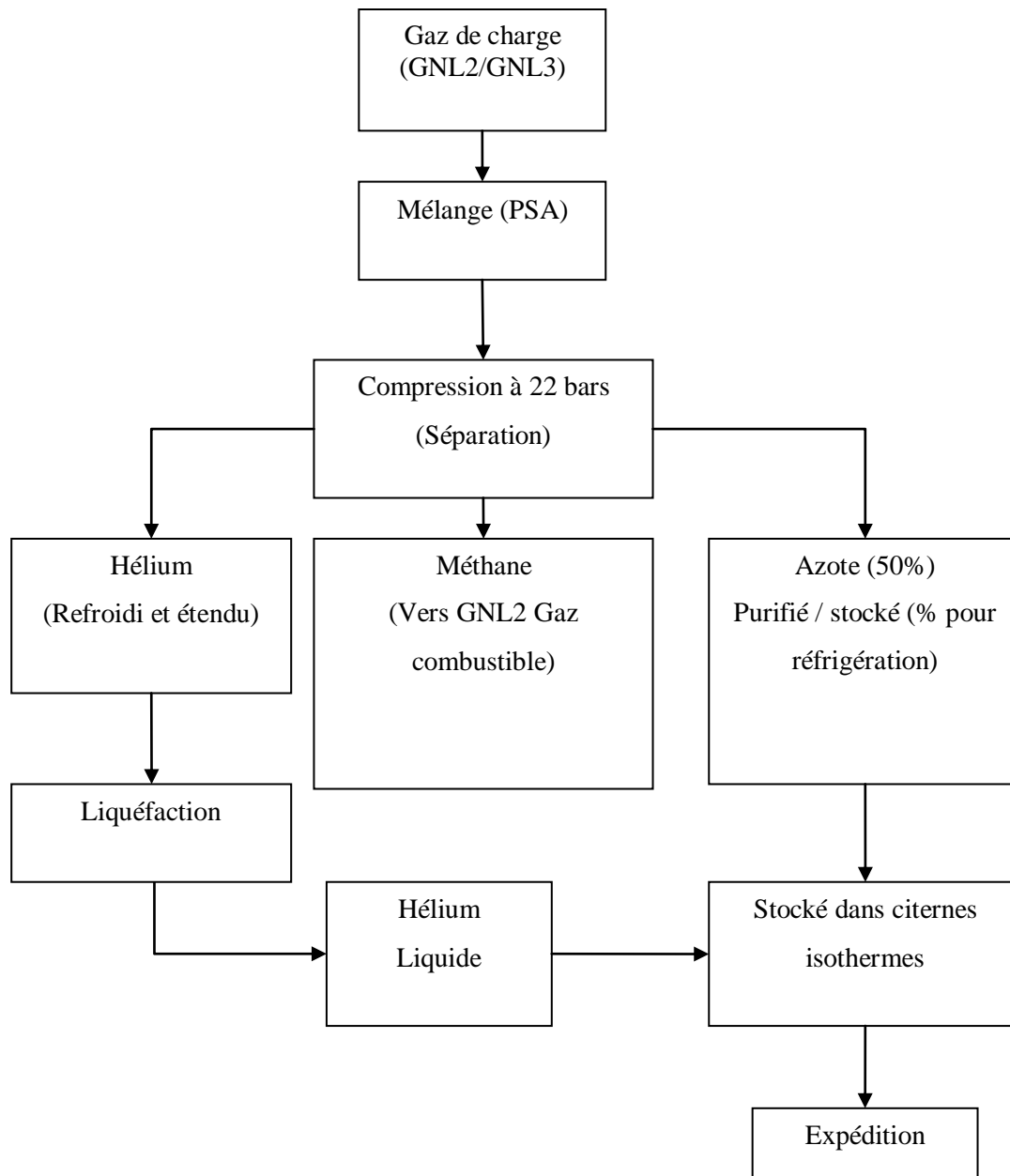


Figure II.1 : Schéma des étapes de production d'hélium

II.1.1 Purification de l'hélium

Le processus de purification de l'hélium repose sur une architecture intégrée combinant compression, refroidissement, séparation cryogénique et adsorption. Le gaz brut, composé d'un mélange de gaz de charge, de gaz recyclé (azote) et d'effluents PSA, est d'abord

comprimé, tandis que l'huile et les particules sont éliminées par un système de filtration. Le cœur du procédé est constitué de boîtes froides (une par train), contenant des échangeurs de chaleur, condenseurs, séparateurs et turbines de détente. Dans cette section, le gaz est progressivement refroidi, partiellement liquéfié, puis séparé en trois composants principaux : hélium, azote et méthane.

La purification finale est assurée par un système d'adsorption tournante, composé de quatre colonnes et d'un réservoir tampon. Une seule colonne est active à la fois, les autres étant en phase de régénération. Les gaz transités sont ensuite réinjectés pour un traitement complémentaire, L'hélium purifié est dirigé vers le liquéfacteur, où il est refroidi et transformé en hélium liquide, prêt à être stocké ou expédié. [10]

L'azote séparé est réparti entre :

- une partie gazeuse, envoyée à la société GOGIZ pour distribution industrielle,
- une partie liquide, stockée en réservoirs, destinée à l'exportation ou à l'usage interne.

Enfin, le résidu gazeux, principalement constitué de méthane et d'éthane, est récupéré et transféré vers le réseau de gaz combustible du complexe GNL2Z, opéré par Sonatrach

II.1.1.1 Etape de compression

Le compresseur de charge a pour rôle de porter le mélange gazeux issu du processus à une pression d'environ 22bars absolus. Ce gaz comprimé est ensuite dirigé vers le bâti d'extraction d'huile, où il subit un traitement de purification et de filtration.

L'équipement est composé des éléments suivants :

- Un compresseur à vis lubrifié à l'huile, assurant la compression efficace du gaz
- Un séparateur d'huile de type coalescent, permettant la récupération des particules huileuses
- Une pompe à huile, garantissant la circulation du fluide lubrifiant
- Des filtres à huile, assurant la propreté du circuit de lubrification
- Des moteurs d'entraînement, pilotant les organes mécaniques
- Un refroidisseur en aval, destiné à abaisser la température du gaz comprimé
- Un refroidisseur d'huile, pour maintenir une température optimale du lubrifiant

- Un réchauffeur d'huile, facilitant le démarrage et le maintien de la viscosité de l'huile en conditions froid [1]



Figure II-2 : Le compresseur de charge

II.1.1.2 La boîte froide (Purificateur)

La boîte froide est un ensemble d'équipements intégrés comprenant des échangeurs de chaleur et des cuves de séparation/condensation, destinés à refroidir puis à liquéfier le gaz de charge. Le processus de séparation, déjà détaillé précédemment, permet d'isoler l'azote du méthane.

Grâce à un transfert thermique par condensation, des vapeurs froides sont générées. Le flux de charge est ainsi progressivement refroidi dans les échangeurs de chaleur jusqu'à la condensation de la majeure partie du méthane. Ce flux biphasé est ensuite dirigé vers la colonne de séparation de l'azote. Le liquide, riche en méthane, s'accumule au fond de la colonne et est redirigé vers les échangeurs. Par ailleurs, les vapeurs d'hélium et d'azote qui montent dans la cuve via le passage A sont lavées à l'aide du liquide froid condensé dans l'échangeur. Au sein de la boîte froide, le gaz de charge est successivement refroidi et condensé, aboutissant à la séparation de ses trois principaux constituants : l'hélium, l'azote et le méthane.

Les équipements intégrés dans la boîte froide comprennent :

- Échangeur de chaleur à cœur chaud
- Échangeur de chaleur à cœur froid.
- Colonne de séparation de l'azote
- Détendeur haute pression (HP)
- Échangeur à cœur condenseur
- Séparateur d'hélium brut
- Séparateur de combustible/recyclage [1]



FigureII-3 : La boîte froide

II.1.1.3 La cuve de séparation

La cuve de séparation permet d'extraire le liquide condensé du flux gazeux. Le gaz y est ralenti, favorisant la décantation des gouttelettes, tandis que la vapeur purifiée est évacuée par le haut. Chaque boîte froide contient trois cuves similaires. La réfrigération nécessaire est assurée par la détente de l'hélium haute pression en deux étapes, abaissant la pression jusqu'à 2,4 bars. [1]

II.1.2 Fonctionnement de l'adsorption sous pression (PSA)

L'adsorption est un procédé de séparation en phase gazeuse où des molécules se fixent à la surface d'un solide sans y pénétrer. Utilisée dans la purification de l'hélium, la méthode PSA

(adsorption sous pression) permet de retenir les impuretés comme l'azote et le méthane, tandis que l'hélium, non adsorbé, est dirigé vers la liquéfaction.

Ce procédé permet d'obtenir un gaz d'une pureté exceptionnelle, atteignant 99,95 % d'hélium, condition nécessaire à sa liquéfaction. [1]



Figure II-4 : Adsorption sous pression (PSA)

II.1.2.1 Cycle d'adsorption sous pression

Le cycle PSA fonctionne sur un principe séquentiel comportant sept phases principales, que chaque cuve traverse successivement. Les cuves suivent une rotation selon la séquence :

A → B → C → D. Cette organisation assure la continuité du traitement tout en permettant la régénération des lits adsorbants.

Les phases typiques d'un cycle sont :

- 1. Phase d'adsorption :** la cuve reçoit le gaz à purifier. Les composants indésirables (azote, méthane) sont adsorbés par le matériau à l'intérieur de la cuve. Seul l'hélium pur traverse le lit et poursuit son chemin vers le liquéfacteur.
- 2. Décompression :** la pression dans la cuve est réduite pour amorcer la désorption des impuretés captées.
- 3. Purge :** un flux d'hélium propre est injecté en contre-courant pour chasser les gaz résiduels restés dans le lit.
- 4. Détente finale :** la cuve atteint une pression basse permettant d'évacuer les derniers résidus.

5. Remontée en pression partielle : la pression est progressivement augmentée avec un gaz neutre ou purifié.

6. Équilibrage de pression : la cuve est mise en pression par communication avec une autre cuve en phase opposée.

7. Ré-pressurisation finale : la cuve atteint à nouveau la pression nominale de fonctionnement. [1]

II.1.3 Étape de liquéfaction et stockage

La liquéfaction de l'hélium est une opération de transformation thermodynamique visant à convertir l'hélium gazeux, à température ambiante, en liquide cryogénique à environ -269 °C . Cette transformation nécessite l'extraction d'une quantité importante d'énergie thermique, réalisée grâce à un cycle de refroidissement complexe appelé cycle de Dalton.

Ce cycle comprend quatre étapes fondamentales :

1. Compression de l'hélium : le gaz est d'abord comprimé à haute pression.

2. Refroidissement par échange thermique : l'hélium haute pression est ensuite refroidi par échange thermique avec l'hélium basse pression.

3. Détente avec production de travail : l'hélium subit une détente contrôlée, générant un travail mécanique.

4. Réchauffement de l'hélium détendu : le gaz à basse pression est réchauffé par l'hélium haute pression, permettant la continuité du cycle.

Le processus de refroidissement s'effectue de manière progressive via cinq turbo détendeurs et trois échangeurs thermiques multi-passes. Le premier palier de refroidissement amène le gaz à environ -200 °C , température à laquelle l'hélium passe sur un lit de tamis moléculaires. Ce lit a pour fonction d'éliminer, par adsorption, les dernières traces d'azote.

Ensuite, le gaz est refroidi à -250 °C , puis filtré à travers un lit de charbon actif, destiné à adsorber les résidus de néon et d'hydrogène. À l'issue de cette étape, l'hélium atteint une pureté de 99,99 %.

La dernière étape est le stockage. Lorsque l'hélium atteint sa température de liquéfaction, soit -269 °C , il est acheminé vers des réservoirs isolés conçus pour son stockage en phase liquide.

À cette température, l'hélium est conservé sous une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique pour éviter toute évaporation incontrôlée. [11]

II.2 Élimination de l'hydrogène par réaction catalytique

II.2.1 Technologie de NIXOX

L'unité Helios ne fonctionne actuellement qu'avec un seul train de production d'hélium, en raison d'un manque de GNL2. Pour relancer le second train, l'utilisation du GNL3 est envisagée, bien qu'il contienne une concentration élevée en hydrogène, incompatible avec les procédés classiques de liquéfaction. La technologie NIXOX est proposée comme solution efficace : elle repose sur une réaction catalytique entre l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'eau, éliminant ainsi l'excès d'hydrogène. Ce procédé évite la saturation des adsorbants, améliore la pureté de l'hélium, et prolonge le fonctionnement des équipements. [1]

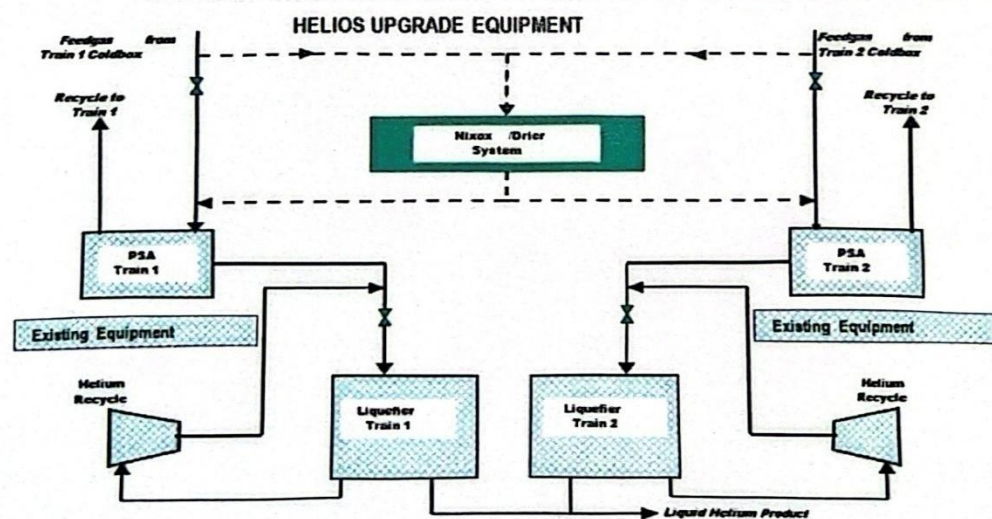


Figure II-5 : Schéma du system NIXOX

Le Traitement du gaz d'alimentation avec le system NIXOX se fait par les étapes suivantes :

- Gaz d'alimentation brut (riche en He + H₂)

Le gaz brut en provenance de GNL3 contient une forte proportion d'hélium, mais aussi un taux élevé d'hydrogène, ce qui pose problème pour la liquéfaction. Ce mélange constitue la charge d'alimentation du système de purification.

➤ **Réacteur catalytique**

De l'air ou de l'oxygène pur est injecté dans le flux gazeux. Le catalyseur présent dans le réacteur permet la réaction chimique suivante $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

Cette réaction transforme l'hydrogène en excès en vapeur d'eau avec une production de chaleur.

➤ **Séparateur liquide/gaz**

Après la réaction, le gaz passe dans un séparateur qui refroidit le mélange pour condensation de l'eau formée.

L'eau est extraite sous forme liquide, ce qui réduit considérablement l'humidité du gaz. Cette étape retire la majeure partie de l'eau produite dans le réacteur.

➤ **Sécheur à tamis moléculaire**

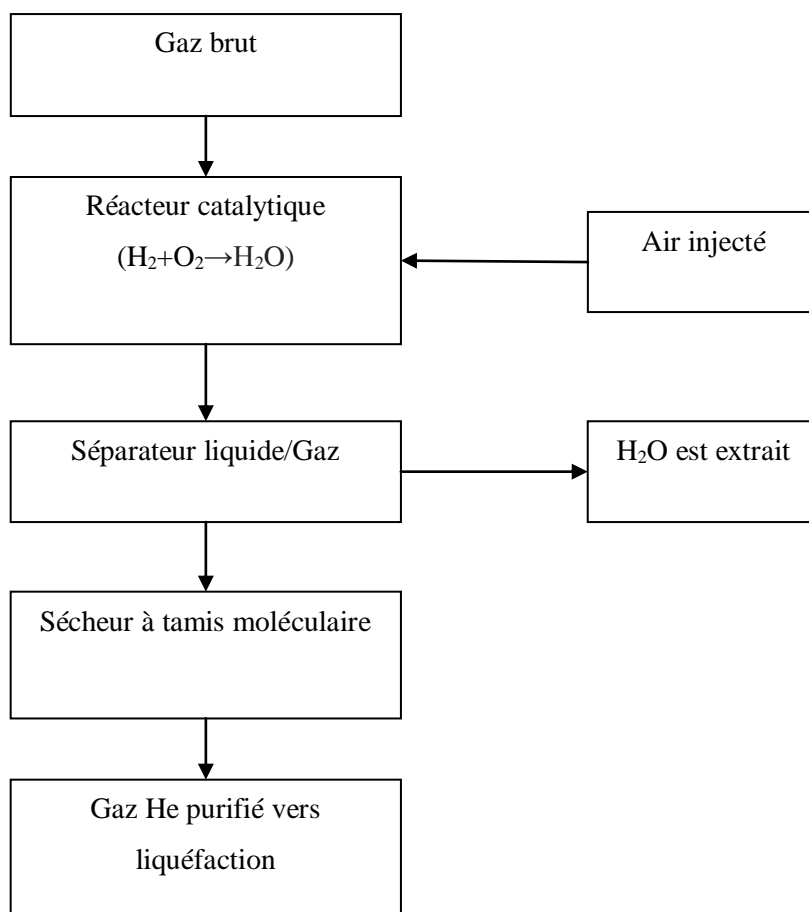
Malgré la séparation, une petite quantité de vapeur d'eau peut encore présente. Le gaz passe donc par un sécheur à tamis moléculaire, constitué de deux lits (fonctionnant en alternance : un en service, l'autre en régénération). Le tamis capte les molécules d'eau restantes par adsorption. Une fois saturé, le lit est régénéré avec du gaz chaud (souvent une fraction du gaz d'alimentation).

➤ **Gaz hélium purifié (He)**

Le gaz sortant est désormais appauvri en hydrogène et sec, donc prêt pour être liquéfié sans risque de formation de glace ou de dommages à l'installation cryogénique. Il est envoyé vers l'unité de liquéfaction d'hélium.



Figure II-6 : System NIXOX



II.2.2 Composantes du système NIXOX

II.2.2.1 Réacteur principal C124

Le réacteur C124 est un équipement à lit catalytique conçu pour éliminer l'hydrogène d'un flux gazeux par oxydation catalytique, formant de la vapeur d'eau selon la réaction : $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction exothermique nécessite un contrôle rigoureux de la température, car une concentration élevée en hydrogène peut générer une chaleur excessive, risquant d'endommager la cuve en acier au carbone (limite d'usage $\approx 450\text{ }^\circ\text{C}$).

Pour garantir la sécurité et la stabilité du système, plusieurs dispositifs sont intégrés :

- Boucliers de protection physique autour du réacteur,
- Tuyauterie résistante aux hautes températures,
- Analyseurs de gaz en ligne pour surveiller H_2/O_2 ,
- Capteurs de température internes reliés au système de contrôle-commande.

Ce système assure un fonctionnement sûr et efficace du procédé NIXOX pour la purification de l'hélium. [1]

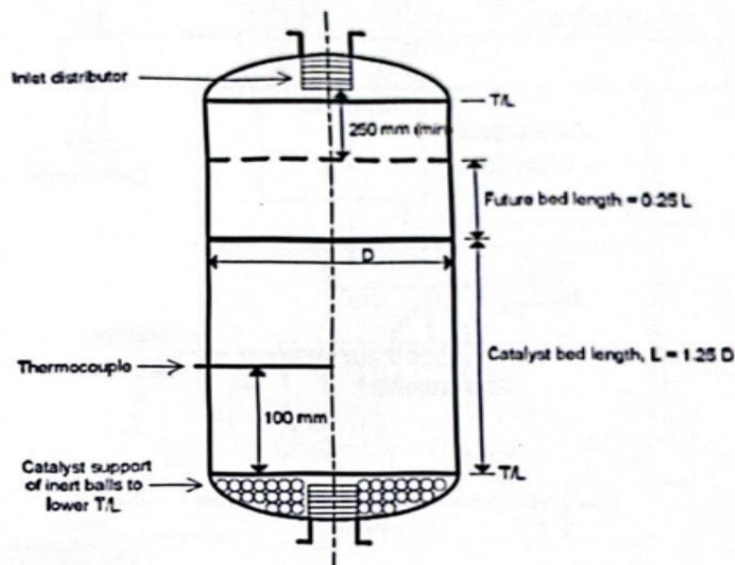


Figure II-7 : Schéma de réacteur C124

Tableau II-2 : Eléments du réacteur C124

Élément	Description
Inlet distributor (Distributeur d'entrée)	Point d'entrée du fluide réactif. Répartit le fluide uniformément dans le réacteur.
T/L (Épaisseur du lit de support)	Zones contenant des billes inertes, situées en haut et en bas. Soutiennent le catalyseur et améliorent la répartition des flux.
250 mm (min)	Distance minimale laissée vide au-dessus du lit catalytique pour expansion ou accumulation.
Future bed length = 0,25	Espace réservé à un futur lit catalytique. Représente 25 % de la longueur L actuelle.
Catalyst bed length, $L = 1,25 D$	Longueur principale du lit contenant le catalyseur actif. $L = 1,25 \times D$ (diamètre du réacteur).
Thermocouple	Capteur pour mesurer la température interne du réacteur.
100 mm	Distance entre le thermocouple et le support inférieur, assurant une lecture précise.
Catalyst support of inert balls	Support de billes inertes empêchant la chute du catalyseur et assurant une bonne distribution du fluide.

II.2.2.2 Refroidisseur E126 (admission)

Un refroidisseur d'admission, également appelé aftercooler, est un échangeur thermique conçu pour réduire la température d'un gaz comprimé (souvent de l'air ou du gaz naturel) avant son admission dans un procédé en aval, comme un réacteur catalytique, un compresseur secondaire ou une unité de séparation.

Il fonctionne selon le principe du refroidissement par convection forcée, où des ventilateurs soufflent de l'air ambiant sur des serpentins ou tubes ailettes contenant le gaz chaud. Cela permet :

- D'abaisser la température du fluide,

- D'améliorer l'efficacité énergétique du système,
- De condensation partielle de l'eau ou d'hydrocarbures lourds (dans le cas des gaz humides), [13]

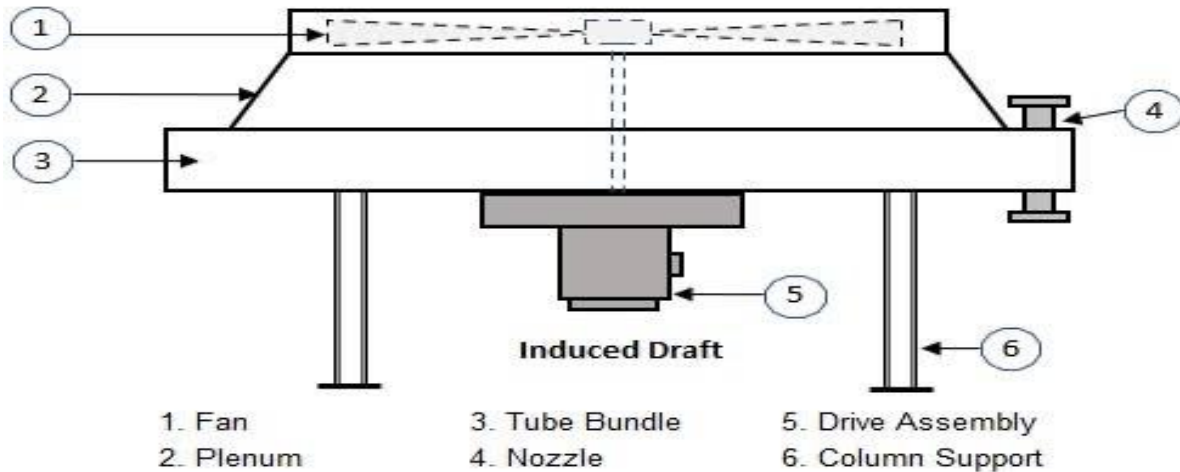


Figure II-8 : Refroidisseur d'admission

Tableau II-3 : Les fonctions principales des composantes de refroidisseur d'admission

Composante	Fonction principale
1. Fan (Ventilateur)	Aspire l'air ambiant vers le haut pour refroidir le fluide circulant dans les tubes.
2. Plenum (Chambre de mélange)	Canalise et répartit uniformément l'air aspiré vers le faisceau de tubes.
3. Tube Bundle (Faisceau de tubes)	Contient le fluide à refroidir ; l'air passe autour des tubes pour extraire la chaleur.
4.Nozzle (Buse)	Point d'entrée ou de sortie du fluide de procédé vers/depus le faisceau.
5. Drive Assembly (Ensemble d'entraînement)	Composé du moteur, de l'arbre et de la transmission qui actionne le ventilateur.
6. Column Support (Colonne de support)	Supporte mécaniquement toute la structure du refroidisseur.

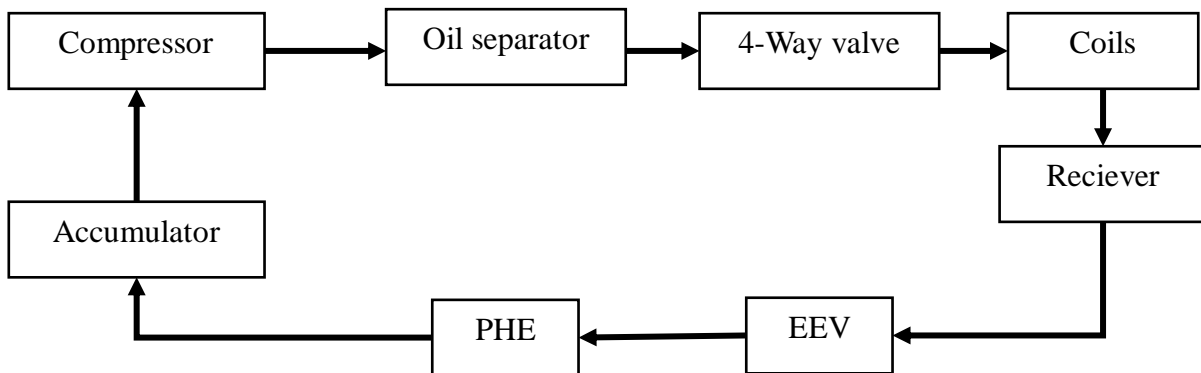
II.2.2.3 Échangeur thermique à eau glacée E127

L'échangeur d'eau glacée E127, de type NIXOX, est conçu pour assurer le refroidissement efficace du flux en sortie de la cuve NIXOX. Ce refroidissement est essentiel pour garantir une température optimale en entrée du séparateur NIXOX Aftercooler et pour le bon déroulement des étapes en aval du procédé.

Il s'agit d'un échangeur de chaleur de type calandre et tubes, sans contact direct entre les fluides : le gaz de procédé (hélium brut) circule à l'intérieur des tubes, tandis que l'eau de refroidissement est acheminée dans la calandre.

II.2.2.4 Refroidisseur mécanique E128

Le refroidisseur E128 sert à refroidir l'eau utilisée dans le système, afin qu'elle puisse être réutilisée pour refroidir les gaz. Grâce à une technologie avancée qui ajuste automatiquement sa puissance en fonction des besoins, il consomme moins d'énergie qu'un modèle classique. L'appareil comprend des composants performants (compresseurs, échangeurs, commandes électroniques) et est conçu pour fonctionner de manière fiable, même dans des conditions extérieures difficiles.



Légende du circuit :

- 1. Compressor:** Comprime le fluide à haute pression/température.
- 2. OilSeparators :** Sépare et récupère l'huile.
- 3. 4-Way Valve :** Permet d'inverser le cycle (fonction réversible).
- 4. Coils :** Condenseur échange de chaleur avec l'air extérieur.

5. Receiver : Stocke le liquide frigorigène.

6. EEV (Electronic Expansion Valve) : Fait chuter la pression du fluide avant l'évaporation.

7. Plate Heat Exchanger : Lieu d'évaporation du fluide (il absorbe la chaleur de l'eau à refroidir).

8. Accumulator : Retient tout fluide liquide non évaporé pour protéger les compresseurs. [13]

II.2.2.5 Séparateur C125

Le séparateur C125 NIXOX est un séparateur de phases vertical sous pression, conçu pour extraire efficacement le condensat du gaz de procédé après refroidissement. Le gaz entre par une buse latérale située au niveau médian du récipient, équipée d'un dispositif anti-éclaboussures pour améliorer la séparation.

Le condensat est récupéré au fond de la cuve via une buse de vidange, tandis que le gaz désempués est évacué par une buse en partie supérieure.

Deux indicateurs de niveau permettent de surveiller la hauteur de liquide, et une vanne de régulation (LV) placée sur la conduite de purge du condensat est automatiquement commandée selon le niveau détecté dans le séparateur.

II.2.3 Système de compression de l'air

Le compresseur d'air K160 NIXOX est un équipement industriel monté sur skid, conçu pour augmenter la pression de l'air en réduisant son volume, afin de le rendre exploitable dans divers procédés industriels. Une fois comprimé à la pression requise, l'air est acheminé vers le récipient NIXOX via le TSA (Train de Séparation d'Air).

Il s'agit d'un compresseur alternatif à plusieurs étages, entraîné par un moteur électrique. Le système est équipé de plusieurs composants essentiels :

- Vannes d'étranglement d'aspiration,
- Vannes de recyclage,
- Un système de lubrification,
- Des instruments de surveillance de la température, de la pression et des vibrations,

- Ainsi que plusieurs échangeurs thermiques : refroidisseurs intermédiaires, refroidisseur final, refroidisseur de moteur et refroidisseur d'huile de lubrification. [12]



Figure II-9: Compresseur d'air NIXOX

II.2.3.1 Description détaillée

Le système de purification d'air joue un rôle essentiel dans la préparation de l'air de procédé destiné au réacteur NIXOX. Il a pour objectif d'éliminer les principales impuretés telles que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2) et certains composés hydrocarbonés qui, s'ils sont présents en trop grande quantité, peuvent endommager les équipements en aval ou interférer avec les réactions chimiques du procédé.

Ce système repose sur une technologie d'adsorption modulée en température (TSA), complétée par une oscillation de pression, formant ainsi un système TPSA (Temperature and Pressure Swing Adsorption). Cette technologie permet un traitement cyclique de l'air tout en assurant un flux continu d'air purifié.

Principaux composants du système :

- Deux cuves d'adsorption contenant un matériau adsorbant à haute sélectivité moléculaire
- Un silencieux d'évent permettant la décompression contrôlée des gaz résiduels

- Des filtres à plusieurs étages pour la rétention mécanique des particules solides et fines
- Un réseau automatisé de vannes de séquence ment, tuyauteries, capteurs de pression/température et systèmes de commande pilotant les cycles d'adsorption et de régénération
- Un analyseur en ligne mesurant en continu la concentration de CO₂ [12]

Principe de fonctionnement du procédé TPSA :

Le processus TPSA alterne entre deux étapes clés, contrôlées automatiquement par un programme de séquençage :

1. Phase d'adsorption (température ambiante, pression de service)

L'air de procédé traverse la cuve d'adsorption en flux ascendant. Les molécules polaires (vapeur d'eau, CO₂, certains hydrocarbures) sont captées par le matériau adsorbant, tandis que les gaz inertes (azote, oxygène, argon) passent librement à travers le lit, formant l'air purifié.

2. Phase de régénération (température élevée, pression réduite)

Une fois le lit saturé, il est désactivé temporairement pour une régénération thermique. Un flux de gaz de purge traverse le lit en flux descendant, entraînant les impuretés adsorbées hors du système. Cette phase permet de restaurer la capacité d'adsorption du lit pour un nouveau cycle. [12]

II.2.3.2 Récipients TSA C182A/B

5. Fonctionnement

A) Cycle d'adsorption :

- L'air de traitement entre par le bas via un panier distributeur.
- Il monte à travers :
 - Alumine
 - Tamis flottant
 - Tamis moléculaire

B) Cycle de régénération :

- Le gaz de régénération entre par le haut.
- Il descend à travers les mêmes couches dans l'ordre inverse.

- Il ressort par le bas et est évacué via un événement de purge.

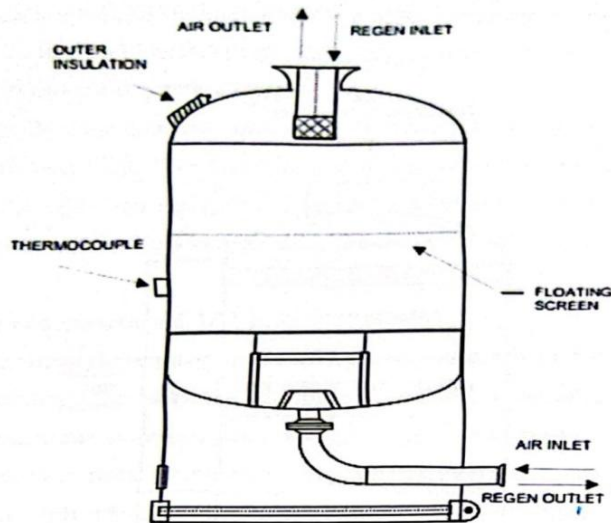


Figure II-10 : Récipient d'adsorption TSA

II.2.3.3 Réchauffeur de régénération électrique E182

Le réchauffeur E182 est un dispositif à résistance électrique destiné à fournir l'énergie thermique nécessaire à la phase de régénération des récipients d'adsorption TSA. Il chauffe le gaz de purge utilisé pour désorber les contaminants accumulés dans le lit adsorbant durant le cycle d'adsorption.

L'unité est équipée de plusieurs éléments chauffants pouvant être activés individuellement ou en combinaison, en fonction des besoins thermiques du procédé. Le contrôle du fonctionnement du réchauffeur est entièrement automatisé via le système de commande de l'installation, qui assure sa mise en service et son arrêt à la fin de la phase de régénération thermique. [13]

II.2.4 Prétraitement des gaz d'alimentation (cuves séchantes)

II.2.4.1 Fonctionnement du sous-système

Le système de séchage NIXOX, basé sur la technologie TSA a pour fonction d'éliminer l'humidité résiduelle du gaz d'alimentation en provenance du séparateur du refroidisseur final.

Ce traitement est essentiel pour éviter les problèmes d'impuretés dans les étapes en aval du procédé, en particulier dans l'unité Helios PSA.

Le système comprend :

- Deux colonnes d'adsorption verticales remplies d'alumine activée.
- Un ventilateur, un réchauffeur de régénération, un refroidisseur de gaz de purge.
- Des vannes, de la tuyauterie, des instruments de régulation et de mesure.

Le fonctionnement repose sur un cycle à deux lits :

- Un lit en service adsorbe l'humidité lorsque le gaz d'alimentation s'y écoule de bas en haut.
- L'autre lit en régénération est purgé par un flux d'hélium brut chauffé circulant de haut en bas.

Principe de fonctionnement TSA :

- L'alumine activée retient préférentiellement les molécules polaires (H_2O , CO_2) grâce à sa polarité et à sa très grande surface spécifique, mais laisse passer les gaz non polaires (H_2 , He, CO, CH_4 , N_2).
- L'adsorption se produit à basse température, tandis que la désorption (régénération) est déclenchée par une montée en température (jusqu'à $\sim 245^\circ C$) du gaz de purge.
- Le gaz de purge est ensuite refroidi et déshumidifié avant d'être réinjecté dans le système.

II.2.4.2 Réservoirs TSA C140A/B

A) Présentation des réservoirs TSA C140 A/B

Les réservoirs sécheurs TSA C140 A/B sont des colonnes verticales sous pression, remplies d'un adsorbant à base d'alumine activée. Leur rôle est de déshumidifier le gaz de procédé afin de protéger les équipements en aval et d'assurer l'efficacité du traitement.

B) Principe de fonctionnement – Phase d'adsorption :

Le gaz de procédé entre par le bas du réservoir, traverse un système de distribution, puis remonte à travers le lit d'adsorbant. Durant ce passage, l'humidité est captée par l'alumine activée. Le gaz asséché ressort par la partie supérieure du réservoir.

C) Phase de régénération :

Lorsque le lit est saturé, il est régénéré par un gaz de purge chauffé qui entre par le haut du réservoir. Ce flux descend à travers le lit, désorbe l'humidité accumulée, puis s'évacue par le bas, via un système de purge. [13]

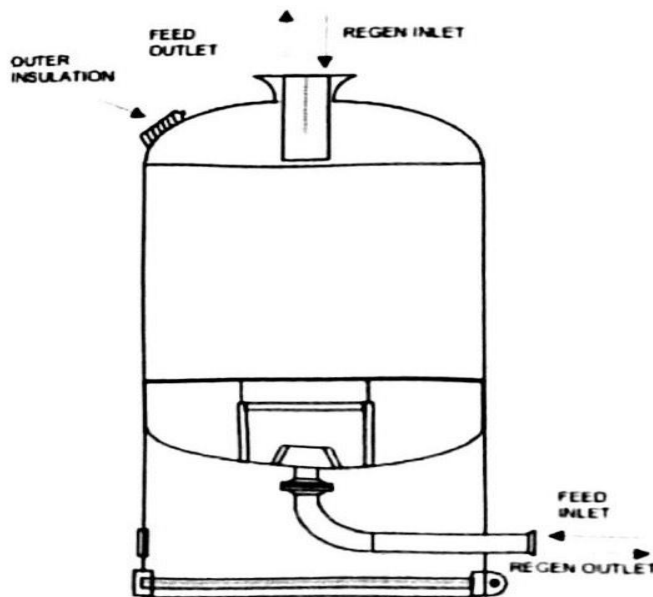


Figure II-11 : Réservoir sécheur TSA

Chapitre III :
Résultats et discussion

III.1 Introduction

Dans le cadre de la formation universitaire, un stage technique a été réalisé au sein de l'entreprise **Sonatrach**, plus précisément dans l'unité **Helios** spécialisée dans la production et la purification d'hélium. Ce stage, d'une durée de quatre semaines, s'est déroulé **du 04 au 27 février 2025**, et a permis de se familiariser avec les procédés industriels liés à la récupération du gaz hélium à partir de mélanges gazeux complexes.

L'objectif principal de ce stage était d'observer et d'analyser le procédé d'élimination de l'hydrogène dans la chaîne de purification de l'hélium. L'unité visitée repose notamment sur des technologies d'adsorption sélective (TSA) et intègre une infrastructure moderne de suivi et de contrôle des paramètres critiques.

Au cours de cette immersion, plusieurs aspects ont été étudiés de manière concrète :

- Le fonctionnement de l'unité NIXOX, chargée de l'élimination du H₂.
- La gestion des cycles d'adsorption/régénération.
- L'analyse des données issues des capteurs en ligne.
- L'interprétation des résultats sur la qualité du gaz obtenu.

Cette partie pratique expose donc les résultats observés, les données collectées et leur interprétation, tout en évaluant les performances réelles du procédé. Elle constitue une base technique solide pour comprendre les enjeux de la purification de l'hélium dans un contexte industriel.

III.2 Logiciel SCADA

Le logiciel SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) est un système informatique de contrôle industriel qui permet la supervision, le contrôle, la collecte et l'analyse de données en temps réel provenant d'équipements déployés sur un site industriel ou répartis géographiquement. Il communique avec des automates programmables (PLC), des capteurs, des actionneurs et d'autres dispositifs via des protocoles de communication industriels. Le

SCADA offre une interface homme-machine (IHM) permettant de visualiser l'état des équipements, d'enregistrer les données historiques, de générer des alarmes en cas d'anomalies, et d'automatiser certaines actions.

L'entreprise Hélios utilise un logiciel SCADA pour superviser et contrôler son procédé de production et purification d'hélium. Ce logiciel permet de :

- Collecter en temps réel les données des capteurs installés sur les différentes unités : pression, température, débit des gaz (hélium, hydrogène, méthane, etc.).
- Surveiller les colonnes d'adsorption TSA (ex : TSA C182A/B) pour détecter toute anomalie dans le processus d'élimination de l'hydrogène.
- Afficher des graphiques dynamiques montrant les variations des concentrations de gaz à chaque étape, permettant aux opérateurs d'ajuster rapidement les paramètres.
- Gérer les alarmes automatiques en cas de dépassement des seuils critiques, garantissant la sécurité du personnel et la qualité du produit.
- Enregistrer les historiques de production pour analyser les performances, optimiser le procédé, et préparer les rapports réglementaires.

Ainsi, le SCADA chez Hélios est un outil essentiel pour garantir une production d'hélium pure, fiable, et sûre, tout en facilitant la prise de décision rapide et la maintenance préventive.

III.3 Composition du mélange à l'entrée

Le gaz brut traité dans l'unité NIXOX présente la composition suivante avant élimination de l'hydrogène :

Tableau III-1 : Concentrations du mélange à l'entrée

Composante	Concentration (%)
Hélium (He)	9 à 13 %
Azote (N ₂)	41 à 45 %
Méthane (CH ₄)	43 à 50 %
Ethane (C ₂ H ₆)	0,01 à 0,04 %
Hydrogène (H ₂)	3000 ppm (0,3%)

Chapitre III : Résultats et discussion

Cette composition justifie la nécessité d'un procédé spécifique pour réduire la teneur en afin d'atteindre les spécifications de pureté de l'hélium. La figure ci-dessous présente le procédé NIXOX utilisé pour produire l'hélium pur.

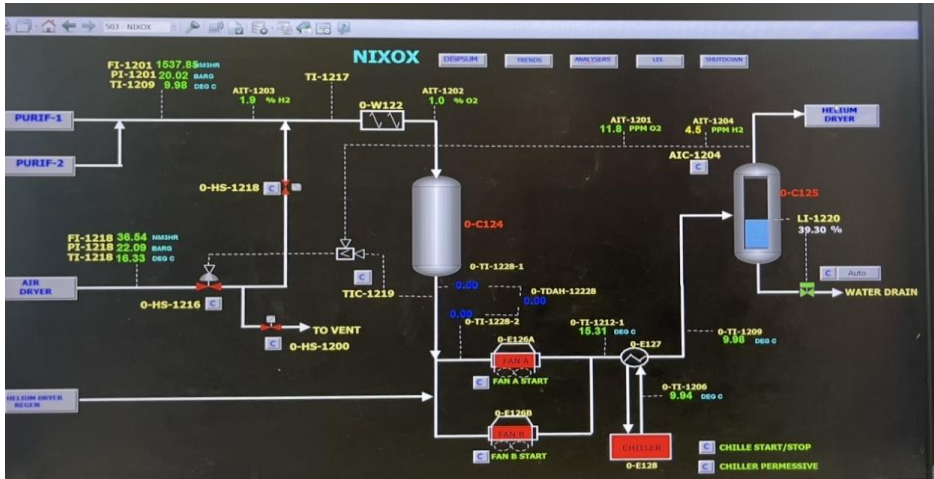


Figure III-1 : Procédé de NIXOX

La table suivante présente les paramètres à contrôler pendant le suivi du procédé.

Tableau III-2 : Les paramètres de contrôle du procédé NIXOX

Paramètre	Valeur	Observation
Debit gaz principal	1537.8 Nm ³ /h	Le débit est élevé, le système fonctionne bien.
Pression gaz	20.02 bars	Pression normal
Température	Environ 10°C	La température est basse, bon refroidissement.
Oxygène (O ₂)	11.8 ppm	Très faible, gaz bien purifié.
Hydrogène (H ₂)	4.5 ppm	Faible aussi, bonne élimination
Niveau d'eau	39.3 %	Besoin de vider à ce niveau

III.4 Analyse des résultats

Le débit du gaz principal est de 1537.8 Nm³/h, ce qui est élevé. Cela indique que le système fonctionne à pleine capacité, répondant ainsi efficacement à la demande. La pression du gaz

est de 20.02 bars, ce qui est considéré comme normal, suggérant un bon fonctionnement du compresseur ou du système de pressurisation.

La température du système est d'environ 10°C, ce qui est relativement bas. Cette température est favorable pour un bon refroidissement, contribuant à l'efficacité du processus de traitement du gaz.

La concentration en oxygène (O₂) est de 11.8 ppm, ce qui est très faible. Cela signifie que le gaz est bien purifié. De même, la concentration en hydrogène (H₂) est de 4.5 ppm, ce qui est également faible, indiquant une bonne élimination des impuretés par les systèmes de purification ou d'adsorption.

En revanche, le niveau d'eau atteint 39.3 %, ce qui est jugé élevé. À ce niveau, une vidange est nécessaire pour éviter tout risque de dysfonctionnement ou d'impact négatif sur les performances globales du système. Une surveillance régulière et une maintenance préventive sont recommandées à cet égard

L'analyse graphique au niveau du séparateur est illustrée par la figure III.2

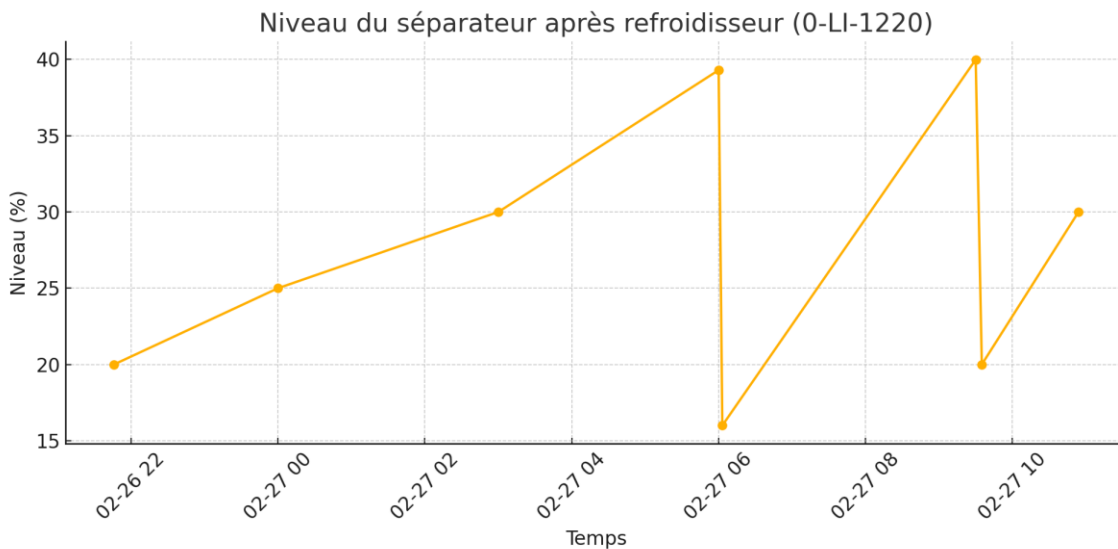


Figure III-2 : Le contrôle graphique au niveau du séparateur

Le séparateur présente un comportement cyclique stable avec remplissage progressif et purges automatiques.

Cycle 1 :

- Début : 26/02/2025 à 21:46 → 20 %
- Pic : 27/02/2025 à 06 :00 → 39.30 %
- Purge : 27/02/2025 à 06 :03 → 16 %
- Durée de remplissage : 8h14
- Taux de montée : +2.34 %/h

Cycle 2 :

- Début : 27/02/2025 à 06 :03 → 16 %
- Pic : 27/02/2025 à 09 :30 → 39.99 %
- Purge : 27/02/2025 à 09 :35 → 20 %
- Durée de remplissage : 3h27
- Taux de montée : +6.95 %/h
- Dernière mesure : 27/02/2025 à 10 :54 → 30 %

A la fin :

- Le système purge automatiquement autour de 40 %.
- Le remplissage est plus rapide au deuxième cycle, indiquant un débit de condensation plus élevé.
- Le fonctionnement global est stable, mais la variation de taux de montée mérite une surveillance.

III.5 La composition du gaz après élimination d'hydrogène

Le tableau III.X montre les concentrations résiduelles des composés présents dans le gaz traité après l'étape de purification, principalement par élimination de l'hydrogène.

Tableau III-3 : Concentrations du mélange à la sortie

Composante	Concentration (%)
Hélium (He)	99,95%
Azote (N ₂)	0,000011%
Méthane (CH ₄)	---
Ethane (C ₂ H ₆)	----
Hydrogène (H ₂)	4,5ppm (0.00045%)

Composants analysés :

• Hélium :

Concentration = 99,95 %

Le gaz est essentiellement composé d'hélium, ce qui indique une purification très efficace. Ce niveau correspond à une qualité quasi ultra-pure, adaptée à des usages critiques (cryogénie, électronique, etc.).

• Azote (N₂) :

Concentration = 0,000011 % (0,11 ppm)

Teneur extrêmement faible. L'azote est bien éliminé, ce qui confirme l'efficacité du procédé de séparation des gaz inertes.

• Hydrogène (H₂) :

Concentration = 4,5 ppm

Malgré la mention "élimination de l'hydrogène", une trace subsiste. Ce niveau reste très bas et généralement acceptable pour les applications standards, mais pourrait nécessiter un traitement complémentaire dans le cas d'exigences ultra-strictes.

III.6 Détermination de l'efficacité

L'efficacité d'élimination de l'hydrogène peut être calculée :

$$\text{Efficacité} = [(C_o - C_f) / C_o] \times 100$$

Avec: $C_o = 3000$ ppm, $C_f = 4.5$ ppm

Efficacité = 99.95 % Cela démontre que le système d'adsorption NIXOX est extrêmement performant pour atteindre des seuils critiques de pureté.

Le gaz purifié est de très haute pureté en hélium, avec des traces minimales d'azote et d'hydrogène. Le système d'élimination est efficace, et les concentrations mesurées sont compatibles avec des applications industrielles ou scientifiques exigeant une pureté élevée.

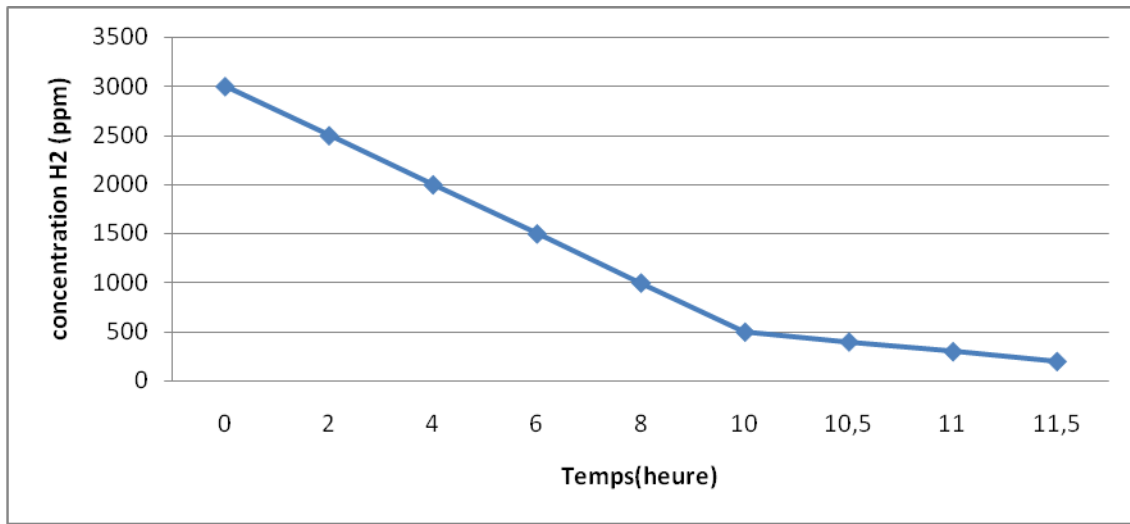


Figure III-3 : Evolution de la concentration d'hydrogène (H₂)

III.7 Analyse de l'évolution de la concentration d'hydrogène (H₂)

La courbe ci-dessus illustre la diminution progressive de la concentration d'hydrogène (H₂), en ppm (parties par million), dans un système du NIXOX, en fonction du temps exprimé en heures.

Au temps initial (0 h), la concentration en H₂ est d'environ 3000 ppm, traduisant une présence importante d'hydrogène dans le gaz analysé. Cette concentration diminue de manière quasi-linéaire au fil des heures, passant à environ 2500 ppm après 2 heures, puis à 2000 ppm vers 4 heures, et ainsi de suite, jusqu'à atteindre une valeur proche de 400 ppm après 11,5 heures.

Ce comportement témoigne d'un processus d'élimination continue et efficace de l'hydrogène.

Contrairement à une décroissance exponentielle rapide Cela signifie que l'hydrogène est éliminé à un taux constant jusqu'à ce que le NIXOX soit proche de sa saturation ou que la concentration en H₂ devienne très faible. Le NIXOX montre ainsi une capacité notable à

Chapitre III : Résultats et discussion

réduire la concentration en hydrogène de manière soutenue sur une période prolongée. Ce résultat est prometteur pour des applications industrielles nécessitant une purification continue ou un abattement lent mais efficace du H₂ dans des systèmes à faibles débits ou en fonctionnement prolongé

À l'issue de l'étude documentaire portant sur les propriétés de l'hélium et de l'hydrogène, ainsi que sur le fonctionnement détaillé du système NIXOX, il ressort clairement que ce dernier présente une capacité remarquable à éliminer l'hydrogène présent dans le flux gazeux. Les données expérimentales collectées, notamment sur le train 2 de l'unité HELIOS, confirment une réduction significative de la teneur en H₂, traduisant une performance élevée du système en conditions industrielles.

L'intégration du NIXOX dans le procédé a ainsi permis une amélioration notable de l'efficacité de production, en assurant un contrôle rigoureux de l'hydrogène résiduel, facteur critique pour la qualité du gaz final. Ces résultats soulignent l'intérêt et la pertinence de cette technologie dans les unités de purification avancées.

Tableau III-4 : Différence entre l'entrée et la sortie de gaz de charge

Composante	Entré	Sortie
Hélium (He)	9 à 13 %	99,95%
Azote (N ₂)	41 à 45 %	0,000011%
Méthane (CH ₄)	43 à 50 %	---
Ethane (C ₂ H ₆)	0,01 à 0,04 %	----
Hydrogène (H ₂)	3000 ppm (0,3%)	4,5ppm (0.00045%)

Conclusion générale

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que l'élimination de l'hydrogène représente une étape critique dans le processus de purification de l'hélium, en particulier lorsqu'il s'agit de répondre à des exigences élevées en termes de qualité et de performance. Les deux méthodes explorées – l'adsorption et la réaction catalytique – présentent chacune des avantages, mais aussi des limites.

Si l'adsorption se révèle efficace pour des faibles concentrations, elle devient contraignante en cas de charge élevée, en raison de la saturation rapide des adsorbants et de la nécessité de régénération fréquente. En revanche, la réaction catalytique, en convertissant l'hydrogène en eau de manière continue et sans saturation, s'avère particulièrement adaptée au contexte industriel du complexe Hélios.

Ainsi, en tenant compte des enjeux spécifiques liés à la pureté de l'hélium et aux volumes traités, la réaction catalytique se positionne comme la solution la plus fiable et durable. Elle permet non seulement d'optimiser la qualité du gaz, mais aussi de renforcer la sécurité et la performance des installations utilisant l'hélium purifié.

Bibliographie

- [1] Documents Helios
- [2] Documents Sonatrach
- [3] Kornbluth, K. (2008). “Helium Supply: Options for Production and Supply Chain Optimization.” *Energy Policy Journal*, 36(2), 665–674
- [4] Clarke, W. R. (2021). *Helium: Its Properties and Uses*. Springer.
- [5] Nuttall, W. J., Clarke, R. H., & Glowacki, B. A. (2012). *The Future of Helium as a Natural Resource*. Routledge.
- [6] Züttel, A. (2007). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Wiley-VCH.
- [7] David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press Inc, 2009, 90^e éd., 2804 p., Relié
- [8] France Hydrogène. (s.d.). Application de l’hydrogène en chimie industrielle [Fiche technique]. France Hydrogène. Consulté le 5 juin 2025, à partir de <https://www.france-hydrogene.org>
- [9] <https://www.techniques-ingenieur.fr>. Consulté le 6 juin 2025.
- [10] Air Products. (n.d.). Helium recovery and purification systems [Technical report]

- [11] ScienceDirect & IEEE Xplore – Moteurs de recherche d'articles scientifiques (recherchez : Helium liquéfaction, Hydrogen removal, Cryogenic separation).
- [12] Documents AirProduct (société de gaz industriel)
- [13] Documents SIAD (société de fabrication des machines et pièces)