

Technologie du gaz



DR. ABDERRHMANE BOUAFIA

UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL
OUED/ ALGÉRIE

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT GÉNIE DES PROCÉDÉS ET
PÉTROCHIMIE

EMAIL : ABDELRAHMANEBOUAFIA@GMAIL.
COM

Table des matières



Objectifs	5
Introduction	6
I - Résumé Général du Cours	7
II - Chapitre 1: Application des concepts thermodynamiques dans l'industrie des gaz	9
1. Rappel	9
2. Systèmes de liquéfaction	13
2.1. Systèmes de liquéfaction	13
2.2. Les échangeur de chaleur	13
2.3. Échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes cryogéniques de liquéfaction	15
2.4. Machines à expansion	17
3. Cycles de liquéfaction	18
3.1. Cycle (Expansion libre à travers une valve)	19
3.2. Cycle de Linde	19
3.3. Cycle de Claude	21
3.4. Cycle de Kapitsa	24
3.5. Cycle Cascade	25
4. Activité d'auto-évaluation	26
III - Chapitre 2: Technologie de séparation de l'air	30
1. Généralités	30
2. Séparation de l'air par distillation cryogénique	32
2.1. Considérations théoriques et pratiques du fractionnement	34
2.2. Contrôle des opérations	37
2.3. Récupération du produit	41
2.4. Reflux optimal	44
2.5. Équipement de distillation	46
3. Séparation de l'air par adsorption	49
4. Séparation de l'air par membrane	50
5. Activité d'auto-évaluation	52
IV - Chapitre 3: Gaz nobles (rares)	56
1. Généralités sur les Gaz Nobles	57
2. Historique : La Découverte des Gaz Rares	58

3. L'Existence Naturelle des Gaz Nobles	59
4. Hélium (He)	59
4.1. Propriétés critiques	60
4.2. Applications clés	60
5. Néon (Ne)	62
5.1. Signature optique	62
5.2. Applications industrielles	62
6. Argon (Ar)	63
6.1. Avantages techniques	64
6.2. Utilisations stratégiques	64
7. Krypton (Kr) et Xénon (Xe)	65
7.1. Caractéristiques distinctives	65
7.2. Innovations technologiques	66
8. Synthèse techno-économique	67
8.1. Flux d'utilisation par secteur	67
8.2. Défi : La pénurie d'hélium et alternatives	68
9. Activité d'auto-évaluation	69
V - Chapitre 4: Stockage et transport des gaz industriels	72
1. Techniques de stockage des gaz industriels	72
1.1. Stockage sous pression et liquéfié	73
1.2. Conception et gestion des installations de stockage sécurisées	75
1.3. Défis et risques liés au stockage	76
2. Méthodes de transport des gaz industriel	77
2.1. Transport routier	77
2.2. Transport par canalisation	78
2.3. Comparaison des méthodes de transport	79
2.4. Défis et risques liés au transport	80
3. Innovations dans le stockage et le transport	80
4. Conclusion et perspectives	80
5. Activité d'auto-évaluation	81
VI - Chapitre 5: Applications des Gaz Industriels	84
1. Historique des Applications des Gaz Industriels	85
2. Applications de l'Oxygène	86
3. Applications de l'Hydrogène	87
4. Applications de l'Hélium	89
5. Applications du Néon	91
6. Applications de l'Argon	93
7. Applications du Krypton et du Xénon	95

8. Activité d'auto-évaluation	97
Glossaire	101
Abréviations	106
Bibliographie	107
Webographie	109

Objectifs

Les objectifs du cours "Technologie du gaz" selon les niveaux cognitifs de Bloom sont :

Au niveau des connaissances, l'étudiant sera en mesure d'identifier les gaz industriels (oxygène, hydrogène, hélium, néon, argon, krypton, xénon) et leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que les technologies de liquéfaction, de séparation de l'air, de stockage, de transport, et leurs applications dans les domaines médical, industriel, énergétique et technologique.

En termes de compréhension, l'étudiant sera capable d'expliquer les principes de fonctionnement des technologies de liquéfaction (cycles Linde, Claude, Kapitsa, Cascade), de séparation de l'air (distillation, fractionnement), des méthodes de stockage et de transport (bouteilles, réservoirs cryogéniques, canalisations), ainsi que les applications des gaz industriels et leurs impacts sur la révolution industrielle et les avancées technologiques.

En termes d'application, l'étudiant sera capable de résoudre des problèmes liés au choix des technologies appropriées pour la liquéfaction, la séparation, le stockage, le transport et les applications des gaz industriels, et d'associer chaque gaz à ses usages spécifiques (par exemple, oxygène pour la sidérurgie, hélium pour la cryogénie).

En termes d'analyse, l'étudiant sera en mesure d'examiner les différences entre les technologies de liquéfaction, de séparation, de stockage, de transport et les applications des gaz industriels en termes de coût, efficacité, faisabilité, rareté et impacts environnementaux (comme les émissions de CO₂).

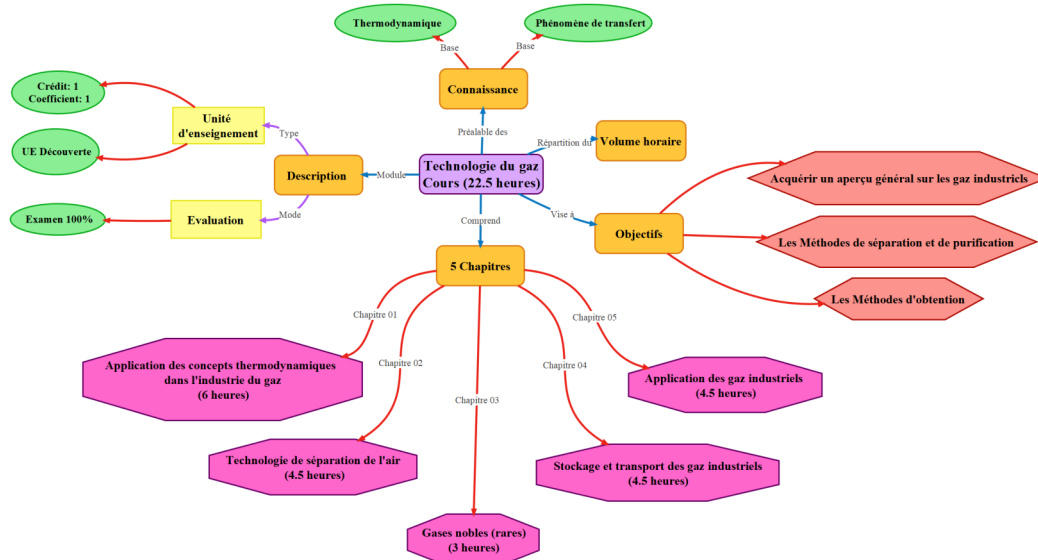
En termes de synthèse, l'étudiant sera capable de concevoir des schémas illustrant les technologies de liquéfaction, de séparation, de stockage, de transport et les applications des gaz industriels, intégrant des diagrammes de flux, des configurations d'équipements ou des chronologies historiques.

En termes d'évaluation, l'étudiant sera évalué pour confirmer ses connaissances sur les gaz industriels, leurs technologies de production, de gestion et d'application, ainsi que leur importance dans les secteurs industriels, médicaux et technologiques.

Introduction

Dans ce cours, nous explorerons les **concepts fondamentaux** de la **technologie des gaz industriels**, en mettant un accent particulier sur leurs **propriétés uniques** et leurs **applications variées** dans les secteurs **médical, industriel, énergétique** et **technologique**. Ces caractéristiques, qui distinguent les gaz industriels des autres matériaux, sont la base de leur rôle crucial dans la **révolution industrielle**, la **production durable** et les **avancées technologiques modernes**. Les **propriétés physico-chimiques** des gaz, telles que leur **compressibilité**, leur **inertie chimique**, leurs **points d'ébullition** et leurs **spectres d'émission**, seront étudiées en détail.

Nous aborderons les principes des **technologies de liquéfaction** (cycles Linde, Claude, Kapitsa, Cascade), de **séparation de l'air** (distillation cryogénique, adsorption, membranes), de **stockage** (bouteilles, réservoirs cryogéniques) et de **transport** (routier, canalisations), ainsi que les **applications** des gaz industriels (**oxygène, hydrogène, hélium, néon, argon, krypton, xénon**) dans des domaines comme la **sidérurgie**, la **cryogénie**, l'**éclairage** et les **lasers**. Ces études incluent l'identification des **procédés industriels clés**, la compréhension des **normes de sécurité** (ADR, ATEX), l'analyse des **défis environnementaux** (émissions de CO₂, rareté des gaz) et l'évaluation des **innovations technologiques** dans le contexte des enjeux **économiques** et **durables**.



Carte Mentale du Cours

Résumé Général du Cours

I

Informations du cours

Intitulé du cours : Technologie du gaz

Enseignant : Dr. BOUAFIA Abderrhmane

Faculté : Faculté de technologie

Département : Génie des procédés et pétrochimie

Niveau : 3ème année Licence – spécialité Industries pétrochimiques

Résumé

Le cours « Technologie du gaz » est une unité d'enseignement fondamentale dans la spécialité Industries pétrochimiques. Il vise à fournir à l'étudiant une compréhension complète des gaz industriels en abordant leurs propriétés physico-chimiques, leurs méthodes de production, de stockage, de transport et leurs multiples applications dans les domaines médical, industriel, énergétique et technologique. Le cours débute par l'étude des concepts thermodynamiques de base appliqués à la liquéfaction des gaz et présente les principaux cycles de liquéfaction (Linde-Hampson, Claude, Kapitsa, Cascade) en insistant sur les échangeurs thermiques, les machines à détente et l'effet Joule-Thomson. Il traite ensuite des techniques de séparation des composants de l'air, aussi bien cryogéniques (distillation à basse température dans des colonnes à moyenne et basse pression) que non cryogéniques (adsorption PSA/VSA et membranes), avec une description détaillée des équipements de séparation, du contrôle des procédés et des critères de rendement et de pureté. Un chapitre entier est consacré aux gaz nobles (hélium, néon, argon, krypton, xénon) : histoire de leur découverte, abondance naturelle, propriétés uniques et applications avancées telles que le refroidissement supraconducteur, l'éclairage, les lasers, le soudage et la propulsion ionique. Le cours aborde également les techniques de stockage (bouteilles haute pression et réservoirs cryogéniques) et de transport (routier selon l'accord ADR et pipelines) en mettant l'accent sur les normes de sécurité ATEX et la réduction de l'impact environnemental. Enfin, il passe en revue les applications industrielles, médicales et énergétiques de chaque gaz majeur, avec une analyse historique du rôle de ces gaz dans la révolution industrielle et les progrès technologiques modernes, tout en discutant des défis contemporains tels que la rareté de l'hélium, les émissions de CO₂, la nécessité de technologies plus durables et les innovations comme le recyclage, le contrôle intelligent et les nouveaux matériaux.

Mots-clés : Technologie du gaz, Gaz industriels, Gaz nobles, Liquéfaction des gaz, Séparation de l'air, Distillation cryogénique, Cycle Linde, Cycle Claude, Cycle Kapitsa, Cycle Cascade, Échangeurs de chaleur, Expansion isentropique, Effet Joule-Thomson, Stockage cryogénique, Transport ADR, Oxygène, Hydrogène, Hélium, Argon, Néon, Krypton, Xénon, Soudage TIG/MIG, IRM, Propulsion ionique, Applications industrielles, Sécurité ATEX, Développement durable

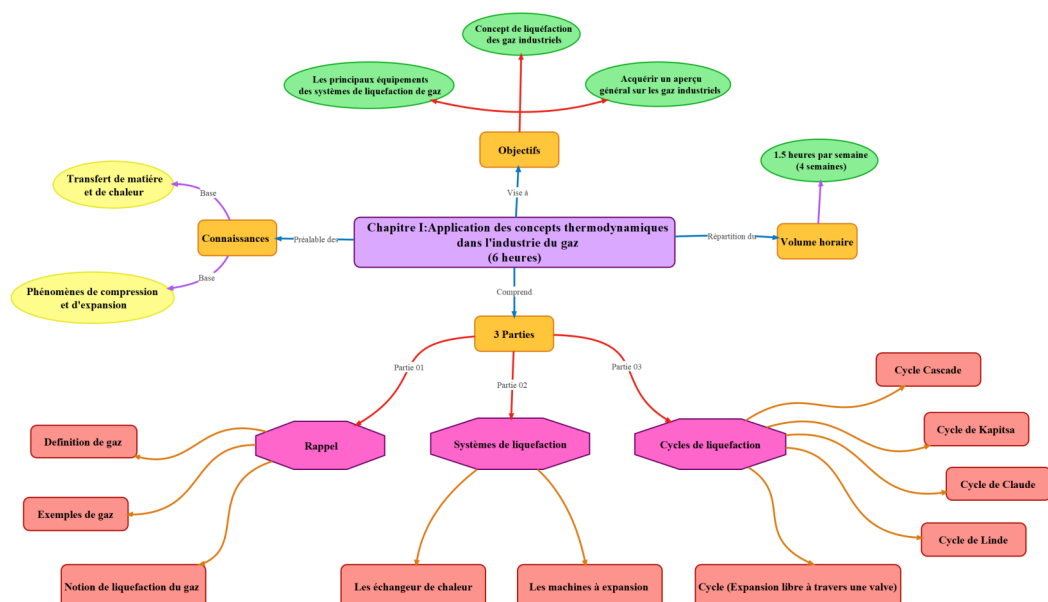
Keywords : Gas technology, Industrial gases, Noble gases, Gas liquefaction, Air separation, Cryogenic distillation, Linde cycle, Claude cycle, Kapitsa cycle, Cascade cycle, Heat exchangers, Isentropic expansion, Joule-Thomson effect, Cryogenic storage, ADR transport, Oxygen, Hydrogen, Helium, Argon, Neon, Krypton, Xenon, TIG/MIG welding, MRI, Ion propulsion, Industrial applications, ATEX safety, Sustainable development

Chapitre 1: Application des concepts thermodynamiques dans l'industrie des gaz

II

Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux de la **thermodynamique** appliqués à l'**industrie des gaz**, avec un accent particulier sur les **systèmes de liquéfaction**. La **liquéfaction des gaz** est un processus clé qui implique la transformation d'un **gaz** en **liquide** par **compression** ou **refroidissement**, permettant un **stockage** et un **transport** plus efficaces. Ce phénomène repose sur les propriétés physiques des gaz, telles que leur faible densité, leur haute compressibilité et leur élasticité, qui seront étudiées en détail.

Nous aborderons les différents systèmes de liquéfaction, notamment les cycles de **Linde**, **Claude**, **Kapitsa** et **Cascade**, ainsi que le rôle crucial des **échangeurs de chaleur** et des **machines à expansion** dans ces procédés. Ces études incluent l'identification des technologies de liquéfaction, la compréhension de leur fonctionnement, l'application des **courbes thermodynamiques**, l'analyse de l'efficacité des cycles, la conception de schémas de configuration, et l'évaluation des connaissances acquises dans le contexte industriel.



Carte mentale du chapitre 1

1. Rappel

Définition

En physique, un gaz est un état de la matière caractérisé par une très faible densité et une très grande compressibilité. Les molécules ou les atomes qui constituent un gaz sont très faiblement liés entre eux, ce qui leur permet de se déplacer librement dans tout le volume disponible.

Les gaz sont généralement caractérisés par les propriétés suivantes :

- **Densité faible** : La densité d'un gaz est généralement beaucoup plus faible que celle d'un liquide ou d'un solide. Par exemple, la densité de l'air est d'environ $1,2 \text{ kg/m}^3$, alors que la densité de l'eau est d'environ $1\,000 \text{ kg/m}^3$.
- **Compressibilité élevée** : Les gaz sont très compressibles, ce qui signifie qu'ils peuvent être facilement comprimés en réduisant leur volume.
- **Élasticité** : Les gaz sont élastiques, ce qui signifie qu'ils retrouvent leur volume initial lorsqu'ils sont décomprimés.

Les gaz sont présents dans la nature sous de nombreuses formes différentes. L'air que nous respirons est un mélange de gaz, dont le principal composant est l'oxygène. Les gaz naturels, tels que le gaz naturel et le **gaz de pétrole liquéfié (GPL)**, sont également des mélanges de gaz. Les gaz nobles, tels que l'hélium, le néon et l'argon, sont des gaz purs.

Le **Tableau 1.1** ci-dessous fournit des données quantitatives sur les propriétés physiques des gaz couramment utilisés dans l'industrie, incluant leur masse molaire et leur densité à des conditions standards (25°C , 1 atm). Ces données sont essentielles pour comprendre leur comportement dans les processus de liquéfaction.

Gaz	Formule	Masse molaire (g/mol)	Densité (kg/m^3)	Rôle dans l'industrie
Oxygène	O_2	32.00	1.31	Respiration, combustion
Azote	N_2	28.02	1.15	Inerte, cryogénie
Hydrogène	H_2	2.02	82	Combustible, cryogénie
Hélium	He	4.00	0.164	Ballons, refroidissement cryogénique
Dioxyde de carbone	CO_2	44.01	1.80	Photosynthèse, réfrigération
Méthane	CH_4	16.04	0.657	Combustible, gaz naturel liquéfié (GNL)

Tableau 1.1 : Propriétés physiques des gaz couramment utilisés dans l'industrie des gaz à 25°C et 1 atm .

Fondamental

La compressibilité des gaz peut être quantifiée par le facteur de **compressibilité (Z)**, défini comme $Z = PV/(nRT)$, où $Z = 1$ pour un gaz parfait. Dans les conditions réelles, Z varie en fonction de la pression et de la température, ce qui est crucial pour la conception des systèmes de liquéfaction. Par exemple, pour le méthane à haute pression, Z peut descendre à **0,8**, indiquant un comportement non idéal.

Exemple : Exemples de gaz

Les gaz sont des substances qui prennent la forme de leur contenant et se caractérisent par leur capacité à se comprimer et à occuper tout l'espace disponible. Voici quelques exemples de gaz couramment rencontrés :

Oxygène (O_2) : Un gaz essentiel à la vie, nécessaire à la respiration des organismes aérobies.

Azote (N_2) : Le composant principal de l'air, constituant environ 78% de l'atmosphère terrestre.

Hydrogène (H_2) : Un gaz inflammable et léger, souvent utilisé comme combustible.

Hélium (He) : Un gaz inerte et plus léger que l'air, utilisé parfois pour remplir des ballons et dans des applications de refroidissement.

Chlore (Cl_2) : Un gaz halogéné utilisé dans diverses applications, notamment le traitement de l'eau et la production de produits chimiques.

Dioxyde de carbone (CO_2) : Un gaz essentiel à la photosynthèse des plantes, mais également un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique.

Méthane (CH_4) : Un gaz naturellement présent dans l'atmosphère et utilisé comme combustible.

Ozone (O_3) : Un gaz composé de trois atomes d'oxygène, présent dans la stratosphère où il joue un rôle crucial en absorbant une partie des rayons ultraviolets du soleil.

Ammoniac (NH_3) : Un gaz incolore avec une odeur caractéristique, utilisé dans l'industrie chimique et comme engrais.

Vapeur d'eau (H_2O) : La phase gazeuse de l'eau, présente naturellement dans l'atmosphère.



Complément : Liquéfaction du gaz

La **liquéfaction** est le processus de transformation d'un gaz en liquide par **compression** ou **refroidissement**, exploitant les propriétés thermodynamiques des gaz, notamment leur température critique et leur pression critique. Ce phénomène, inverse de la vaporisation, réduit considérablement le volume des gaz, facilitant leur stockage et transport.

Par exemple, le **gaz naturel liquéfié (GNL)** est du gaz naturel de qualité commerciale condensé à l'état liquide. Il se compose essentiellement de méthane mais comprend aussi jusqu'à 10 % d'éthane et de petites quantités d'autres gaz (propane et butane notamment).

La température de liquéfaction varie en fonction du type de gaz. Par exemple, l'hélium se liquéfie à $-268,93\text{ °C}$, l'hydrogène à $-252,76\text{ °C}$, le néon à $-246,053\text{ °C}$, l'azote à $-195,79\text{ °C}$, l'oxygène à $-182,96\text{ °C}$, le gaz naturel (composé essentiellement de méthane) à $-161,52\text{ °C}$ et le gaz de pétrole liquéfié (composé essentiellement de propane à $-42,1\text{ °C}$ et de butane à $-0,5\text{ °C}$).

La liquéfaction des gaz est utilisée pour réduire leur volume, ce qui facilite leur stockage et leur transport. Elle est également utilisée dans divers domaines de la cryogénie*.

Le **Tableau 1.2** ci-dessous présente les températures et pressions critiques, ainsi que les températures de liquéfaction à 1 atm, pour divers gaz. Ces données sont essentielles pour déterminer les conditions opératoires des cycles de liquéfaction.

Gaz	Température critique (°C)	Pression critique (bar)	Température de liquéfaction (°C)
Hélium	267.96-	2.27	268.93-
Hydrogène	239.95-	12.93	252.76-
Néon	228.75-	26.54	246.053-
Azote	146.95-	33.94	195.79-
Oxygène	118.57-	50.43	182.96-
Méthane (GNL)	82.59-	45.99	161.52-
Propane (GPL)	96.68	42.48	42.1-
Butane (GPL)	151.98	37.96	0.5-

Tableau 1.2 : Températures et pressions critiques, et températures de liquéfaction des gaz à 1 atm.



Fondamental

La liquéfaction nécessite souvent de ramener le gaz en dessous de sa température critique, où il peut exister sous forme liquide. La relation entre la température, la pression et le volume est décrite par les équations d'état des gaz réels, telles que l'équation de van der Waals : $(P + a/V^2)(V - b) = RT$, où **a** et **b** sont des constantes spécifiques au gaz, représentant respectivement les interactions intermoléculaires et le volume exclu. Cette équation est particulièrement utile pour modéliser le comportement des gaz dans les conditions proches de la liquéfaction.

2. Systèmes de liquéfaction

2.1. Systèmes de liquéfaction

Définition

La liquéfaction des gaz est un procédé qui permet de transformer un gaz en liquide en le comprimant ou en le refroidissant. La liquéfaction des gaz a plusieurs applications, comme le stockage, le transport, ou la cryogénie. Il existe différents types de systèmes de liquéfaction des gaz, selon le gaz à liquéfier et les conditions de température et de pression.

Exemple

Par exemple, certains gaz, comme l'ammoniac, peuvent être liquéfiés à température ambiante en augmentant simplement la pression. D'autres gaz, comme l'air, nécessitent d'être refroidis en dessous de leur température critique pour se condenser. Pour cela, on utilise des cycles frigorifiques, qui exploitent les effets de la détente ou de la compression sur la température des gaz. Il existe plusieurs types de cycles frigorifiques, comme **le cycle de Joule-Thomson, le cycle de Brayton inverse, le cycle de Claude, ou le cycle de Collins**

2.2. Les échangeur de chaleur

Définition

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et, sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent.

Dans de nombreux cas, les fluides restent monophasiques, qu'ils soient gazeux ou liquides. Il existe toutefois trois grandes catégories d'échangeurs dans lesquelles surviennent des changements de phase : les vaporiseurs ou évaporateurs où l'on vaporise un liquide, les condenseurs où une vapeur est liquéfiée, et les vapocondenseurs dans lesquels les deux fluides changent de phase.

Exemple

Les échangeurs de chaleur sont généralement classés selon la disposition des flux et le type de construction. L'échangeur de chaleur le plus simple est celui pour lequel les fluides chauds et froids se déplacent dans des directions identiques ou opposées dans une construction à tubes concentriques (ou à doubles tubes). Dans la disposition à flux parallèles de la **Figure 1.1a**, les fluides chauds et froids entrent par la même extrémité, s'écoulent dans la même direction et sortent par la même extrémité. Dans la disposition à contre-courant de la **Figure 1.1b**, les fluides entrent par des extrémités opposées, s'écoulent dans des directions opposées et sortent par des extrémités opposées.

Complément

Dans les échangeurs de chaleur compacts, les deux fluides se déplacent généralement perpendiculairement l'un à l'autre, et une telle configuration d'écoulement est appelée flux croisé*. Le flux croisé est en outre classé en flux non mélangé et mélangé, en fonction de la configuration du flux, comme le montre la **Figure 1.2**. Dans (a), le flux croisé est dit non mélangé puisque les ailettes de la plaque forcent le fluide à s'écouler à travers un

espacement inter-ailettes particulier et l'empêchent de se déplacer dans la direction transversale (c'est-à-dire parallèlement aux tubes). Le flux croisé en (b) est dit mixte puisque le fluide est désormais libre de se déplacer dans la direction transversale. Les deux fluides ne sont pas mélangés dans un radiateur de voiture. La présence de mélange dans le fluide peut avoir un effet significatif sur les caractéristiques de transfert thermique de l'échangeur thermique.

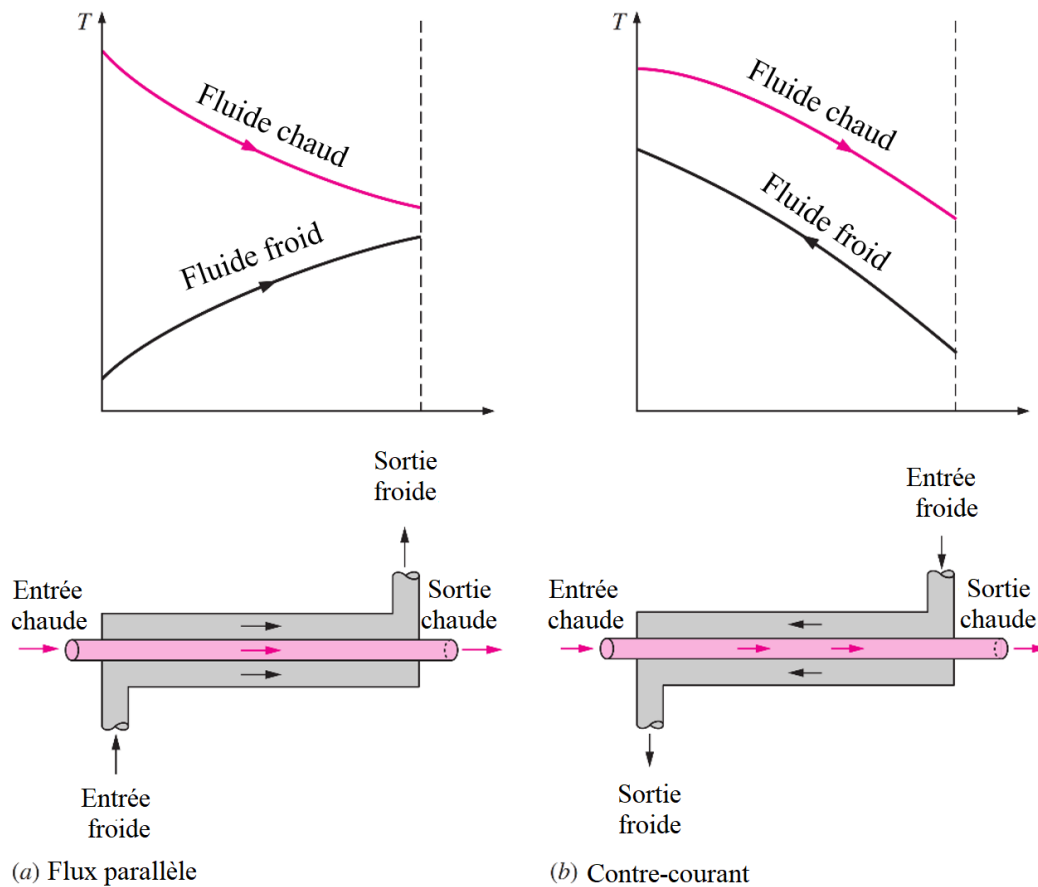


Figure 1.1: Échangeurs de chaleur à tubes concentriques. (a) Flux parallèle. (b) À contre-courant.

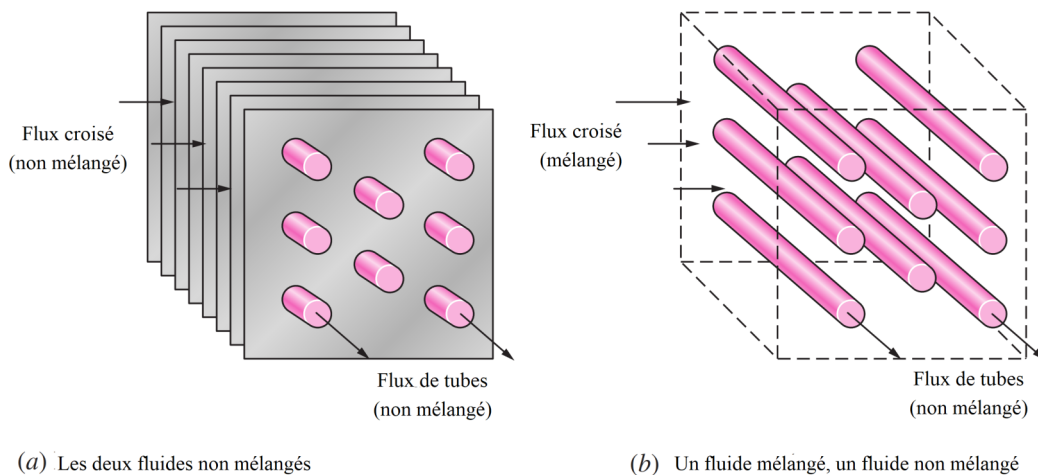


Figure 1.2 : Différentes configurations de flux dans les échangeurs de chaleur à flux croisés.

La différence entre ces quatre types de base peut être citée dans la surface de transfert de chaleur nécessaire pour transférer la quantité de chaleur souhaitée entre les deux fluides. Aussi, il est important de noter que plus la configuration est complexe, plus les technologies sont coûteuses, un facteur peut influencer directement sur la faisabilité de la technologie d'un point de vue économique [1]*.

Le **Tableau 1.3** ci-dessous détaille les types d'échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes cryogéniques, avec leurs coefficients d'échange thermique typiques et leurs applications spécifiques. Ces données sont cruciales pour évaluer la performance des échangeurs dans les cycles de liquéfaction.

Type d'échangeur	Coefficient d'échange thermique ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	Applications	Avantages	Inconvénients
Tubulaire	5000–1000	Liquéfaction de l'air, GNL	Grande surface d'échange, robuste	Coût élevé, encombrement
À plaques	2000–500	Cryogénie compacte, ammoniac	Compact, léger	Surface d'échange réduite
À spirale	1500–300	Refroidissement de gaz nobles	Moins cher	Surface d'échange limitée

Tableau 1.3 : Caractéristiques des échangeurs de chaleur cryogéniques.

Fondamental

Le coefficient global d'échange thermique (U) est donné par la relation : $1/U = 1/h_1 + \delta/k + 1/h_2$, où h_1 et h_2 sont les coefficients de convection des deux fluides, δ est l'épaisseur de la paroi, et k est la conductivité thermique du matériau. Dans les systèmes cryogéniques, les matériaux comme l'aluminium ou l'acier inoxydable sont privilégiés pour leur conductivité thermique élevée et leur résistance aux basses températures.

2.3. Échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes cryogéniques de liquéfaction

Définition

Les échangeurs de chaleur sont des composants essentiels des systèmes cryogéniques de liquéfaction. Ils sont utilisés pour transférer la chaleur du fluide réfrigérant au fluide à liquéfier.

- Les principaux types d'échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes cryogéniques de liquéfaction sont les suivants :

Échangeurs tubulaires : C'est le type d'échangeur de chaleur le plus couramment utilisé dans les systèmes cryogéniques de liquéfaction [2]* (**Figure 1.3**). Il est constitué de tubes en métal ou en céramique qui sont reliés par des plaques ou des brides. Le fluide réfrigérant circule à l'intérieur des tubes, tandis que le fluide à liquéfier circule à l'extérieur [3]*.

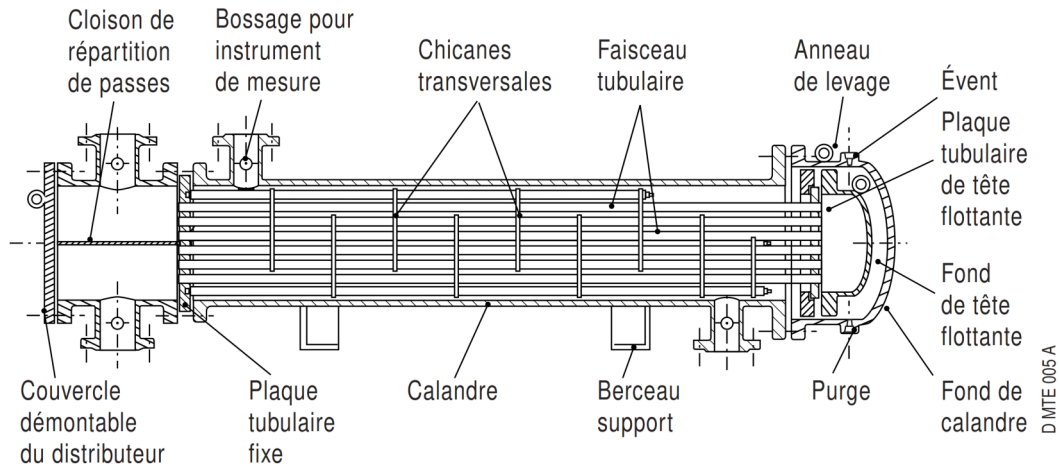


Figure 1.3 : L'échangeur à tête flottante (TYPE AES) est un exemple d'échangeur tubulaire

Échangeurs à plaques : Ce type d'échangeur de chaleur est constitué de plaques plates qui sont assemblées en couches (**Figure 1.4**). Les fluides à liquéfier et réfrigérant circulent entre les plaques. Les échangeurs à plaques sont généralement plus compacts et plus légers que les échangeurs tubulaires, mais ils ont également une surface de transfert de chaleur plus faible [2]^{*}.

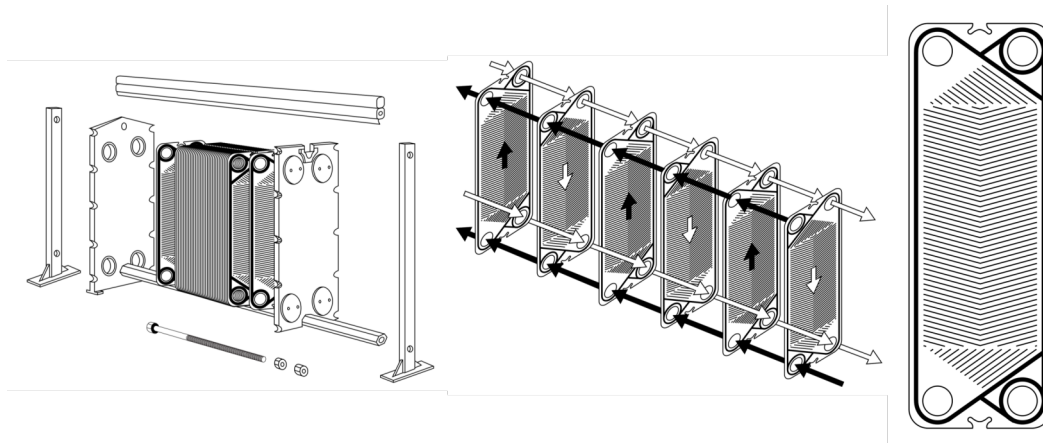


Figure 1.4 : Diagramme d'un échangeurs à plaques

Échangeurs à spirale : Ce type d'échangeur de chaleur est constitué de deux spirales métalliques qui sont en contact l'une avec l'autre (**Figure 1.5**). Le fluide réfrigérant circule à l'intérieur de la spirale interne, tandis que le fluide à liquéfier circule à l'intérieur de la spirale externe. Les échangeurs à spirale sont généralement moins chers que les échangeurs tubulaires ou à plaques, mais ils ont également une surface de transfert de chaleur plus faible [2]^{*}.

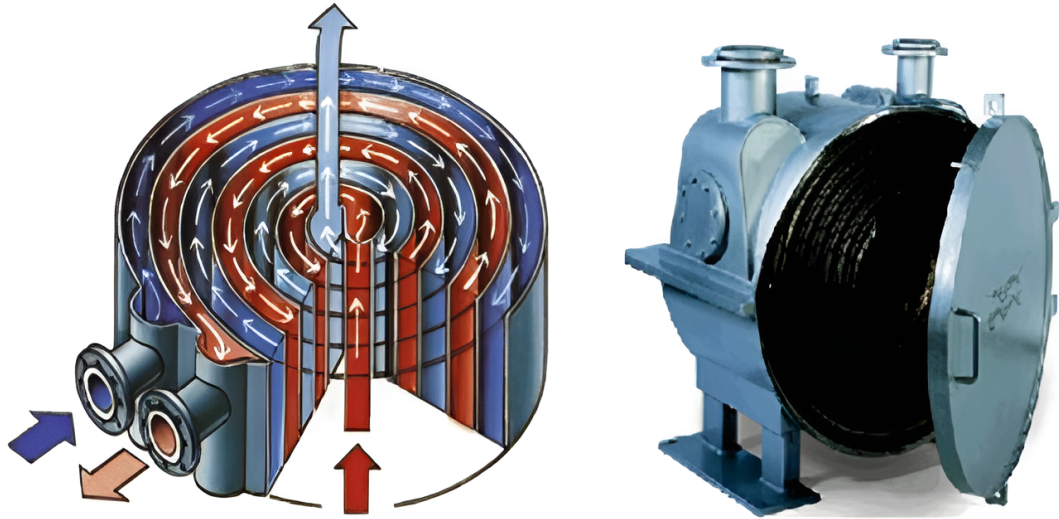


Figure 1.5 : Diagramme d'un échangeur de chaleur en spirale

2.3.1. Le choix du type d'échangeur de chaleur dépend de plusieurs facteurs, notamment :

1. La température et la pression des fluides à liquéfier et réfrigérant
2. Le débit des fluides
3. L'espace disponible
4. Le coût
5. La performance d'un échangeur de chaleur cryogénique est mesurée par son coefficient d'échange de chaleur. Le coefficient d'échange de chaleur est une mesure de la quantité de chaleur qui est transférée par unité de temps et par unité de surface. Un coefficient d'échange de chaleur élevé indique que l'échangeur de chaleur est plus efficace.

Les échangeurs de chaleur cryogéniques sont des composants critiques des systèmes de liquéfaction du gaz naturel. Ils doivent être conçus et fabriqués avec soin pour garantir une performance optimale.

2.4. Machines à expansion

🔑 Définition

Machines à expansion* ou la **machine à vapeur** est une invention dont les évolutions les plus significatives datent du XVIII^e siècle. C'est un moteur thermique à combustion externe. Il transforme l'énergie thermique que possède la vapeur d'eau fournie par une ou des chaudières en énergie mécanique (**Figure 1.6**).

📦 Complément

Comme première source d'énergie mécanique constructible et maîtrisable par l'Homme (contrairement à l'énergie de l'eau, des marées ou du vent, qui nécessitent des sites spéciaux et que l'on ne peut actionner facilement à la demande), elle a eu une importance majeure lors de la Révolution industrielle. Mais au XX^e siècle, la machine à vapeur « alternative » a été supplantée par la turbine à vapeur. Le moteur électrique et le moteur à combustion interne l'ont aussi remplacée dans la mise à disposition d'énergie mécanique.

Dans les systèmes cryogéniques, les turbines à expansion isentropique permettent une diminution significative de la température du gaz, conformément à la relation $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$, où γ est le rapport des capacités thermiques (C_p/C_v). Par exemple, pour l'azote ($\gamma \approx 1,4$), une détente de 40 atm à 1 atm peut réduire la température de 25 °C à environ -100 °C, améliorant l'efficacité du refroidissement.

2.4.1. Les machines à vapeur peuvent être classées en deux types:

1. Machine à vapeur à piston. Ce type de machine utilise un piston ou un piston couplé à un mécanisme de type bielle piston-vilebrequin. Dans ce type peut être.
2. Moteur à vapeur à expansion multiple
3. Moteur à débit uniforme ou à débit uniforme
4. Machine à vapeur à turbine

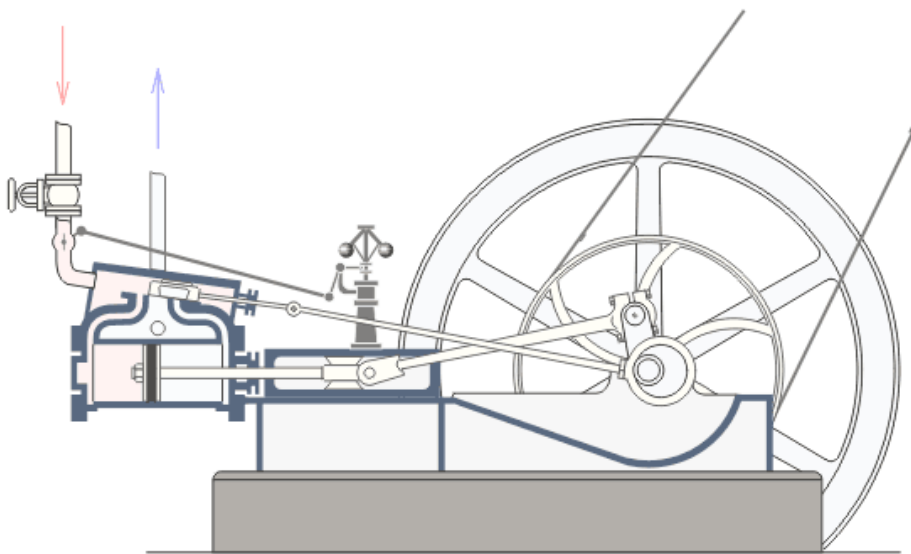


Figure 1.6 : Machine à vapeur

3. Cycles de liquéfaction

Comme mentionné précédemment, pour mener à bien le processus de transformation des gaz permanents en un état liquide, il est absolument nécessaire d'utiliser des méthodologies améliorées qui ont été spécifiquement développées pour cet objectif. Par conséquent, de nombreux chercheurs et scientifiques consacrent leurs efforts à la création de divers systèmes et cycles dans le but ultime de garantir l'exécution efficace de cette procédure. Les cycles de liquéfaction* décrits dans ce cours sont énumérés comme suit :

- Cycle (Expansion libre à travers une valve)
- Cycle de Linde*

- Cycle de Claude*
- Cycle de Kapitsa*
- Cycle Cascade*

3.1. Cycle (Expansion libre à travers une valve)

✍ Définition

Ce cycle se caractérise par une configuration très simple, dans laquelle son principe de travail consiste en la compression du gaz en de nombreuses étapes, y compris un refroidisseur intermédiaire, afin d'atteindre la pression nécessaire en fonction des propriétés du gaz, puis il traverse une valve de détente dans laquelle une détente rapide se produit, après cela, elle entre dans un séparateur ou un réservoir où deux phases différentes avec des fractions différentes sont séparées. **Figure 1.7** montre le schéma de base de ce cycle [3]*.

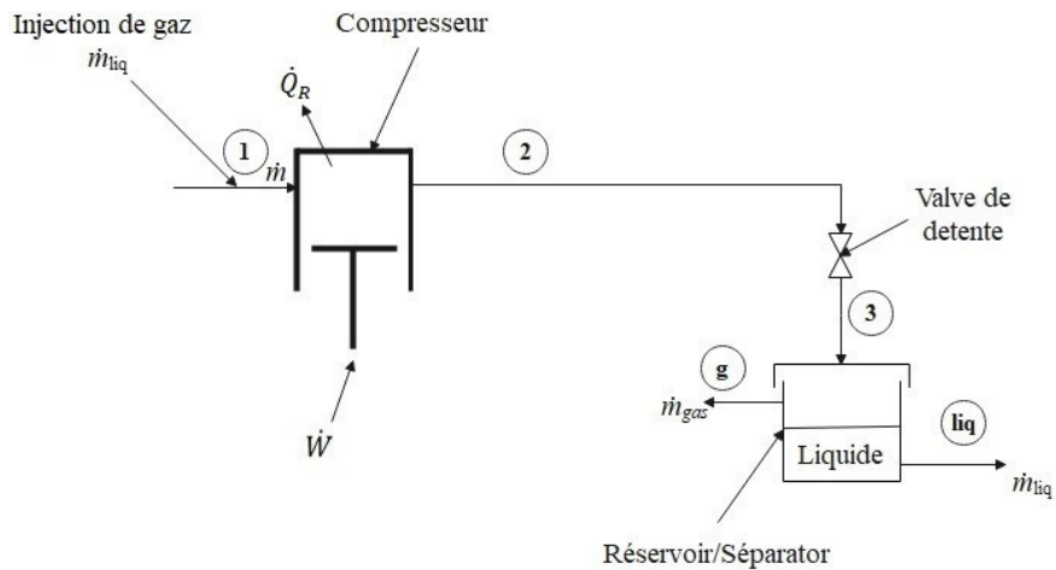


Figure 1.7 : Représentation schématique du Cycle (Expansion libre à travers une valve)

3.2. Cycle de Linde

✍ Définition

Le cycle Linde-Hampson est utilisé dans la liquéfaction des gaz, en particulier pour la séparation de l'air. Le cycle de Linde est le plus simple de tous les systèmes de liquéfaction, il repose sur la détente isenthalpique* (Joule-Thomson). Dans ce processus, le gaz comprimé à haute pression dans le compresseur à température constante (température ambiante) compression isotherme, Le réfrigérant comprimé est refroidi dans un échangeur de chaleur à contre-courant à pression constante, puis à travers une vanne de détente le gaz subit un deuxième abaissement de température (Détente de J-T*) dans la zone de saturation, ce qui permet de liquéfier partiellement le fluide dans le réservoir de séparation du liquide, le reste du gaz saturé non liquéfié subit un réchauffement isobare dans l'échangeur de chaleur (contre-courant) avant son retour vers le compresseur*.

Un schéma du cycle de Linde est illustré à la **Figure 1.8** et la représentation du cycle dans le diagramme T-s à la **Figure 1.9**.

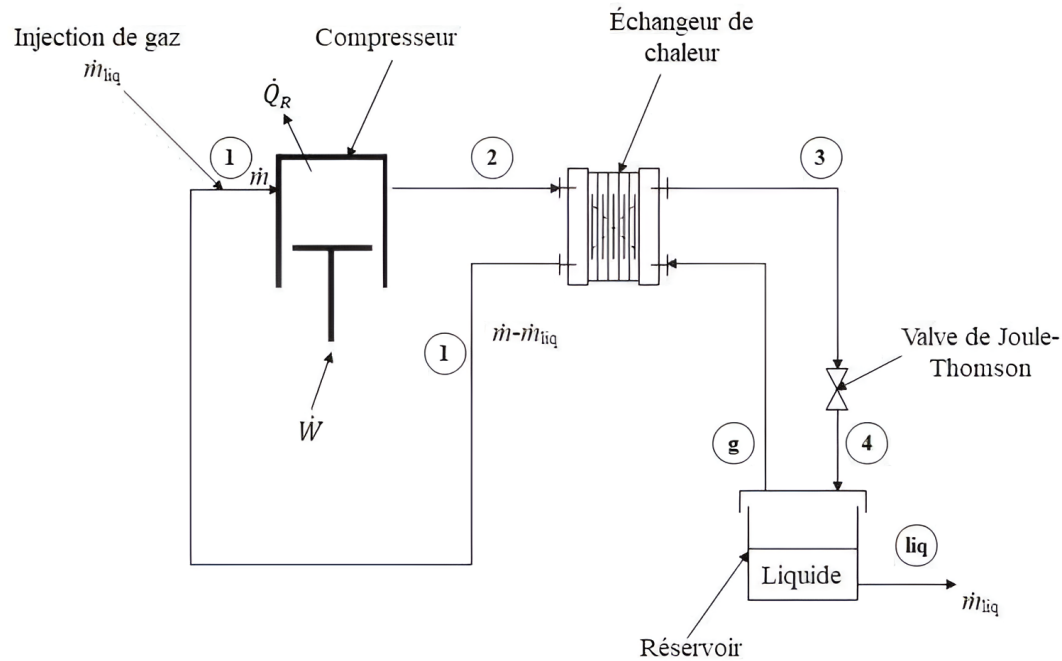


Figure 1.8: Représentation schématique du Cycle réel de Linde-Hampson

Le cycle Linde- Hampson est décrit par le fluide est constitué de quatre transformations successives qui ont es propriétés suivantes :

- 1-2** : Une compression isotherme du mélange (gaz d'appoint et gaz non condensé du cycle précédent) dans le compresseur,
- 2-3** : Un refroidissement isobare dans un échangeur de chaleur par le gaz non condensé du cycle précédent.
- 3-4** : Une détente isenthalpique dans la vanne de Joule-Thomson,
- 4-g-1** : Un réchauffement isobare de la fraction vapeur non liquéfiée dans l'échangeur de chaleur (l'état g) pour refroidir le gaz pressurisé avant qu'il ne s'engage dans le détendeur et mélangée au gaz d'appoint.
- 4-f** : La fraction liquide du mélange liquide-vapeur résultant est recueillie (l'état f).

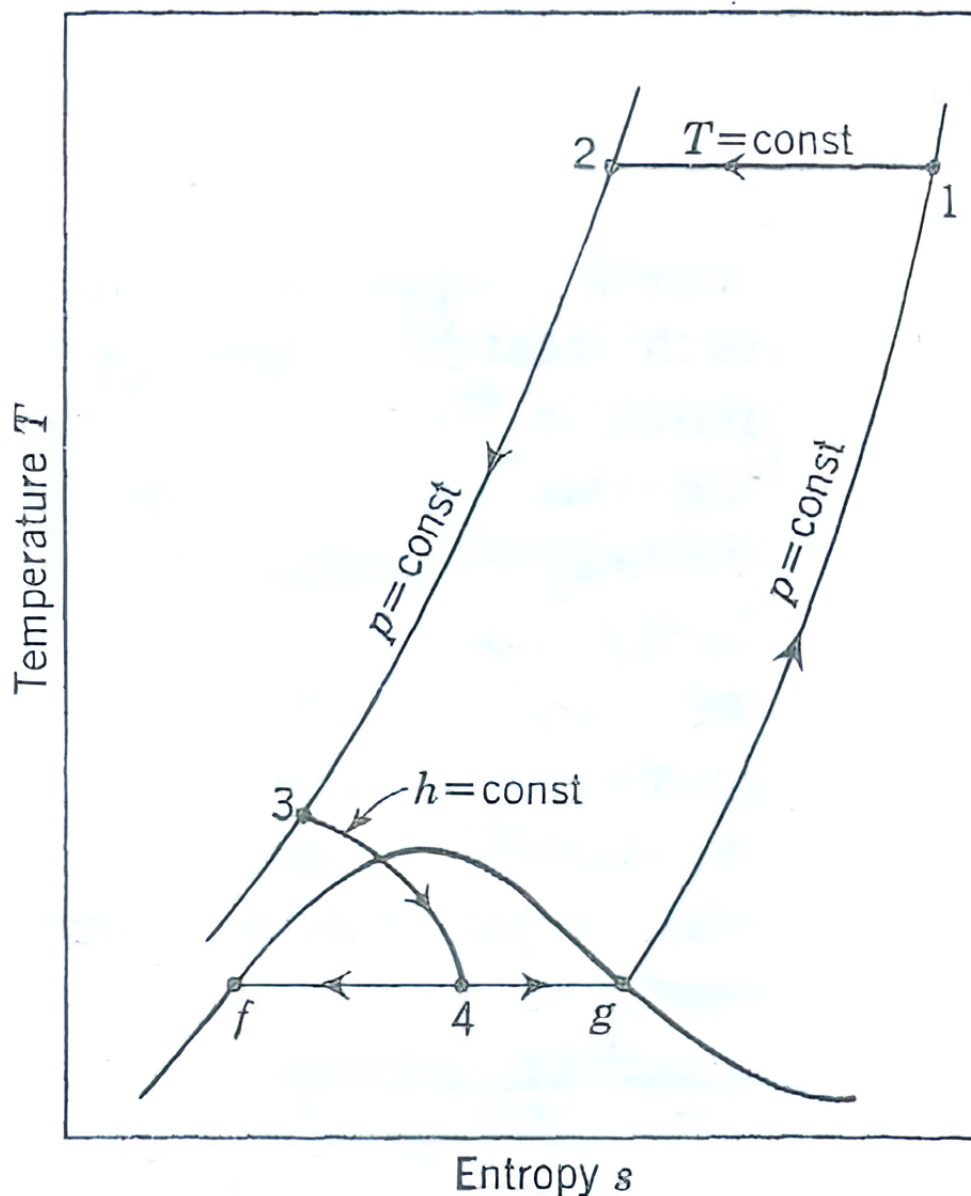


Figure 1.9: Diagramme T-s du cycle de Claude

Fondamental

L'efficacité du cycle de Linde dépend du coefficient Joule-Thomson ($\mu_{JT} = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$), qui doit être positif pour que la détente entraîne un refroidissement. Pour l'azote à 25 °C et 40 atm, $\mu_{JT} \approx 0,25$ K/bar, ce qui permet une liquéfaction partielle après détente.

3.3. Cycle de Claude

Définition

Dans le cycle de Claude (voir **Figure 1.10**), un dispositif supplémentaire a été intégré au schéma du cycle de Linde, ou dans lequel ce dispositif travaille sur le retrait d'énergie du flux gazeux en lui permettant d'effectuer un travail à l'aide d'un détendeur ou turbine.

Le cycle de Claude se compose de deux expansions, la première est isenthalpique tandis que l'autre est isentropique. Le principe de travail du cycle Claude est similaire au cycle Linde, au point 3 après le premier échangeur de chaleur (une combinaison de 3 échangeurs de chaleur), une partie du gaz partiellement refroidi est prélevée de l'échangeur de chaleur "1" et envoyé à la turbine où se produit une détente isentropique*, cette turbine fournit de la puissance et refroidit le gaz en même temps (point 7) [3]*.

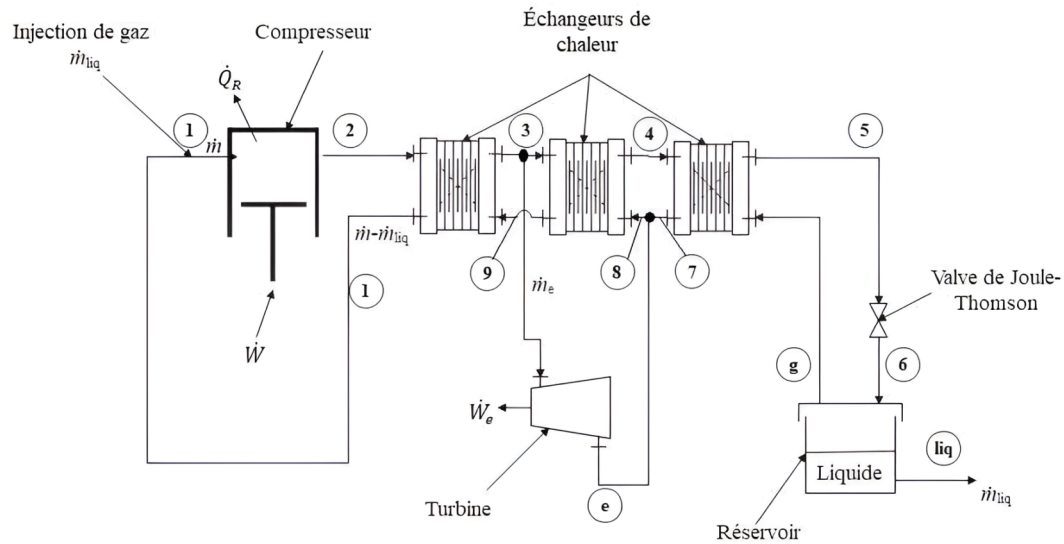


Figure 1.10 : Représentation schématique du cycle de Claude.

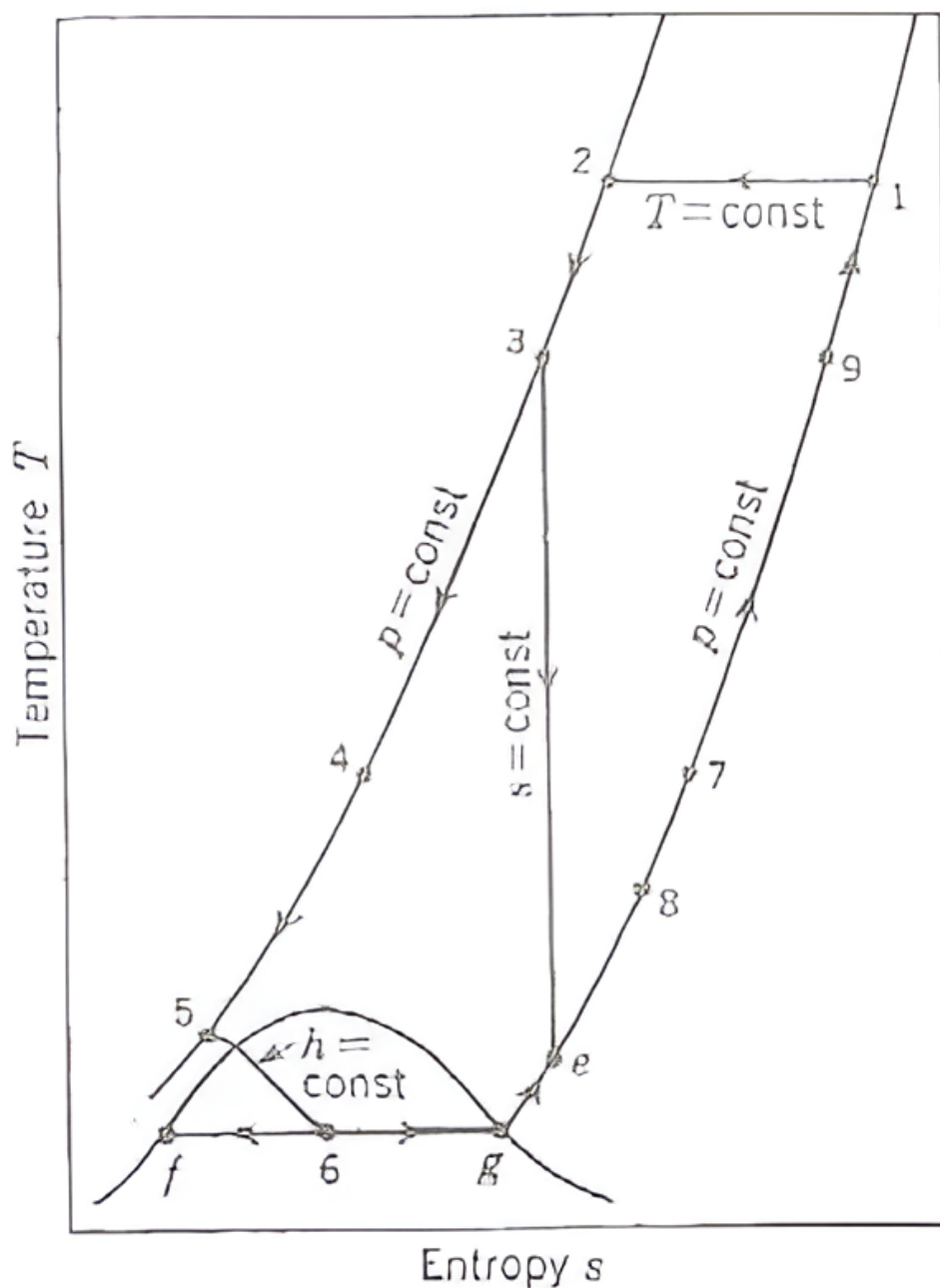


Figure 1.11 : Diagramme T-s du cycle de Claude.

Fondamental

L'efficacité du cycle de Claude est donnée par le rendement de liquéfaction ($Y = \frac{m_{\text{liq}}}{m_{\text{tot}}}$), où m_{liq} est la masse de gaz liquéfié et m_{tot} est la masse totale de gaz traité. Pour l'azote, Y peut atteindre 0,1 à 0,15, contre 0,05 pour le cycle de Linde, grâce à la détente isentropique.

3.4. Cycle de Kapitsa

 Définition

Le cycle Kapitsa est une version modifiée du cycle Claude dans laquelle le troisième échangeur de chaleur à basse température (BT) est supprimé du système.

- Le premier échangeur de chaleur est en fait un régénérateur* qui combine le processus de pré-refroidissement avec le processus de purification.
- Une autre modification pratique notable par rapport au cycle Claude est que la turbine à mouvement alternatif est remplacée par un moteur d'expansion rotatif.
- Les états de **haute pression (HP)** de cycle 4 et 5 et les états de **basse pression (BP)** 7 et 8 sont identiques.
- Les performances des cycles de Claude et Kapitza sont généralement étudiées pour l'air, l'azote, l'oxygène l'argon, le fluor et méthane.
- L'état d'entrée du compresseur est pris à 25 ° C et 1 atm pour les deux cycles mais la pression de sortie du compresseur est prise 40 atm pour le cycle Claude et 7 atm pour le cycle Kapitza.
- Les détendeurs sont supposés être isentropiques.

Le cycle Kapitsa est illustré sur la **Figure 1.12**.

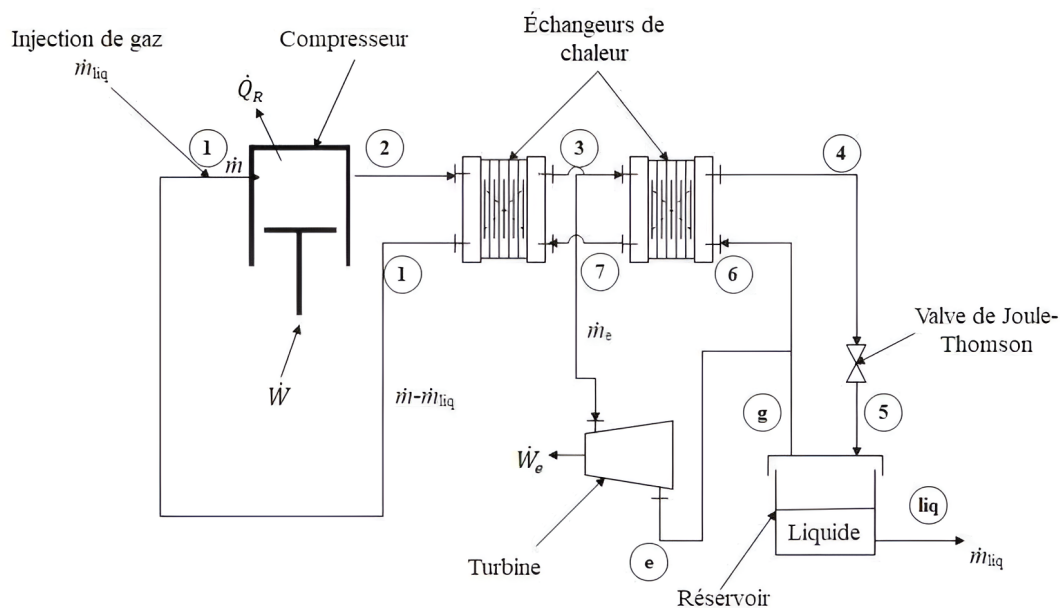


Figure 1.12: Représentation schématique du cycle de Kapitsa.

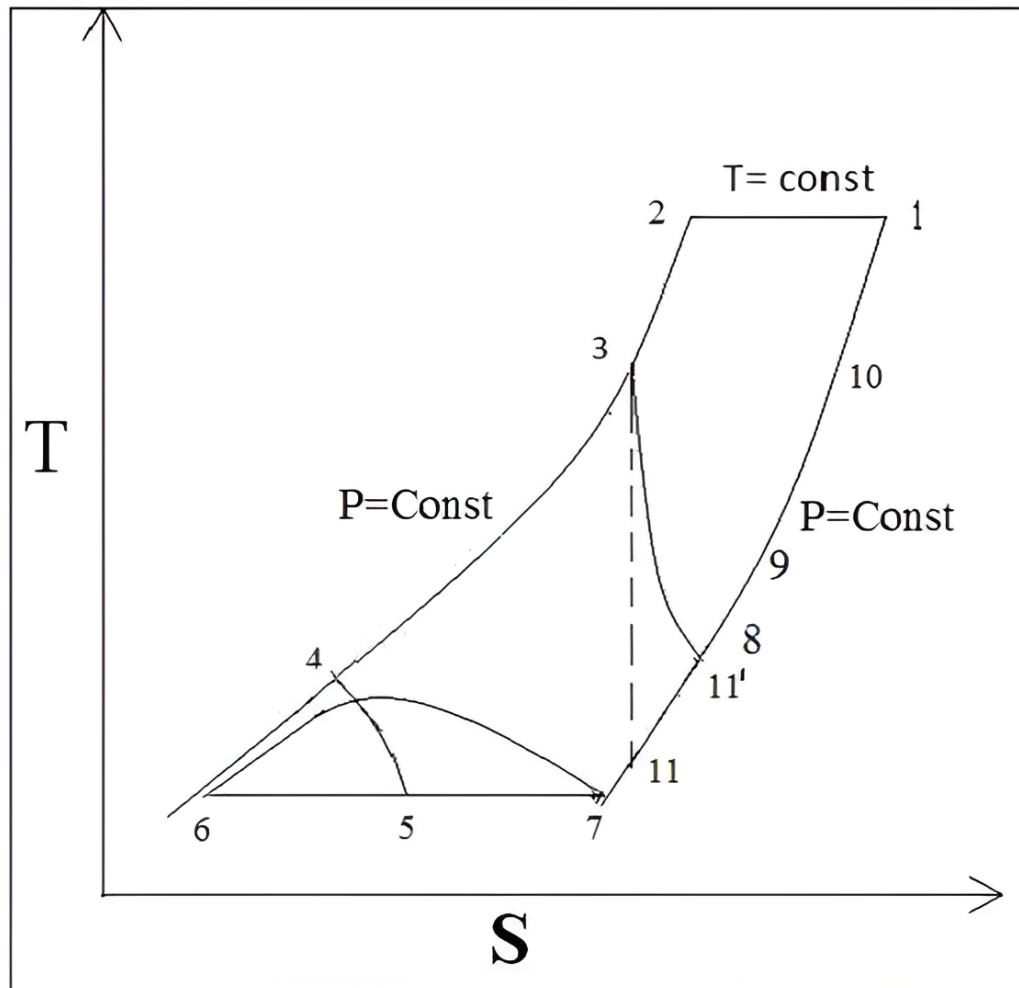


Figure 1.13 : Diagramme T-s du cycle de Kapitsa

Fondamental

Le cycle de Kapitsa est particulièrement adapté aux gaz comme l'hélium, dont la température critique est extrêmement basse ($-267,96\text{ °C}$). Le régénérateur améliore l'efficacité thermique en stockant et restituant la chaleur, réduisant l'énergie nécessaire pour atteindre les basses températures.

3.5. Cycle Cascade

Définition

Le cycle en cascade est l'utilisation de plusieurs cycles en les mettant en cascade, dans lequel l'évaporateur du premier cycle peut être utilisé comme condenseur dans le deuxième cycle lié, et de même façon pour les cycles suivants, dans les quels chaque évaporateur d'un cycle précédent peut servir de condenseur pour les prochains cycles, dont le transfert de froid s'effectue d'étage en étage (**Figure 1.14**).

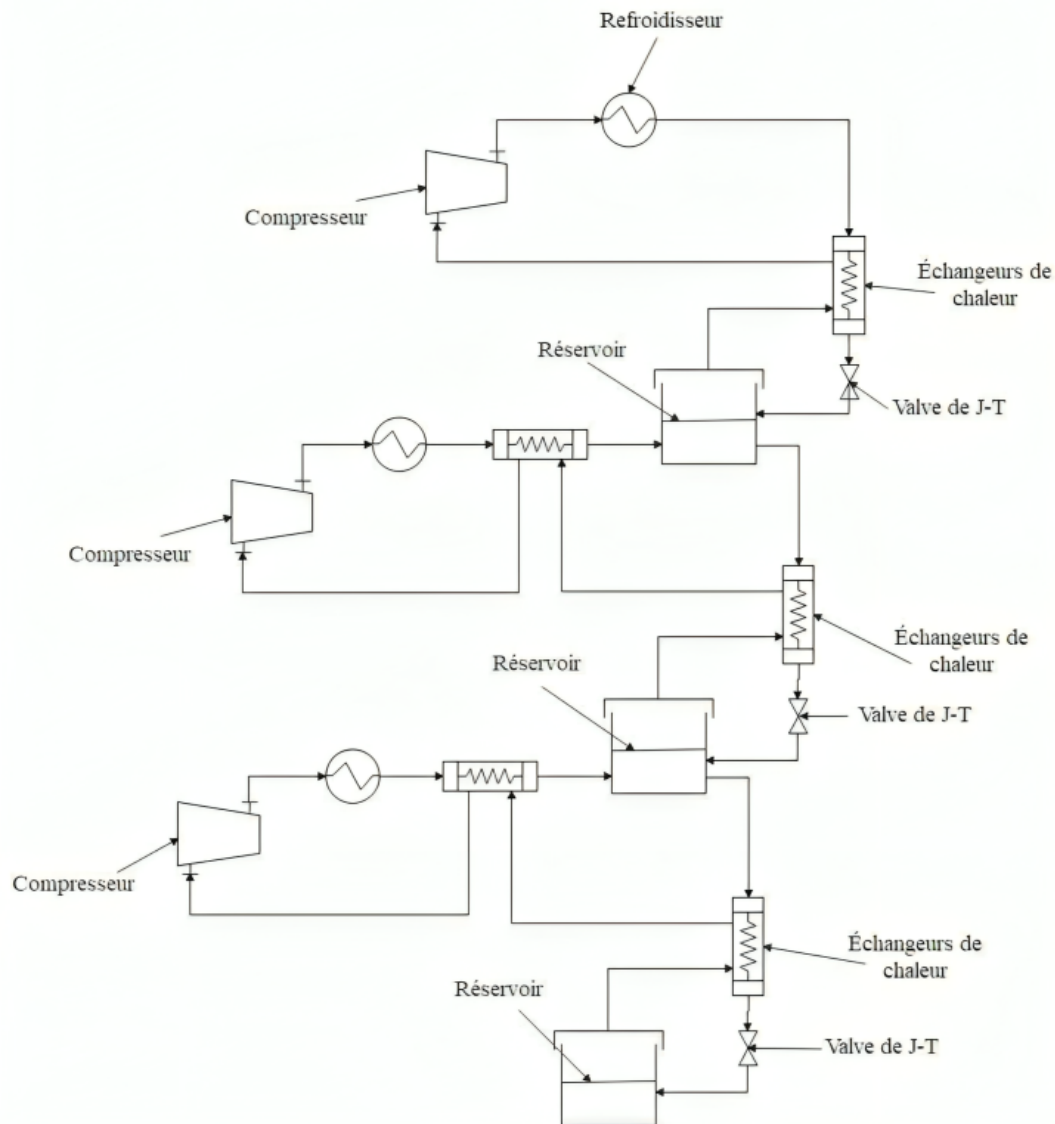


Figure 1.14 : Représentation schématique du cycle de cascade

Fondamental

Le cycle Cascade est particulièrement efficace pour la liquéfaction de gaz à très basse température, comme l'hélium. Chaque étage utilise un réfrigérant différent (par exemple, propane, éthylène, méthane), avec des températures d'ébullition décroissantes, permettant un refroidissement progressif. L'efficacité énergétique globale est donnée par le coefficient de performance (

$COP = \frac{Q_c}{W}$), où Q_c est la chaleur extraite et W est le travail fourni. Pour un cycle Cascade typique, le COP peut atteindre 0,2 à 0,3 pour l'hélium.

4. Activité d'auto-évaluation

Exercice : Exercice 1

Quelle est la principale caractéristique d'un gaz ?

- ☐ a) Densité élevée
- ☐ b) Faible compressibilité
- ☐ c) Faible densité et grande compressibilité
- ☐ d) Forte liaison entre les molécules

Exercice : Exercice 2

Laquelle des affirmations suivantes est fausse à propos des gaz ?

- ☐ a) Ils prennent la forme de leur contenant.
- ☐ b) Ils se compriment facilement.
- ☐ c) Ils sont toujours invisibles à l'oeil nu.
- ☐ d) Ils occupent tout l'espace disponible.

Exercice : Exercice 3

Lequel des gaz suivants est utilisé pour remplir des ballons ?

- ☐ a) Oxygène (O_2)
- ☐ b) Azote (N_2)
- ☐ c) Hydrogène (H_2)
- ☐ d) Hélium (He)

Exercice : Exercice 4

Quel est le principal mécanisme de transfert de chaleur à travers la paroi séparatrice d'un échangeur de chaleur ?

- ☐ (a) Convection
- ☐ (b) Conduction
- ☐ (c) Radiation
- ☐ (d) Diffusion

Exercice : Exercice 5

Lequel des facteurs suivants n'est pas un facteur important dans le choix d'un échangeur de chaleur cryogénique ?

- ☐ a) La température et la pression des fluides
- ☐ b) Le débit des fluides
- ☐ c) La viscosité des fluides
- ☐ d) L'espace disponible
- ☐ e) Le coût

Exercice : Exercice 6

Le cycle de Linde-Hampson est utilisé pour:

- ☐ (a) La liquéfaction des gaz
- ☐ (b) La séparation des gaz
- ☐ (c) La production d'électricité
- ☐ (d) La climatisation

Exercice : Exercice 7

Le cycle Kapitsa est une modification du cycle :

- ☐ a) Stirling
- ☐ b) Claude
- ☐ c) Brayton
- ☐ d) Rankine

Exercice : Exercice 8

La principale différence entre le cycle Kapitsa et le cycle Claude réside dans :

- ☐ a) L'absence de régénérateur
- ☐ b) L'utilisation d'une turbine à mouvement alternatif
- ☐ c) La suppression du troisième échangeur de chaleur à basse température
- ☐ d) L'utilisation d'un compresseur à piston

Exercice : Exercice 9

Dans le cadre du cycle en cascade, quel est le rôle de l'évaporateur du premier cycle dans les cycles suivants ?

- ☐ a) Il agit comme un condenseur

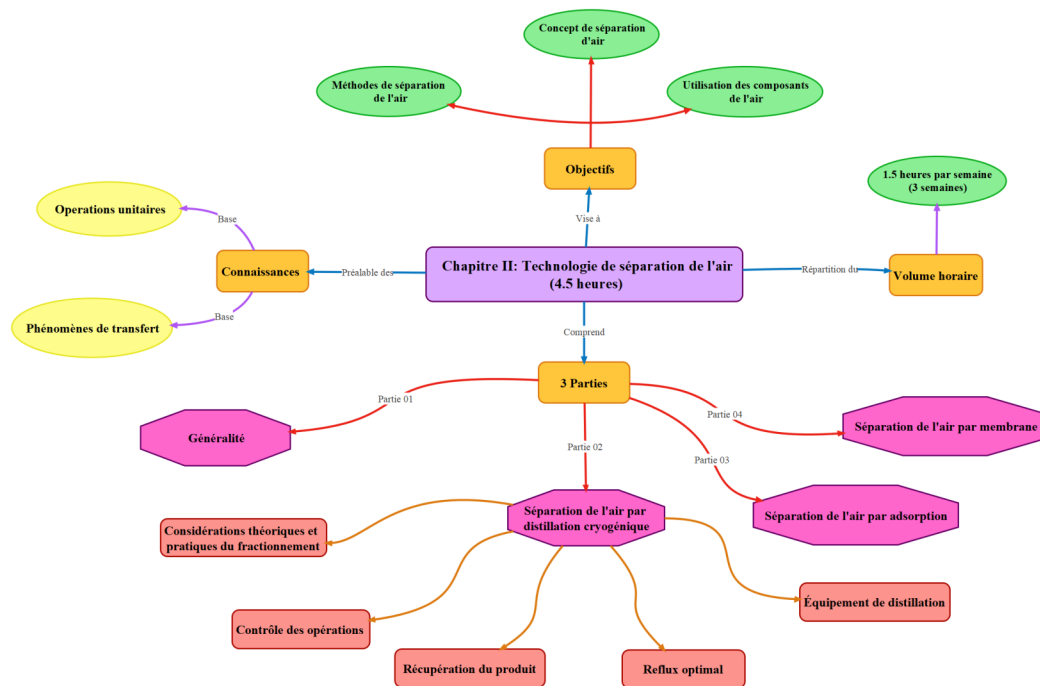
- ☐ b) Il agit comme un évaporateur
- ☐ c) Il n'a aucun rôle
- ☐ d) Il agit comme un compresseur

Chapitre 2: Technologie de séparation de l'air

III

Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux de la séparation de l'air, un processus clé dans l'industrie des gaz permettant d'extraire des composants de haute pureté tels que l'oxygène, l'azote et l'argon pour des applications industrielles variées. La séparation de l'air repose sur l'exploitation des propriétés physiques des gaz, notamment leurs différences de points d'ébullition, de perméabilité ou d'adsorption, selon les technologies employées.

Nous aborderons les principales méthodes de séparation, notamment la distillation cryogénique, basée sur la liquéfaction et le fractionnement à basse température, ainsi que les procédés non cryogéniques comme l'adsorption par variation de pression (PSA/VSA) et la séparation par membrane. Ces études incluent l'identification des technologies de séparation, la compréhension de leur principe de fonctionnement, l'application et l'interprétation des diagrammes de procédé et des courbes de performance, l'analyse de leur faisabilité technique et économique, la conception de schémas de configuration, et l'évaluation des connaissances acquises sur leur applicabilité industrielle.



Carte mentale du chapitre 2

1. Généralités

L'air est effectivement un mélange de gaz incolore, invisible et inodore qui enveloppe la Terre. Sa composition est essentielle à la vie sur notre planète, car elle nous fournit l'oxygène dont nous avons besoin pour respirer.

Voici les principaux composants de l'air (**Figure 2.1**):

- **Azote (N_2)** : environ 78%
- **Oxygène (O_2)** : environ 21%
- **Argon (Ar)** : environ 0,93%
- **Dioxyde de carbone (CO_2)** : environ 0,04% (en augmentation constante)
- **Autres gaz** : en très petites quantités, y compris la vapeur d'eau, le néon, l'hélium, le krypton, le xénon, le méthane et l'ozone. . La composition peut varier légèrement selon l'altitude et la pollution, comme illustré dans le **Tableau 2.1**.

La composition de l'air

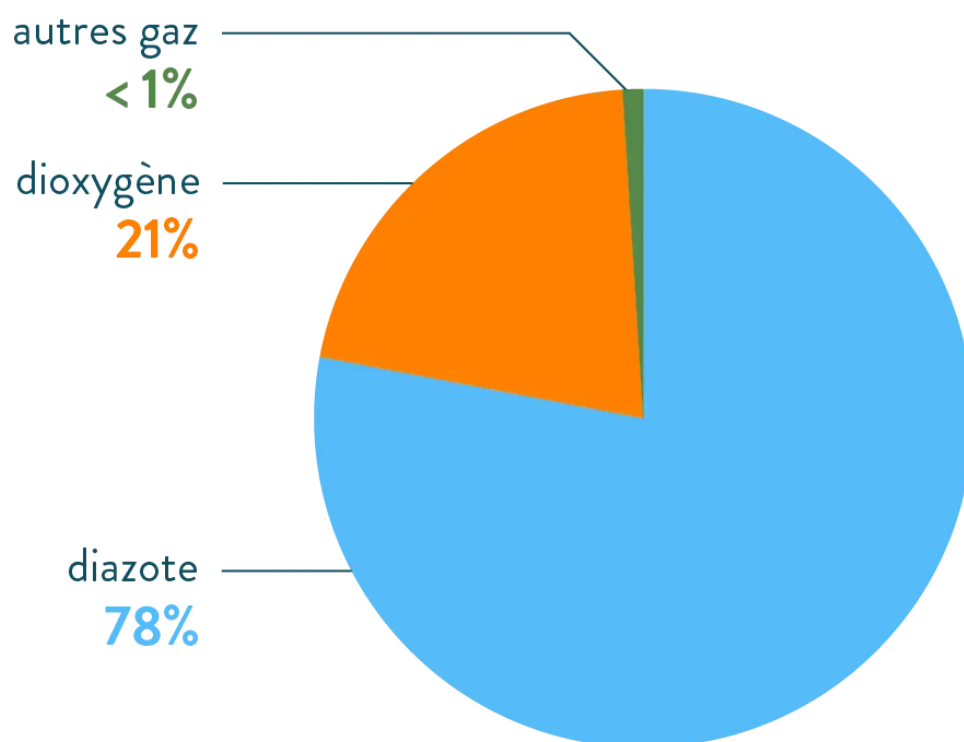


Figure 2.1 : Composition de l'air

Gaz	Pourcentage (%)	Applications principales
Azote (N ₂)	78~	Cryogénie, conditionnement alimentaire
Oxygène (O ₂)	21~	Production de métaux, chimie, médical
Argon (Ar)	0.93~	Soudage, sidérurgie, électronique
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0.04~	Industrie alimentaire, chimie
Autres gaz	0.03>	Divers (recherche, éclairage, cryogénie)

Tableau 2.1 : Composition typique de l'air atmosphérique

Il est important de noter que la composition de l'air peut varier légèrement d'un endroit à l'autre et en fonction de l'altitude. Par exemple, la concentration en dioxyde de carbone est plus élevée dans les zones urbaines en raison de la pollution atmosphérique.

Les composants de l'air, tels que l'oxygène, l'azote et l'argon, jouent un rôle crucial dans de nombreux processus industriels. L'oxygène est essentiel pour la production de métaux et de produits chimiques, tandis que l'azote est utilisé pour la cryogénie et le conditionnement d'aliments. L'argon, quant à lui, sert de gaz inerte dans le soudage, la sidérurgie et l'électronique. La forte demande pour ces gaz a stimulé la recherche et le développement de technologies de **séparation de l'air**^{*}, aboutissant à la création de nombreuses installations et procédés pour extraire ces composants clés.

Les techniques de séparation de l'air peuvent être classées en deux catégories principales en fonction de leur nature : la première concerne la séparation cryogénique de l'air, tandis que la seconde concerne les procédés non cryogéniques. La première catégorie est la plus répandue et la plus utilisée, en particulier lorsque l'on recherche une grande pureté et des taux de production élevés. Le principe de fonctionnement de cette catégorie consiste à utiliser une distillation à basse température pour séparer l'air en **N₂**, **O₂** et **Ar**, sous forme de gaz ou de liquides. Ensuite, pour les procédés non cryogéniques, ils fonctionnent près de la température ambiante et sont utilisés pour la production d'azote ou d'oxygène sous forme de gaz. Ces procédés peuvent être un choix économique lorsque la demande de gaz est relativement faible et qu'une très grande pureté^{*} des gaz n'est pas nécessaire[1]^{*}.

Selon la littérature et les connaissances de fabrication de l'industrie, il existe trois principales méthodes de séparation de l'air sont généralement considérées comme suit :

- **la séparation cryogénique**
- **la séparation par adsorption**^{*}
- **la séparation par membrane**^{*}

Les points suivants présentent ces méthodes qui sont les plus couramment utilisées pour la séparation de l'air.

2. Séparation de l'air par distillation cryogénique

Le secteur des gaz industriels repose en grande partie sur les unités de séparation d'air. Cette partie vise à présenter les différentes notions relatives aux procédés de séparation d'air. Pour commencer, vous pouvez visionner la vidéo ci-dessous pour comprendre le principe de la séparation de l'air. La séparation de l'air est effectuée pour produire de l'oxygène, de l'azote, de l'argon et, dans certains cas spéciaux, d'autres gaz rares (krypton, xénon, hélium, néon) par distillation cryogénique. Les usines de séparation de l'air sont conçues pour produire de l'oxygène et de l'azote par compression, refroidissement, liquéfaction et distillation de l'air. Les produits peuvent être fabriqués sous forme gazeuse pour l'approvisionnement par pipeline ou sous forme de liquide cryogénique* pour le stockage et la distribution par camions-citernes. Linde est l'un des plus grands producteurs d'usines de séparation de l'air, ayant construit environ 2800 usines de séparation de l'air cryogénique dans plus de 80 pays et dominant le marché mondial de la fabrication d'usines de séparation de l'air [5].



2.1. Considérations théoriques et pratiques du fractionnement

2.1.1. Principes théoriques du fractionnement

Le fractionnement, ou distillation fractionnée, constitue le socle de la séparation des composants de l'air (azote, oxygène et argon) en exploitant les différences de volatilité, qui sont déterminées par les points d'ébullition spécifiques de chaque gaz [1]^{*}. Ce processus est réalisé dans des conditions cryogéniques, où l'air est liquéfié à des températures extrêmement basses pour permettre une séparation efficace des gaz en fonction de leurs propriétés physiques. Le **Tableau 2.2** illustre les points d'ébullition des principaux composants de l'air, mettant en évidence les différences qui rendent la séparation possible.

Gaz	Point d'ébullition (°K)	Point d'ébullition (°C)
Azote (N ₂)	77.36	195.79-
Oxygène (O ₂)	90.18	182.95-
Argon (Ar)	87.30	185.85-

Tableau 2.2 : Points d'ébullition des principaux composants de l'air

 Fondamental

Théoriquement, la distillation fractionnée repose sur le principe que les gaz ayant des points d'ébullition plus bas, comme l'azote, sont plus volatils et s'évaporent plus facilement que ceux ayant des points d'ébullition plus élevés, comme l'oxygène ou l'argon [2]^{*}. Lors de la distillation, les gaz sont séparés dans des colonnes de distillation grâce à ces différences de volatilité. Pour atteindre cet objectif, l'air doit être refroidi à des températures cryogéniques (environ -195 °C) pour être liquéfié, puis introduit dans des colonnes de distillation opérant à des pressions moyenne et basse. Ce processus permet une séparation précise des composants en fonction de leurs comportements thermodynamiques [3]^{*}. Les bases théoriques de ce procédé ont été établies dès les travaux pionniers de Carl von Linde, qui a développé les premières techniques de liquéfaction de l'air à la fin du XIX^e siècle [1]^{*}.

2.1.2. Processus technologique de la séparation par distillation cryogénique

 Définition

La séparation de l'air par distillation cryogénique est un processus complexe qui comprend plusieurs étapes technologiques interdépendantes, chacune nécessitant une ingénierie précise pour optimiser l'efficacité et la pureté des gaz produits (voir **Figure 2.2**) [4]^{*}. Ces étapes sont les suivantes :

1. **Compression** : L'air atmosphérique est comprimé à des pressions élevées (généralement entre 5 et 10 bars) pour augmenter sa densité et faciliter son refroidissement. Cette étape est énergivore, représentant une part significative de la consommation totale d'énergie du processus [2]*. Les compresseurs doivent être conçus pour minimiser les pertes d'énergie tout en assurant une compression stable et efficace.

2. **Pré-purification** : Avant le refroidissement, l'air comprimé passe par une unité de pré-purification pour éliminer les impuretés telles que le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les hydrocarbures, qui pourraient geler à basse température et obstruer les équipements [3]^{*}. Cette étape utilise généralement des adsorbants^{*} comme les tamis moléculaires ou l'alumine activée.
3. **Refroidissement** : L'air comprimé et purifié est refroidi à l'aide d'échangeurs de chaleur performants jusqu'à atteindre des températures proches du point de liquéfaction (environ -195 °C). Ce refroidissement repose sur des cycles de réfrigération avancés, tels que le cycle de Claude ou le cycle de Linde, qui exploitent la détente par turbine ou par vanne pour abaisser la température [1]^{*}. Les échangeurs de chaleur sont conçus pour maximiser le transfert thermique tout en minimisant les pertes.
4. **Liquéfaction** : Une fois refroidi, l'air est transformé en phase liquide, ce qui facilite la séparation de ses composants dans les colonnes de distillation. La liquéfaction est une étape critique, car elle nécessite un contrôle précis des conditions de température et de pression [4]^{*}.
5. **Distillation** : L'air liquide est introduit dans des colonnes de distillation opérant à des pressions moyenne et basse. Ces colonnes sont conçues pour exploiter les différences de volatilité des gaz : l'azote, plus volatile, s'accumule en haut de la colonne, tandis que l'oxygène et l'argon, moins volatils, sont collectés en bas [3]^{*}. Dans certaines configurations, une colonne supplémentaire est utilisée pour séparer l'argon, dont le point d'ébullition est proche de celui de l'oxygène, ce qui complique son extraction [2]^{*}.

La **Figure 2.3** illustre un schéma typique d'une unité de séparation cryogénique, mettant en évidence les flux d'air entre les compresseurs, les échangeurs de chaleur, les unités de pré-purification et les colonnes de distillation. Ce schéma montre l'intégration complexe des composants pour assurer une séparation efficace et continue [4]^{*}.

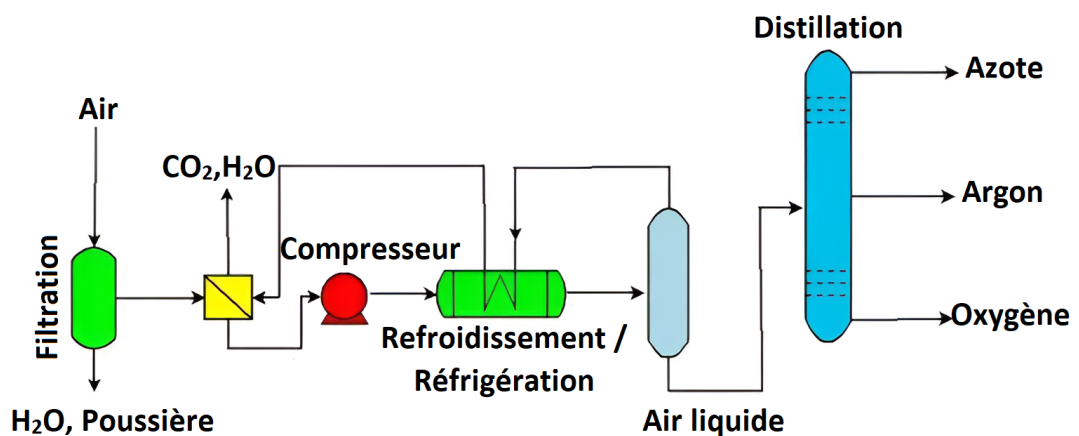


Figure 2.3 : Diagramme schématique d'un procédé principal d'une séparation cryogénique de l'air

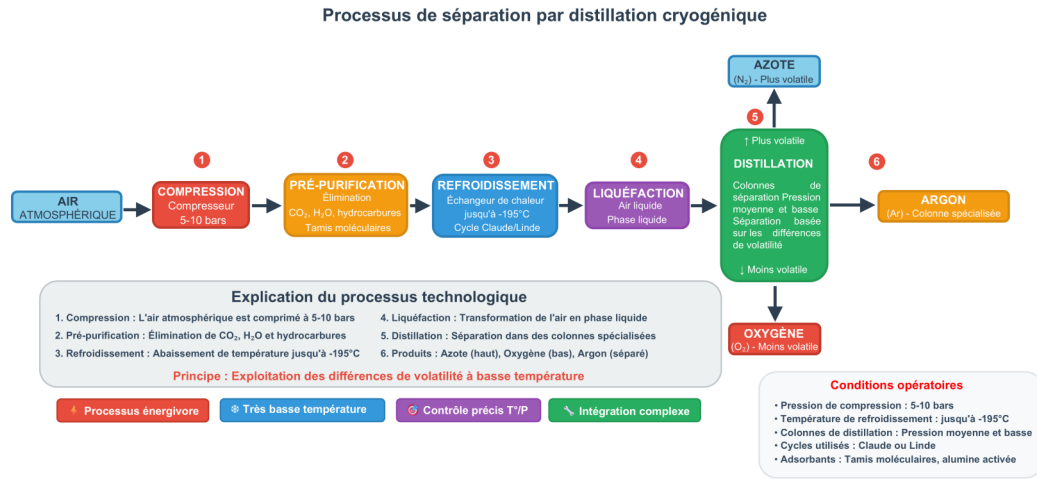


Figure 2.3 : Processus technologique de la séparation par distillation cryogénique

2.1.3. Considérations pratiques

La mise en œuvre pratique de la distillation cryogénique soulève plusieurs défis techniques et économiques, qui doivent être pris en compte pour optimiser les performances du système :

1. Efficacité énergétique :

- La compression et le refroidissement sont les étapes les plus énergivores du processus, représentant jusqu'à 70 % de la consommation totale d'énergie dans une unité cryogénique [2]*. Par exemple, la compression de l'air à des pressions élevées nécessite des compresseurs robustes, tandis que le refroidissement à des températures cryogéniques demande des systèmes de réfrigération sophistiqués.
- Pour améliorer l'efficacité énergétique, des cycles optimisés comme le cycle de Claude ou le cycle de Linde sont employés. Ces cycles utilisent la détente par turbine pour récupérer une partie de l'énergie et réduire les besoins en énergie externe [1]*. De plus, les échangeurs de chaleur à haute efficacité permettent de récupérer la chaleur résiduelle, réduisant ainsi les pertes thermiques [4]*.
- Les avancées récentes incluent l'intégration de technologies comme les compresseurs à vitesse variable et les systèmes de contrôle intelligents pour optimiser la consommation d'énergie en temps réel [3]*.

2. Pureté des gaz :

- Les applications critiques, telles que la production d'oxygène médical ou de gaz pour l'industrie électronique (par exemple, la fabrication de semi-conducteurs), exigent une pureté supérieure à 99,9 % [3]*. Cela nécessite une conception précise des colonnes de distillation pour minimiser les contaminations croisées entre les gaz.
- La pré-purification* de l'air avant la liquéfaction est essentielle pour éliminer les traces de dioxyde de carbone, d'eau et d'autres impuretés qui pourraient compromettre la pureté des gaz produits [2]*. Les unités de pré-purification utilisent souvent des adsorbants à haute performance pour garantir des niveaux d'impuretés inférieurs à 1 ppm (partie par million).
- Dans certains cas, des étapes de purification supplémentaires, comme la distillation secondaire ou l'adsorption, sont nécessaires pour atteindre des niveaux de pureté ultra-élevés [4]*.

3. Échelle de production :

- Les unités de distillation cryogénique sont particulièrement adaptées à la production à grande échelle, comme l'approvisionnement des industries métallurgiques, chimiques ou pétrochimiques, où des volumes importants de gaz sont requis [4]*. Ces unités peuvent produire des milliers de tonnes d'oxygène, d'azote et d'argon par jour.
- Cependant, leur coût d'investissement élevé et leur complexité les rendent moins adaptées aux applications locales ou de petite échelle, comme les hôpitaux ou les petites usines [3]*. Dans ces cas, des technologies non cryogéniques*, telles que l'adsorption par variation de pression (PSA) ou la séparation par membrane, offrent une alternative plus économique et flexible [2]*.
- La conception des unités cryogéniques doit également prendre en compte la modularité pour permettre une adaptation aux variations de la demande de production [4]*.

2.1.4. Défis pratiques

- **Coût d'investissement** : La construction d'une unité de distillation cryogénique nécessite des investissements initiaux importants pour l'acquisition de compresseurs, d'échangeurs de chaleur, de colonnes de distillation et de systèmes de contrôle avancés [1]*. Ces coûts peuvent limiter l'adoption de cette technologie dans les régions à faible capacité financière.
- **Maintenance** : Les équipements cryogéniques, en particulier les compresseurs et les échangeurs de chaleur, sont soumis à des conditions extrêmes, ce qui nécessite un entretien régulier pour prévenir les pannes et maintenir l'efficacité du système [4]*. Les coûts de maintenance peuvent représenter une part significative des dépenses opérationnelles.
- **Sécurité** : Travailler à des températures cryogéniques et à des pressions élevées présente des risques importants, notamment les fuites de gaz ou les défaillances des équipements [2]*. Des protocoles de sécurité stricts, incluant des systèmes de détection de fuites et des procédures d'arrêt d'urgence, sont essentiels pour garantir la sécurité des opérateurs et des installations.
- **Impact environnemental** : La consommation énergétique élevée des unités cryogéniques peut avoir un impact environnemental significatif, en particulier si l'énergie utilisée provient de sources non renouvelables. Les efforts récents se concentrent sur l'intégration de sources d'énergie renouvelables pour réduire l'empreinte carbone de ces installations [3]*.

Fondamental

Les avancées dans les technologies cryogéniques visent à améliorer l'efficacité énergétique et à réduire les coûts d'exploitation. Par exemple, l'utilisation de nouveaux matériaux pour les échangeurs de chaleur, comme les alliages à haute conductivité thermique, peut augmenter l'efficacité du transfert de chaleur [4]*. De plus, l'intégration de l'intelligence artificielle pour optimiser les paramètres de fonctionnement des unités cryogéniques (pression, température, débit) est une voie prometteuse pour réduire la consommation d'énergie et améliorer la pureté des gaz [3]*. Enfin, le développement de technologies hybrides combinant la distillation cryogénique avec des procédés non cryogéniques pourrait offrir des solutions plus flexibles pour répondre aux besoins variés des industries [2]*.

2.2. Contrôle des opérations

Le contrôle des opérations est un élément essentiel pour optimiser la séparation de l'air par distillation cryogénique, garantissant une efficacité maximale, une pureté des gaz conforme aux exigences et une sécurité opérationnelle [1]*. Ce processus repose sur la surveillance et la régulation précise des paramètres clés, tels que la pression, la température, le débit et la composition des flux. Ces paramètres doivent être maintenus dans des plages spécifiques pour assurer une séparation efficace des composants de l'air (azote, oxygène et argon) tout en minimisant la consommation énergétique et les coûts opérationnels [2]*. Les systèmes automatisés modernes, équipés de capteurs avancés et d'algorithmes de contrôle, jouent un rôle central dans la gestion de ces paramètres.

2.2.1. Paramètres clés et leur contrôle

1. Pression :

- La pression est un paramètre critique dans la séparation cryogénique, notamment lors de la compression initiale de l'air. Une pression typique de 5 à 6 bars est maintenue pour faciliter la liquéfaction de l'air et optimiser le fonctionnement des colonnes de distillation [3]*. Une pression trop élevée peut augmenter la consommation énergétique, tandis qu'une pression trop faible peut compromettre l'efficacité de la liquéfaction et de la séparation [1]*.
- Des capteurs de pression sont installés à plusieurs points du procédé, notamment à l'entrée des compresseurs et dans les colonnes de distillation, pour surveiller et ajuster la pression en temps réel. Les algorithmes **PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé)** sont utilisés pour réguler la pression en ajustant les vannes de contrôle et les compresseurs [4]*.

2. Température :

- La température est maintenue dans une plage de -195 °C à -183 °C pour assurer la liquéfaction de l'air et la séparation des gaz en fonction de leurs points d'ébullition [2]*. Par exemple, l'azote (point d'ébullition : -195,79 °C) est séparé plus facilement à des températures proches de -195 °C, tandis que l'oxygène (point d'ébullition : -182,95 °C) nécessite des températures légèrement plus élevées pour une séparation efficace [3]*.
- Des capteurs de température de haute précision, souvent basés sur des thermocouples ou des thermomètres à résistance, sont utilisés pour surveiller les conditions dans les échangeurs de chaleur et les colonnes de distillation. Les systèmes de contrôle automatisés ajustent les flux de réfrigérant ou les cycles de détente pour maintenir ces températures dans les plages optimales [4]*.

3. Débit :

- Le débit d'air entrant, généralement compris entre 1000 et 5000 Nm³/h (mètres cubes normaux par heure), est ajusté pour maximiser la récupération des produits (azote, oxygène, argon) tout en optimisant la capacité productive de l'unité [1]*. Un débit trop élevé peut surcharger les colonnes de distillation, réduisant la pureté des gaz, tandis qu'un débit trop faible peut diminuer la productivité globale [2]*.
- Les débitmètres massiques ou volumétriques sont utilisés pour mesurer les flux d'air et de gaz produits. Les algorithmes PID régulent les vannes de contrôle pour ajuster le débit en fonction des besoins de production et des conditions du procédé [4]*.

4. Composition des flux :

- La composition des flux (proportion d'azote, d'oxygène et d'argon) est surveillée à l'aide d'analyseurs de gaz en ligne, tels que des chromatographes en phase gazeuse ou des spectromètres, pour garantir que les gaz produits répondent aux spécifications de pureté, souvent

supérieures à 99,9 % pour des applications médicales ou électroniques [3] ^{*}.

- Les systèmes de contrôle ajustent les paramètres de distillation (pression, température, débit) pour maintenir la composition des flux dans les limites souhaitées, en minimisant les pertes de produits et en optimisant la séparation [1] ^{*}.

2.2.2. Systèmes de contrôle automatisés

Les systèmes de contrôle modernes utilisent des technologies avancées pour surveiller et réguler les opérations de séparation de l'air. Les capteurs de pression, de température et de débit sont intégrés dans un système de contrôle-commande distribué (**Distributed Control System - DCS**) ou un système **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)** pour fournir une surveillance en temps réel [4] ^{*}. Les algorithmes PID sont largement utilisés pour ajuster dynamiquement les paramètres du procédé en réponse aux variations des conditions d'exploitation. Par exemple :

- **Contrôle proportionnel (P)** : Ajuste les paramètres en proportion directe à l'écart mesuré (erreur) par rapport à la valeur cible.
- **Contrôle intégral (I)** : Corrige les erreurs cumulées sur le temps pour éliminer les écarts persistants.
- **Contrôle dérivé (D)** : Anticipe les variations rapides des paramètres pour stabiliser le système [4] ^{*}.

Ces algorithmes permettent une réponse rapide et précise aux perturbations, comme les fluctuations de la demande de gaz ou les variations de la composition de l'air entrant. De plus, des technologies émergentes, telles que l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, sont de plus en plus intégrées pour optimiser les paramètres de contrôle en temps réel et prédire les défaillances potentielles [2] ^{*}.

2.2.3. Diagramme et paramètres de contrôle

La **Figure 2.4** illustre un diagramme de contrôle des opérations, montrant les capteurs de pression et de température installés dans une colonne de distillation cryogénique, ainsi que les boucles de contrôle PID connectées aux vannes et aux compresseurs. Ce diagramme met en évidence l'intégration des capteurs et des actionneurs pour maintenir les conditions optimales du procédé. Le **Tableau 2.3** résume les paramètres de contrôle typiques.

Diagramme de contrôle des opérations de distillation cryogénique

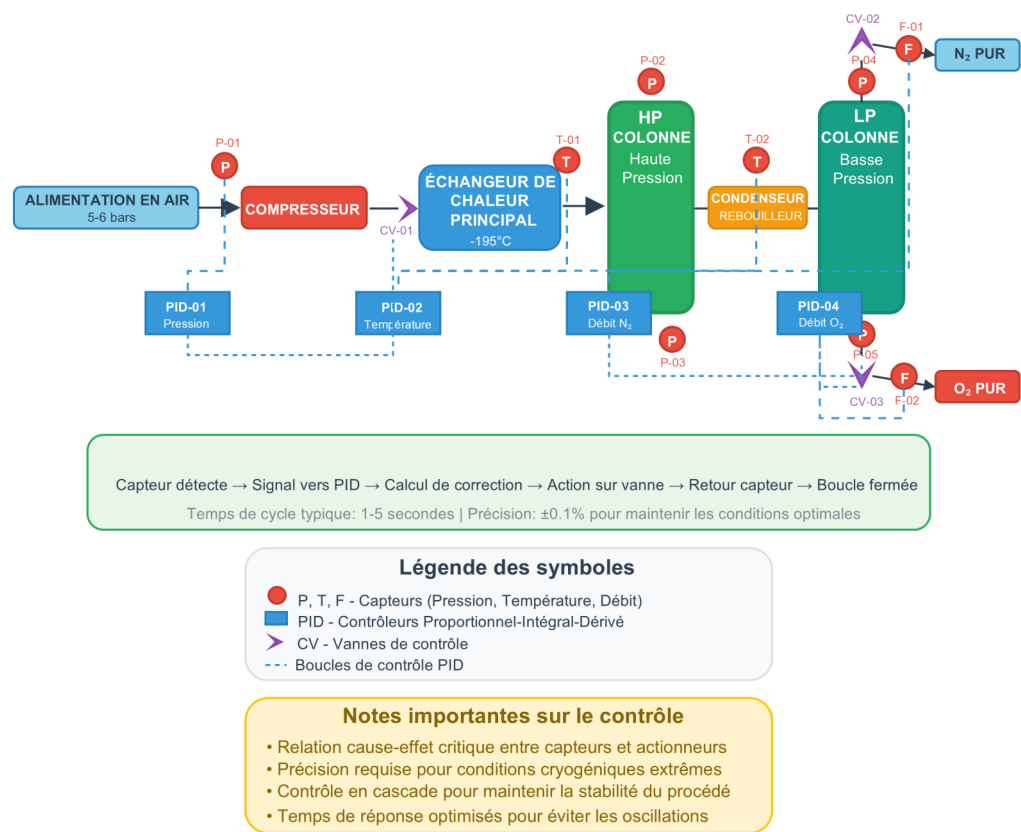


Figure 2.4: Diagramme de contrôle des opérations de distillation cryogénique

Paramètre	Plage typique	Impact sur le procédé
Pression	5-6 bars	Influence la liquéfaction et la séparation
Température	-195 à -183 °C	Détermine la séparation des gaz
Débit d'air entrant	1000-5000 Nm³/h	Affecte la capacité productive

Tableau 2.3 : Paramètres de contrôle dans une unité cryogénique

2.2.4. Défis du contrôle des opérations

- **Stabilité du procédé** : Les variations des conditions ambiantes (température, humidité) ou de la demande de gaz peuvent perturber les paramètres de contrôle, nécessitant des ajustements dynamiques [3]*.
- **Fiabilité des capteurs** : Les capteurs doivent fonctionner de manière fiable dans des conditions cryogéniques extrêmes, où les basses températures peuvent affecter leur précision [2]*.
- **Consommation énergétique** : Un contrôle précis est essentiel pour minimiser la consommation d'énergie, qui représente une part importante des coûts opérationnels [4]*.
- **Sécurité** : Les systèmes de contrôle doivent inclure des mécanismes de protection pour détecter les anomalies (fuites, surpressions) et déclencher des arrêts d'urgence si nécessaire [1]*.

Remarque : Perspectives d'amélioration

Les progrès technologiques visent à améliorer la récupération des produits tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental :

- **Matériaux avancés** : L'utilisation de nouveaux alliages pour les échangeurs de chaleur et les réservoirs cryogéniques améliore l'efficacité thermique et réduit les pertes [4]^{*}.
- **Optimisation des colonnes** : Les conceptions modernes des colonnes de distillation, avec des plateaux plus efficaces et des taux de reflux optimisés par simulation numérique, augmentent la récupération des produits [2]^{*}.
- **Intégration de l'intelligence artificielle** : Les algorithmes d'IA permettent d'optimiser en temps réel les paramètres de distillation (pression, température, reflux) pour maximiser la récupération tout en maintenant la pureté [5]^{*}.
- **Technologies hybrides** : La combinaison de procédés cryogéniques et non cryogéniques peut offrir une flexibilité accrue, permettant une récupération rapide pour des applications à petite échelle tout en conservant une haute pureté pour les grandes productions [3]^{*}.

2.3. Récupération du produit

La récupération des produits (oxygène, azote, argon, et dans certains cas, gaz rares comme le krypton ou le xénon) est une étape cruciale dans les procédés de séparation de l'air, qu'ils soient cryogéniques ou non cryogéniques. L'objectif principal est de maximiser le rendement^{*} du procédé tout en répondant aux exigences de pureté et en minimisant les pertes de produits [1]^{*}. Dans la séparation cryogénique, les gaz sont collectés sous forme gazeuse pour l'approvisionnement par pipelines ou sous forme liquide pour le stockage et le transport dans des réservoirs cryogéniques [2]^{*}. Dans les procédés non cryogéniques, comme l'adsorption par variation de pression (PSA) ou la séparation par membrane, la récupération est souvent plus rapide mais la pureté des gaz est généralement moindre [3]^{*}. Cette section explore les facteurs influençant la récupération des produits, les mécanismes utilisés, et les différences entre les approches cryogéniques et non cryogéniques (voir **Tableau 2.4**).

Critère	Séparation cryogénique	Séparation non cryogénique (PSA, membranes)
Pureté du produit	Très élevée : jusqu'à 99,999 % pour N ₂ ou O ₂	Moyenne à élevée : 90–99,9 % selon la technologie
Vitesse de récupération	Plus lente, liée aux cycles de refroidissement et de distillation	Rapide, démarrage quasi immédiat
Consommation d'énergie	Élevée, surtout pour la liquéfaction	Modérée à faible
Coût d'investissement	Très élevé (infrastructure complexe)	Faible à modéré
Produits récupérables	O ₂ , N ₂ , Ar, gaz rares (Kr, Xe) avec pureté élevée	Principalement O ₂ ou N ₂ , parfois mélanges, rarement gaz rares
Applications typiques	Industries à forte exigence de pureté (électronique, spatial, médical)	Applications où la pureté élevée n'est pas critique (traitement de l'eau, métallurgie légère)

Tableau 2.4 : Comparaison entre la récupération cryogénique et non cryogénique des produits

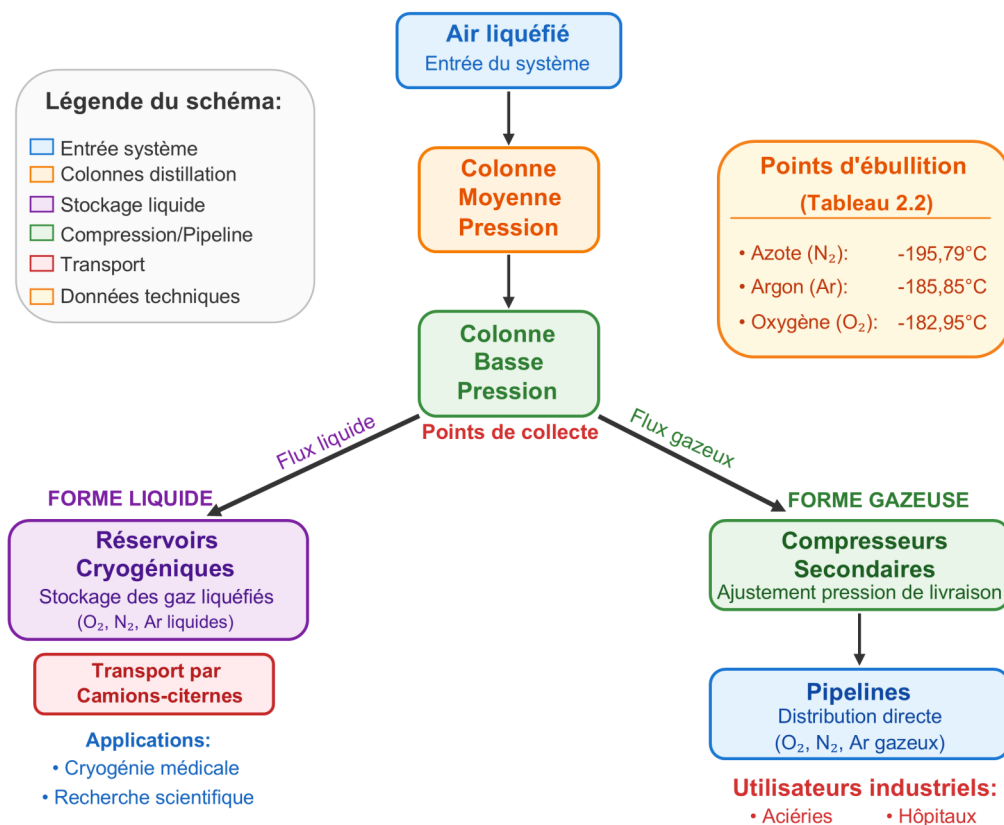
2.3.1. Mécanismes de récupération dans la séparation cryogénique

Dans la séparation cryogénique, la récupération des produits se fait après la distillation de l'air liquéfié dans des colonnes à moyenne et basse pression. Les gaz sont séparés en fonction de leurs points d'ébullition, comme indiqué dans le **Tableau 2.2** (azote : -195,79 °C ; oxygène : -182,95 °C ; argon : -185,85 °C) [2]. Une fois séparés, les produits sont collectés selon leur forme souhaitée :

- **Forme gazeuse** : Les gaz (oxygène, azote, argon) sont acheminés vers des pipelines pour une distribution directe vers les utilisateurs industriels, comme les aciéries ou les hôpitaux [1]. Des compresseurs secondaires peuvent être utilisés pour ajuster la pression de livraison en fonction des besoins des clients.
- **Forme liquide** : Les gaz liquéfiés sont stockés dans des réservoirs cryogéniques pour le transport par camions-citernes ou pour une utilisation ultérieure dans des applications nécessitant des gaz liquides, comme la cryogénie médicale ou la recherche scientifique [3].

La **Figure 2.5** illustre un schéma de récupération des produits, montrant les flux de gaz sortant des colonnes de distillation vers les pipelines ou les réservoirs cryogéniques. Ce schéma met en évidence les points de collecte, les systèmes de compression secondaires, et les unités de stockage cryogénique.

Schéma de récupération des produits - Séparation cryogénique



Le schéma met en évidence: points de collecte, systèmes de compression secondaires, unités de stockage cryogénique

Figure 2.5 : Schéma de récupération des produits - Séparation cryogénique

2.3.2. Facteurs influençant la récupération des produits

Plusieurs facteurs déterminent l'efficacité de la récupération des produits dans les procédés de séparation de l'air :

1. Efficacité des colonnes de distillation :

- L'efficacité des colonnes dépend du nombre de plateaux (ou étages) et du taux de reflux [2]^{*}. Un plus grand nombre de plateaux améliore la séparation en augmentant les interactions entre les phases liquide et gazeuse, ce qui permet une meilleure récupération des produits à haute pureté [4]^{*}. Cependant, cela augmente également la complexité et le coût des colonnes.
- Le reflux^{*}, c'est-à-dire le retour d'une partie du liquide condensé dans la colonne, est essentiel pour maintenir une séparation efficace. Un taux de reflux optimal maximise la récupération tout en minimisant la consommation d'énergie [1]^{*}.
- Par exemple, pour récupérer l'argon, dont le point d'ébullition est proche de celui de l'oxygène, une colonne supplémentaire avec un grand nombre de plateaux est souvent nécessaire, ce qui peut réduire le rendement global en raison des pertes énergétiques [3]^{*}.

2. Pureté requise :

- Une pureté élevée (>99,9 %) est souvent exigée pour des applications critiques, comme l'oxygène médical ou les gaz pour l'industrie des semi-conducteurs [4]^{*}. Cependant, atteindre une telle pureté nécessite des cycles de distillation plus intensifs, ce qui réduit le rendement global en augmentant les pertes de produits sous forme de gaz résiduels ou de sous-produits [2]^{*}.
- Par exemple, pour obtenir un oxygène de pureté médicale, des étapes supplémentaires de purification peuvent être nécessaires, ce qui diminue la quantité d'oxygène récupéré par unité d'air traité [1]^{*}.

3. Conception des équipements :

- Les échangeurs de chaleur et les détendeurs jouent un rôle clé dans la minimisation des pertes thermiques, qui affectent directement la récupération des produits [3]^{*}. Des échangeurs de chaleur à haute efficacité, fabriqués avec des matériaux à forte conductivité thermique, permettent de maintenir les températures cryogéniques nécessaires tout en réduisant les pertes d'énergie [4]^{*}.
- Les détendeurs, qu'ils soient à vanne ou à turbine, sont utilisés pour abaisser la température de l'air par détente adiabatique, ce qui facilite la liquéfaction et améliore l'efficacité de la séparation [2]^{*}. Une conception optimisée des détendeurs réduit les pertes de pression et améliore la récupération des produits liquides.
- De plus, les systèmes de stockage cryogénique doivent être conçus pour minimiser les pertes par évaporation, en utilisant des réservoirs isolés sous vide pour maintenir les gaz liquides à des températures stables [1]^{*}.

2.3.3. Comparaison avec les procédés non cryogéniques

Dans les procédés non cryogéniques, tels que l'adsorption par variation de pression (PSA) ou la séparation par membrane, la récupération des produits est généralement plus rapide, mais la pureté des gaz est moindre [3]^{*}. Par exemple :

- **Adsorption par variation de pression (PSA) :** Ce procédé utilise des adsorbants (comme des tamis moléculaires) pour capturer sélectivement l'azote ou l'oxygène, produisant des gaz avec une pureté de 93 % à 95 % pour l'oxygène [4] *. La récupération est rapide, car le cycle d'adsorption-désorption est plus court que la distillation cryogénique, mais la pureté limitée rend ce procédé inadapté pour des applications exigeant une ultra-haute pureté.
- **Séparation par membrane :** Les membranes sélectives permettent une séparation rapide des gaz basée sur leur perméabilité, mais la pureté est encore plus faible (souvent <90 %) [2] *. Ce procédé est idéal pour les applications locales à petite échelle, comme les générateurs d'oxygène pour les hôpitaux, mais il ne peut pas rivaliser avec la cryogénie pour les grandes productions [1] *.

En comparaison, la distillation cryogénique offre une pureté plus élevée (>99,9 %) et une capacité de production adaptée aux grandes échelles, mais elle est plus coûteuse et énergivore [3]*. Le choix entre cryogénie et procédés non cryogéniques dépend donc des besoins spécifiques en pureté, volume et coût.

2.3.4. Défis liés à la récupération des produits

- **Pertes thermiques** : Les pertes thermiques dans les échangeurs de chaleur ou les réservoirs cryogéniques peuvent réduire la quantité de produits liquides récupérés [4]^{*}. Une isolation thermique efficace et des matériaux avancés sont nécessaires pour minimiser ces pertes.
- **Compromis pureté/rendement** : Une pureté élevée réduit souvent le rendement, car des étapes supplémentaires de purification entraînent des pertes de produit [2]^{*}. Les opérateurs doivent trouver un équilibre entre pureté et récupération en fonction des exigences des clients.
- **Complexité des équipements** : La récupération de l'argon, par exemple, nécessite des colonnes de distillation supplémentaires en raison de la proximité de son point d'ébullition avec celui de l'oxygène, ce qui augmente les coûts et la complexité [3]^{*}.
- **Consommation énergétique** : Les systèmes de compression et de liquéfaction consomment une énergie significative, et une récupération optimale nécessite une conception énergétique efficace [1]^{*}.

2.4. Reflux optimal

Le reflux optimal est un paramètre fondamental pour maximiser l'efficacité de la distillation cryogénique, un procédé clé dans la séparation des gaz de l'air comme l'azote, l'oxygène et l'argon [1]^{*}. Le reflux correspond au retour d'une partie du liquide condensé, extrait du haut de la colonne de distillation, vers la colonne afin d'enrichir la séparation des composants en fonction de leurs points d'ébullition, comme indiqué dans le **Tableau 2.2** [2]^{*}. Ce processus améliore la pureté des gaz en augmentant les interactions entre les phases liquide et gazeuse au sein de la colonne. Cependant, le taux de reflux, défini comme le rapport entre le débit de liquide renvoyé dans la colonne et le débit de produit collecté, influence directement la pureté des gaz, le débit de production et la consommation énergétique [3]^{*}. La **Figure 2.5** illustre l'impact du taux de reflux sur ces paramètres, offrant une visualisation claire de l'équilibre entre pureté et rendement.

2.4.1. Impact du reflux sur la pureté et le rendement

Un taux de reflux élevé améliore la pureté des gaz produits, car il intensifie la séparation en augmentant les contacts répétés entre les vapeurs ascendantes et le liquide descendant dans la colonne [2]^{*}. Par exemple, pour obtenir un oxygène ou un azote de pureté supérieure à 99,9 %, requis pour des applications médicales ou électroniques, un reflux plus important est nécessaire [4]^{*}. Cependant, un reflux élevé réduit le débit de produit, car une plus grande proportion de liquide est recyclée plutôt que collectée comme produit final, ce qui diminue le rendement global, particulièrement dans les unités à grande échelle où la productivité est essentielle [3]^{*}. Le **Tableau 2.2**, qui présente les points d'ébullition des gaz (azote : -195,79 °C ; oxygène : -182,95 °C ; argon : -185,85 °C), montre pourquoi un reflux précis est crucial pour séparer des gaz aux points d'ébullition proches, comme l'oxygène et l'argon.

La **Figure 2.6** présente une courbe de performance basée sur des modèles comme l'équation de McCabe-Thiele, illustrant comment un taux de reflux croissant améliore la pureté jusqu'à un point où les gains deviennent marginaux, tandis que le rendement diminue [2]^{*}. Cette courbe aide à visualiser le compromis entre pureté et débit, un facteur clé dans la conception des colonnes de distillation.

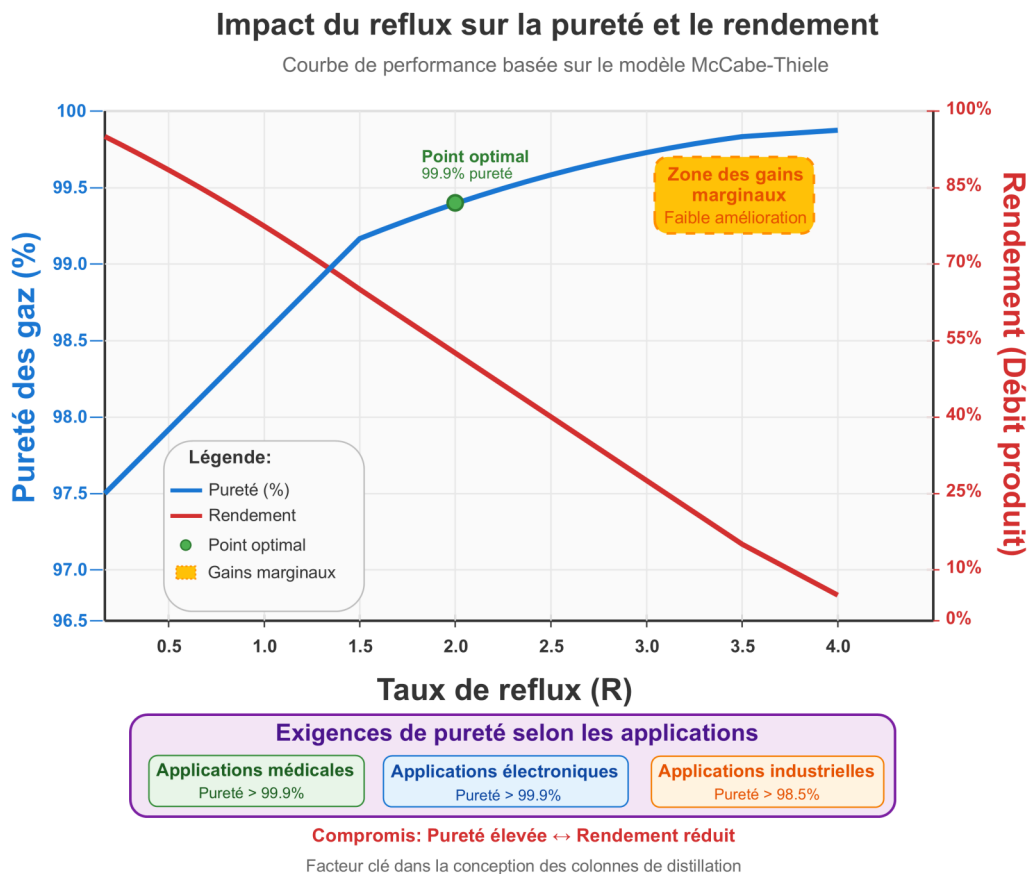


Figure 2.6 : Impact du reflux sur la pureté des gaz et le rendement

2.4.2. Consommation énergétique et optimisation

Un reflux excessif entraîne une augmentation significative de la consommation énergétique [1]^{*}. Le liquide condensé nécessite un refroidissement supplémentaire pour maintenir les températures cryogéniques (environ -195 °C à -183 °C), ce qui accroît la charge sur les échangeurs de chaleur et les systèmes de réfrigération,

comme décrit dans les étapes de refroidissement et de liquéfaction [3]^{*}. De plus, un reflux trop important peut surcharger la colonne, augmentant les pertes de pression et réduisant l'efficacité énergétique globale [4]^{*}. L'équation de McCabe-Thiele, largement utilisée dans la conception des colonnes, permet de déterminer le nombre d'étages théoriques nécessaires et le taux de reflux optimal pour atteindre les spécifications de pureté tout en minimisant les coûts énergétiques [5]^{*}.

Dans la pratique, les systèmes de contrôle automatisés, équipés d'algorithmes PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé), surveillent et ajustent le taux de reflux en temps réel en fonction des données des capteurs de débit, de pression et de composition des flux [4]^{*}. Ces systèmes permettent d'optimiser le reflux pour maintenir un équilibre entre pureté et rendement. Les avancées récentes, comme l'intégration de l'intelligence artificielle, offrent une optimisation dynamique du reflux, réduisant la consommation énergétique tout en répondant aux exigences de pureté [5]. Par exemple, pour la séparation de l'argon, un taux de reflux précisément ajusté est essentiel en raison de la proximité de son point d'ébullition avec celui de l'oxygène, comme indiqué dans le **Tableau 2.2** [3]^{*}.

En résumé, le reflux optimal est un compromis entre la pureté des produits, le rendement du procédé et l'efficacité énergétique. Une analyse rigoureuse, basée sur des modèles comme McCabe-Thiele et des outils de contrôle avancés, est nécessaire pour déterminer le taux de reflux idéal pour chaque application spécifique de la distillation cryogénique [1]^{*}. La **Figure 2.6** et le **Tableau 2.2** fournissent des outils visuels et quantitatifs pour comprendre et optimiser ce processus.

2.5. Équipement de distillation

Les équipements de distillation constituent le cœur des unités de séparation de l'air par distillation cryogénique, permettant la production de gaz industriels tels que l'azote, l'oxygène et l'argon à haute pureté [1]^{*}. Ces équipements sont conçus pour fonctionner dans des conditions extrêmes, notamment à des températures cryogéniques (environ -195 °C à -183 °C) et à des pressions élevées (5-6 bars), tout en assurant une efficacité énergétique et une sécurité optimale [2]^{*}. Chaque composant joue un rôle spécifique dans le processus, de la compression initiale de l'air à la séparation finale des gaz. Le **Tableau 2.2**, qui présente les points d'ébullition des principaux composants de l'air (azote : -195,79 °C ; oxygène : -182,95 °C ; argon : -185,85 °C), illustre les conditions thermodynamiques nécessaires à la séparation [3]^{*}. La **Figure 2.7** montre une colonne de distillation avec ses plateaux, les flux de reflux et les sorties de produits, offrant une vue d'ensemble de l'intégration des équipements dans le procédé.

Colonne de distillation avec plateaux, flux de reflux et sorties de produits

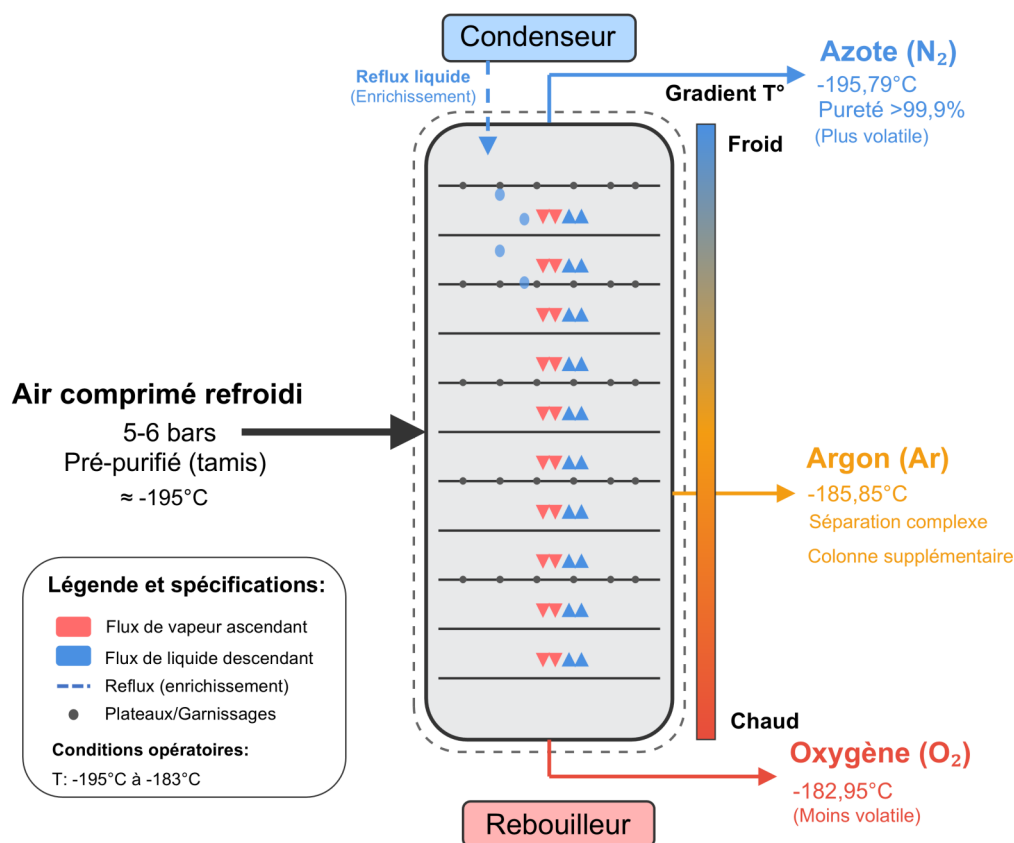


Figure 2.7 : Colonne de distillation avec ses plateaux, les flux de reflux et les sorties de produits

2.5.1. Composants clés de l'équipement de distillation

Les principaux équipements utilisés dans la distillation cryogénique de l'air sont décrits ci-dessous, chacun contribuant à une étape spécifique du processus de séparation [2]*.

1. Compresseurs :

- Les compresseurs compriment l'air ambiant à une pression typique de 5 à 6 bars, augmentant sa densité pour faciliter le refroidissement et la liquéfaction [1]*. Cette étape est énergivore, représentant une part significative (jusqu'à 50-70 %) de la consommation totale d'énergie du procédé [4]*. Les compresseurs doivent être robustes et équipés de systèmes de contrôle pour maintenir une pression stable tout en minimisant les pertes énergétiques [2]*.
- Des compresseurs centrifuges ou à piston sont souvent utilisés, selon la capacité de production et les besoins spécifiques de l'unité [3]*.

2. Échangeurs de chaleur :

- Les échangeurs de chaleur refroidissent l'air comprimé jusqu'à des températures cryogéniques proches du point de liquéfaction (-195 °C) en utilisant des cycles de réfrigération, tels que le cycle de Linde ou de Claude [1]*. Ces équipements sont conçus avec des matériaux à haute conductivité thermique, comme l'aluminium ou l'acier inoxydable, pour maximiser le transfert de chaleur tout en réduisant les pertes thermiques [4]*.

- Ils jouent également un rôle dans la récupération de chaleur, en préchauffant les flux entrants avec les flux sortants, ce qui améliore l'efficacité énergétique [2] .^{*}

3. Colonnes de distillation :

- Les colonnes de distillation, opérant à moyenne et basse pression, séparent les gaz en fonction de leurs points d'ébullition, comme indiqué dans le **Tableau 2.2** [3]. Elles contiennent des plateaux ou des garnissages qui facilitent les interactions entre les phases liquide et gazeuse, permettant la séparation de l'azote (plus volatile) de l'oxygène et de l'argon (moins volatils) [2] *.
- La **Figure 2.7** illustre une colonne de distillation typique, montrant les plateaux, les flux de reflux (liquide renvoyé pour enrichir la séparation) et les sorties de produits (gaz ou liquides). Une conception optimisée, avec un nombre suffisant de plateaux et un taux de reflux approprié, est essentielle pour atteindre une pureté élevée (>99,9 %) tout en maximisant le rendement [4] *.

4. Détendeurs :

- Les détenteurs, qu'ils soient à vanne ou à turbine, réduisent la pression de l'air comprimé, provoquant une détente adiabatique qui abaisse la température jusqu'au point de liquéfaction [1]*. Par exemple, une détente à partir de 5-6 bars peut amener l'air à une température proche de -195 °C, facilitant la séparation dans les colonnes [3]*.
- Les turbines de détente sont particulièrement efficaces, car elles récupèrent une partie de l'énergie de la détente pour réduire la consommation énergétique globale [2]*.

5. Tamis moléculaires :

- Les tamis moléculaires, généralement constitués de zéolites* ou d'alumine activée, éliminent les impuretés telles que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂) et les hydrocarbures avant la liquéfaction [4]*. Ces impuretés peuvent geler à basse température, obstruant les équipements ou compromettant la pureté des gaz [3]*.
- Les unités de pré-purification, intégrant des tamis moléculaires, sont essentielles pour garantir des niveaux d'impuretés inférieurs à 1 ppm (partie par million), particulièrement pour des applications exigeant une ultra-haute pureté [2]*.

2.5.2. Conception pour des conditions extrêmes

Les équipements de distillation cryogénique sont conçus pour résister aux basses températures et aux pressions élevées, tout en maintenant une efficacité et une sécurité optimales [1]^{*}. Les matériaux utilisés, comme l'acier inoxydable ou les alliages spéciaux, sont choisis pour leur résistance à la corrosion et leur capacité à supporter des températures cryogéniques sans devenir fragiles [4]^{*}. De plus, les systèmes de contrôle automatisés, équipés de capteurs de pression, de température et de débit, surveillent les équipements en temps réel pour détecter les anomalies (fuites, surpressions) et assurer un fonctionnement stable [5]^{*}. Le **Figure 2.7** met en évidence l'intégration de ces équipements, montrant comment les flux de reflux et les sorties de produits sont gérés dans une colonne de distillation.

2.5.3. Défis et optimisation des équipements

- **Efficacité énergétique :** Les compresseurs et les échangeurs de chaleur consomment une grande quantité d'énergie, nécessitant des conceptions optimisées, comme des compresseurs à vitesse variable ou des échangeurs à haute efficacité thermique [2] *.

- **Maintenance** : Les équipements cryogéniques, soumis à des conditions extrêmes, nécessitent un entretien régulier pour éviter les pannes, notamment des compresseurs et des détendeurs [4]^{*}.
- **Sécurité** : Les pressions élevées et les températures basses exigent des protocoles de sécurité stricts, incluant des systèmes de détection de fuites et des arrêts d'urgence automatisés [1]^{*}.
- **Complexité de la séparation de l'argon** : La proximité des points d'ébullition de l'oxygène et de l'argon (voir **Tableau 2.2**) nécessite des colonnes supplémentaires et un contrôle précis du reflux, augmentant la complexité des équipements [3]^{*}.

Remarque : Perspectives d'amélioration

Les avancées technologiques visent à améliorer la performance des équipements de distillation. L'utilisation de matériaux avancés, comme les alliages à haute conductivité thermique, améliore l'efficacité des échangeurs de chaleur [4]^{*}. Les systèmes de contrôle basés sur l'intelligence artificielle permettent une optimisation en temps réel des paramètres de fonctionnement (pression, température, reflux), réduisant la consommation énergétique [5]^{*}. De plus, l'intégration de technologies hybrides, combinant la distillation cryogénique avec des procédés non cryogéniques comme l'adsorption, offre une flexibilité accrue pour répondre aux besoins variés des industries [2]^{*}.

3. Séparation de l'air par adsorption

Le procédé d'adsorption est un processus **non cryogénique**, ce processus basé sur la capacité de certains matériaux naturels et synthétiques à adsorber préférentiellement soit l'azote soit l'oxygène. En général, cette technologie est principalement utilisée pour produire soit de l'azote, soit de l'oxygène. De manière simple, une compression de l'air a lieu puis il traverse une cuve qui contient des matériaux adsorbants dans lesquels ils adsorbent le composant souhaité.

Dans ce procédé, le choix de l'adsorbant approprié repose directement sur ses caractéristiques d'adsorption et les produits finaux souhaités, dans lesquels ses caractéristiques doivent garantir que seuls quelques composants (souhaités) de l'air sont capturés par l'adsorbant.

Habituellement, les usines de production d'oxygène qui utilisent la technologie d'adsorption utilisent des tamis moléculaires de zéolite comme moyen d'adsorber l'azote, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau résiduelle en plus d'autres gaz, par conséquent, ce processus garantit l'obtention d'oxygène avec une pureté dans la gamme de 93 % à 95 %, ce pourcentage varie en fonction de la teneur en argon, qui est généralement de l'ordre de 4,5 % à 5 %.

En revanche, les usines de production d'azote qui utilisent la technologie d'adsorption utilisent un matériau de tamis moléculaire à charbon actif qui agit sur l'élimination de l'oxygène et d'autres composants indésirables par adsorption.

Certaines usines utilisent une unité "**de-oxo**", cette unité combine catalytiquement l'hydrogène avec l'oxygène comme moyen de produire de l'eau dans le "produit" d'azote après le processus d'adsorption. Après cela, l'eau est éliminée par refroidissement et adsorption supplémentaire.

Habituellement, l'azote produit a une pureté qui varie entre 95 % et 99,5 %, cette pureté dépend de la taille de l'équipement et du rapport entre l'alimentation en air et le produit.

Pour le principe de fonctionnement de ce procédé, de manière simple, l'air sous pression circule dans une cuve qui contient le lit d'adsorbant. A travers la cuve, l'azote/oxygène est adsorbé et un flux d'effluent riche en oxygène/azote est produit jusqu'à ce que le lit d'adsorbant soit saturé en azote/oxygène.

À ce stade, l'alimentation en air est commutée vers le récipient frais suivant et le procédé de régénération du lit d'adsorbant dans le premier récipient démarre. Le procédé de régénération peut être accompli en chauffant le lit d'adsorbant ou en réduisant la pression dans le lit d'adsorbant, ce qui réduit la capacité de rétention d'azote/oxygène à l'équilibre de l'adsorbant, le premier processus étant communément appelé adsorption modulée en température « **Temperature swing adsorption** » (TSA), tandis que le second celle basée sur la réduction de pression est communément connue sous le nom : d'adsorption modulée en pression ou sous vide « **Pressure or vacuum swing adsorption** » (PSA* ou VSA). La figure suivante montre un diagramme schématique d'un processus d'adsorption typique [2]*.

La **Figure 2.8** illustre un schéma simplifié d'un procédé d'adsorption typique, incluant les récipients d'adsorption, les flux d'air comprimé, le gaz produit et les gaz résiduaux.

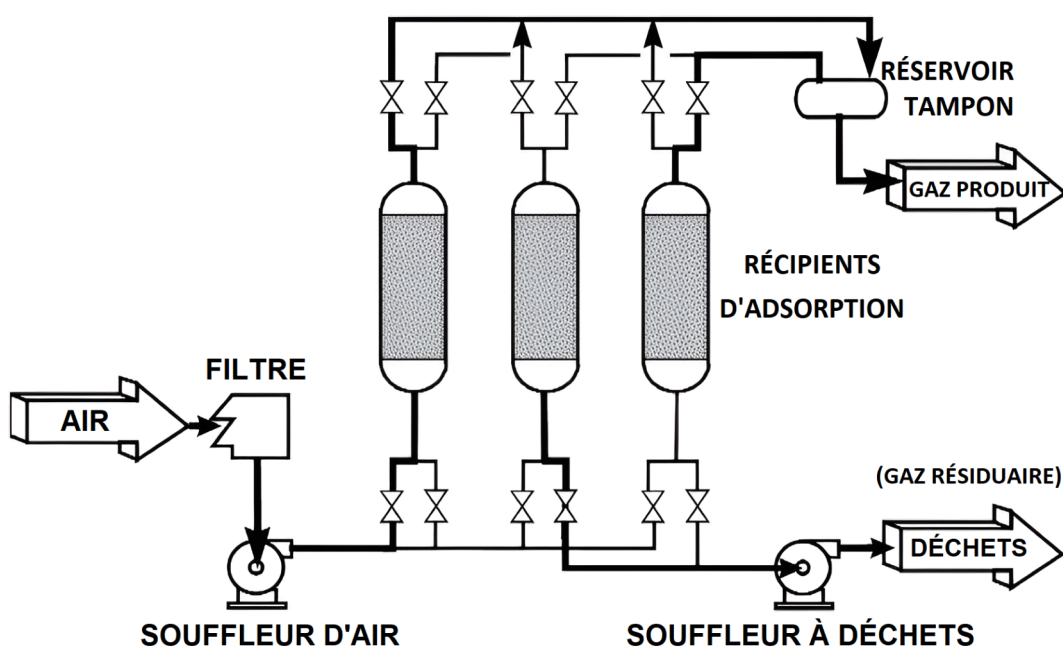


Figure 2.8: Procédé de séparation de l'air basé sur la technologie d'adsorption

4. Séparation de l'air par membrane

La technologie à membrane se base sur l'application des membranes séparant des gaz. Les membranes modernes de séparation des gaz sont constituées non pas de plaques plates ou d'un film, mais de fibres creuses (voir **Figure 2.9**)

Pour appliquer les technologies à membrane de séparation des gaz on utilise des membranes modernes à fibres creuses se composant de fibres polymères poreuses dont la surface extérieure est recouverte d'une couche séparant des gaz. Les fibres poreuses ont une structure asymétrique compliquée. La densité du polymère augmente à la direction vers la surface extérieure de la fibre. L'application des supports poreux ayant une structure asymétrique permet de séparer des gaz à une haute pression (jusqu'à 6,5 MPa).

L'épaisseur de la couche de séparation des gaz de la fibre ne dépasse pas $0,1\ \mu\text{m}$, ce qui assure une forte perméabilité spécifique des gaz à travers la membrane polymère. Le niveau actuel de développement de la technologie permet de fabriquer des polymères ayant une haute sélectivité de séparation des gaz divers ce qui permet d'obtenir une haute pureté des produits gazeux. Un module à membrane moderne utilisé pour la séparation des gaz à membrane se compose d'une cartouche à membrane amovible et d'un boîtier. Les dimensions des systèmes de séparation des gaz sont minimisées grâce à densité de mise des fibres dans la cartouche ($3000\text{--}3500\ \text{m}^2$ de fibres par une mètre cubique d'une cartouche) [3]^{*}.

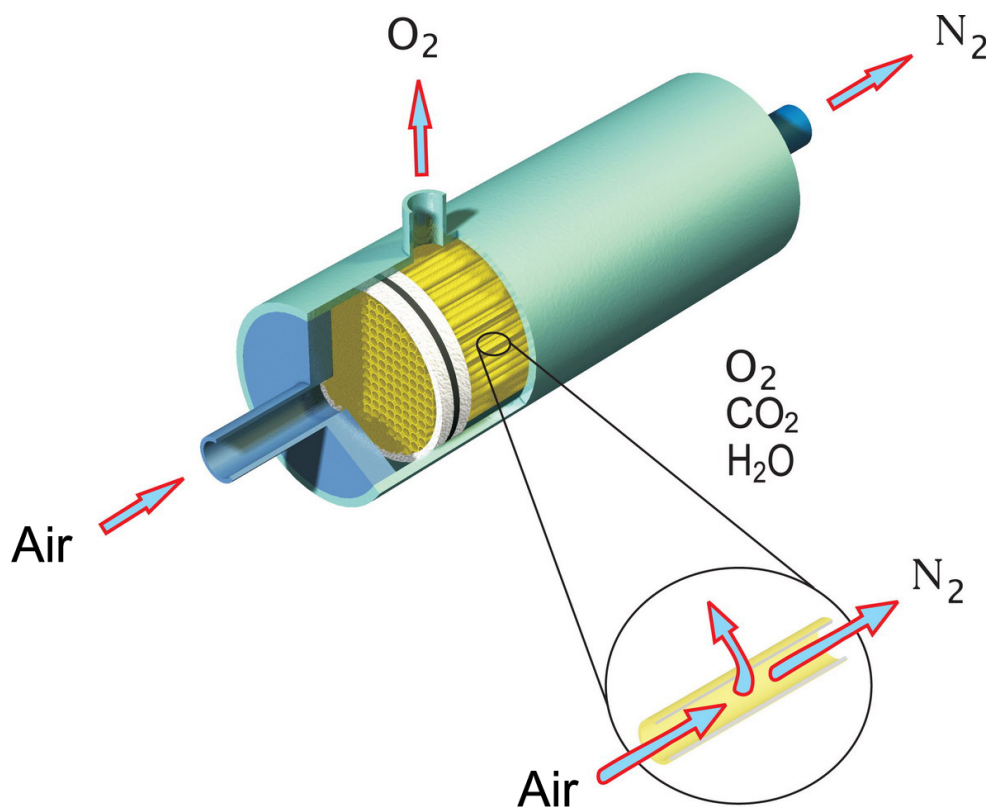


Figure 2.9: Schéma de la cartouche à membrane pour séparation d'air

Pour le principe de fonctionnement de ce procédé, l'air est d'abord filtré, puis comprimé à la pression requise, séché puis s'écoule à travers un module à membrane, dans lequel pénètrent les composants de l'air à plus haut taux de diffusion (tels que O_2 et CO_2). Les fibres de la membrane polymère plus rapidement, d'où un flux riche en azote. Habituellement, la pureté du gaz N_2 varie entre 93 % et 99,5 %, cette valeur dépend du débit à travers le module membranaire.

Ce procédé est couramment utilisé pour la production d'azote, mais dans le cas où le produit souhaité est l'oxygène, les systèmes à membrane sont normalement limités à la production d'air enrichi en oxygène (généralement entre 25 % et 50 % d'oxygène), dans lequel l'utilisation des membranes incorporent un agent complexant l'oxygène pour augmenter la sélectivité de l'oxygène, comme moyen d'augmenter la pureté de l'oxygène.

La **Figure 2.10** suivante montre un diagramme schématique du procédé membranaire pour la séparation de l'air.

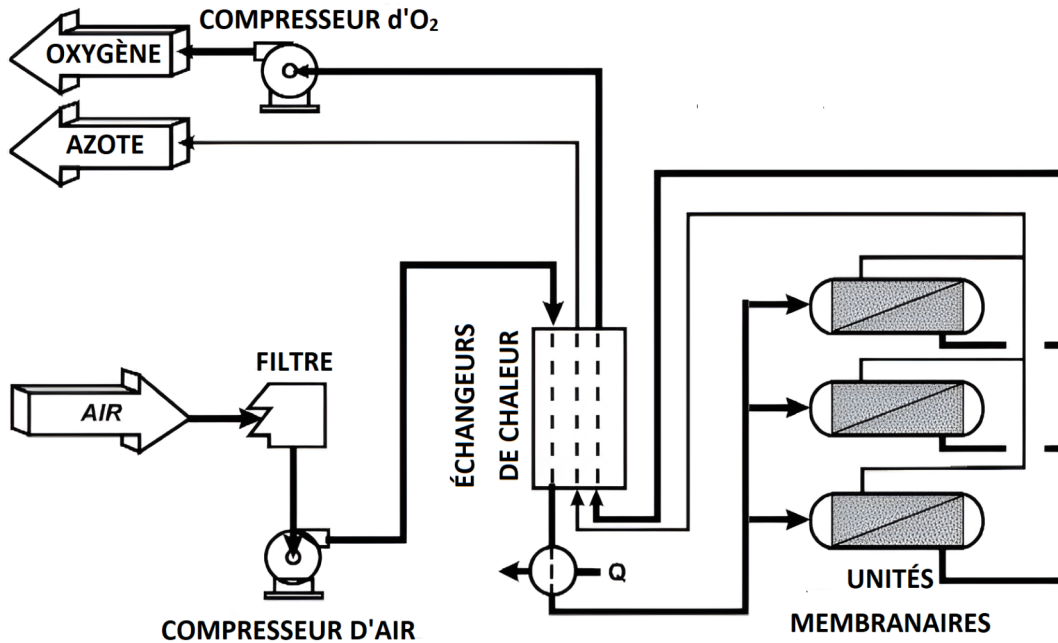


Figure 2.10: Procédé membranaire pour la séparation de l'air

Cependant, ces procédés présentés sont les plus connus et utilisés dans la séparation des composants de l'air, mais il existe encore de nombreuses autres technologies qui s'appliquent dans le même but, et présentent une bonne efficacité, parmi elles ; La technologie des **membranes de transport d'ions (ITM^{**})**, les technologies de procédés chimiques.

Ces technologies sont également des alternatives à celles largement utilisées, et peuvent être utiles dans certaines conditions et selon les produits recherchés.

Pour plus d'informations sur ce processus, vous pouvez consulter la vidéo suivante dans laquelle il décrit ce processus de production d'azote :

5. Activité d'auto-évaluation

Exercice : Exercice 1

Quel est le gaz majoritaire dans la composition de l'air ?

- ☐ a) Oxygène (O₂)
- ☐ b) Argon (Ar)
- ☐ c) Azote (N₂)
- ☐ d) Dioxyde de carbone (CO₂)

Exercice : Exercice 2

Quelle technologie de séparation est privilégiée pour produire de grands volumes de gaz de très haute pureté (>99.9%) ?

- ☐ a) Adsorption par variation de pression (PSA)

- ☐ b) Distillation cryogénique
- ☐ c) Séparation par membrane
- ☐ d) Adsorption modulée en température (TSA)

Exercice : Exercice 3

Quelle est la principale propriété physique exploitée pour séparer les gaz de l'air par distillation cryogénique ?

- ☐ a) Leur masse molaire
- ☐ b) Leur point d'ébullition
- ☐ c) Leur viscosité
- ☐ d) Leur couleur

Exercice : Exercice 4

Quelle étape du procédé cryogénique est cruciale pour éliminer le CO₂ et la vapeur d'eau qui pourraient obstruer les équipements ?

- ☐ a) La compression
- ☐ b) La pré-purification
- ☐ c) La liquéfaction
- ☐ d) La détente

Exercice : Exercice 5

5. Quel équipement est utilisé pour abaisser la température de l'air par détente adiabatique, souvent en récupérant de l'énergie ?

- ☐ a) Le compresseur
- ☐ b) L'échangeur de chaleur
- ☐ c) La turbine de détente
- ☐ d) Le tamis moléculaire

Exercice : Exercice 6

Dans une colonne de distillation cryogénique, où se concentre préférentiellement l'azote, le plus volatil ?

- ☐ a) Au milieu de la colonne
- ☐ b) En haut de la colonne

- ☐ c) En bas de la colonne
- ☐ d) Dans la zone de reflux

Exercice : Exercice 7

Quel paramètre de contrôle est essentiel pour maximiser la pureté des produits mais augmente significativement la consommation énergétique ?

- ☐ a) La pression dans la colonne
- ☐ b) Le taux de reflux
- ☐ c) Le débit d'alimentation en air
- ☐ d) La température du condenseur

Exercice : Exercice 8

Quelle technologie non cryogénique utilise des tamis moléculaires pour capturer sélectivement l'azote, produisant de l'oxygène avec une pureté d'environ 93-95% ?

- ☐ a) Adsorption par Variation de Pression (PSA)
- ☐ b) Distillation fractionnée
- ☐ c) Séparation par membrane
- ☐ d) Liquéfaction partielle

Exercice : Exercice 9

Quel est un défi majeur associé à la séparation de l'argon par distillation cryogénique ?

- ☐ a) Son point d'ébullition très éloigné de celui de l'oxygène
- ☐ b) La proximité de son point d'ébullition avec celui de l'oxygène
- ☐ c) Son affinité avec les matériaux des colonnes
- ☐ d) Sa très faible concentration dans l'air

Exercice : Exercice 10

Quel type de système de contrôle est typiquement utilisé pour superviser et réguler l'ensemble d'une unité de séparation d'air cryogénique ?

- ☐ a) Un système de contrôle proportionnel simple (P)
- ☐ b) Un automate programmable (PLC)

- ☐ c) Un Système de Contrôle-Commande Distribué (DCS)
- ☐ d) Un régulateur PID manuel

Exercice : Exercice 11

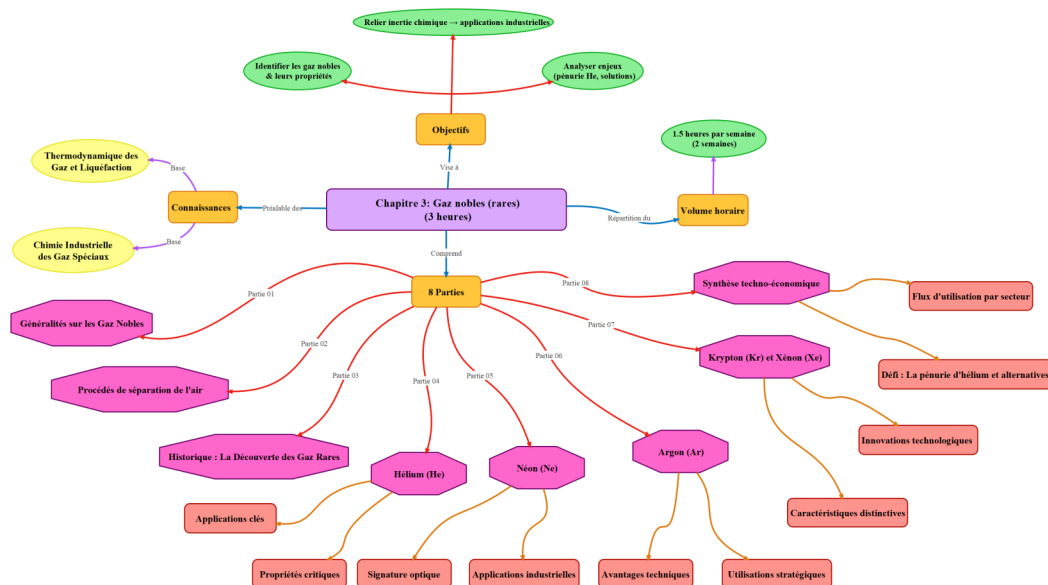
Mentionner les 3 méthodes connues de séparation d'air

Chapitre 3: Gaz nobles (rares)

IV

Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux des **gaz nobles**, en mettant un accent particulier sur leurs **propriétés uniques** qui les rendent chimiquement inertes. Cette caractéristique, qui les différencie de tous les autres éléments du tableau périodique, est la base de leurs applications industrielles et technologiques cruciales. Ces propriétés, telles que leur **faible réactivité**, leur densité et leur **potentiel d'ionisation**, seront étudiées en détail.

Nous aborderons l'histoire de la découverte de ces éléments, de l'argon au xénon, ainsi que leur classification et leur présence dans la nature. Ces études incluent l'identification de leurs principales applications technologiques, la compréhension de leur utilisation dans des domaines tels que la **cryogénie**, le **soudage TIG** et la **propulsion ionique**, l'analyse des tendances du marché et l'évaluation des connaissances acquises dans le contexte des défis économiques et environnementaux.



Carte mentale du chapitre 3

1. Généralités sur les Gaz Nobles

Les **gaz rares** sont situés dans la dernière colonne de droite du **tableau périodique des éléments** (Figure 3.1). Le groupe 18 (ou VIIIA) comprend donc : l'hélium (He), le néon (Ne), l'argon (Ar), le krypton (Kr), le xénon (Xe), le radon (Rn), et l'oganesson (Og) [1^{*}, 2^{*}].

Ces éléments ont la particularité de posséder une **couche de valence^{*} complète d'électrons**, ce qui en fait des éléments **très stables** [1]^{*} (Tableau 3.1). En fait, ils sont si stables que les chimistes pensaient autrefois qu'ils ne pouvaient pas réagir avec d'autres éléments, raison pour laquelle on les appelait les **gaz nobles^{*}** [2]^{*}.

Les gaz rares sont également connus sous le nom de **gaz inertes^{*}**. Le terme "**inerte**" signifie "**inactif**" ou "**non impliqué**". Ce terme a été utilisé pour les éléments du **huitième groupe principal**, car on a longtemps supposé que les gaz rares ne réagissaient avec aucune autre substance. Le terme de gaz rares, plus souvent utilisé, est dû à l'analogie entre la **faible réactivité des métaux précieux** et celle des éléments du huitième groupe principal [1^{*}, 2^{*}].



Figure 3.1: Tableau périodique des éléments avec mise en évidence des gaz nobles

Élément	Masse molaire (g/mol)	Configuration électronique
He	4.0026	1s ²
Ne	20.1797	[He] 2s ² 2p ⁶
Ar	39.948	[Ne] 3s ² 3p ⁶
Kr	83.798	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶
Xe	131.293	[Kr] 4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶
Rn	222	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
Og	*294	[Rn] 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶

Tableau 3.1 : Propriétés atomiques de base

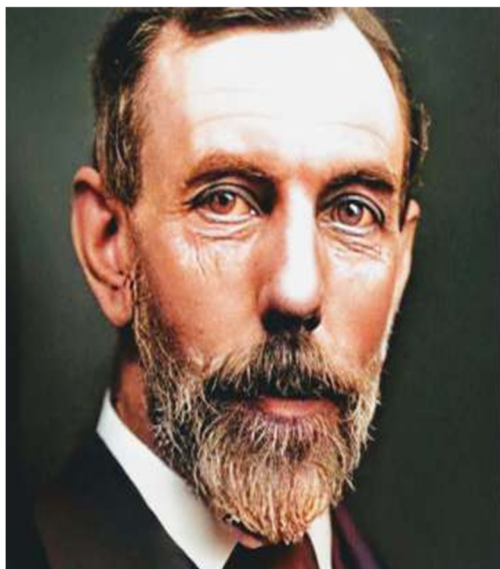
2. Historique : La Découverte des Gaz Rares

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, les scientifiques tenaient pour acquis que l'atmosphère terrestre était exclusivement composée d'azote et d'oxygène [1]*. Ce n'est qu'en 1892 que le physicien anglais John William Strutt, mieux connu sous le titre de Lord Rayleigh (1842-1919), observa une anomalie significative : l'azote isolé de l'air était constamment légèrement plus dense que l'azote synthétisé chimiquement [2*, 4*]. Cette divergence le conduisit à suspecter la présence d'un autre gaz inconnu dans l'air.

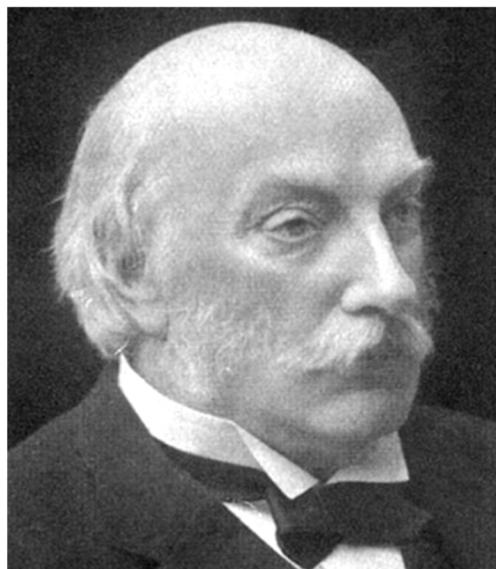
C'est en collaboration avec le chimiste écossais William Ramsay (1852-1916) que la nature de ce constituant mystérieux fut révélée. En 1894, Ramsay, poursuivant les investigations, parvint à isoler ce nouveau gaz. En faisant réagir des métaux comme le magnésium ou le calcium avec un échantillon de diazote provenant de l'air, Ramsay constata qu'environ un pour cent (en volume) du gaz ne réagissait pas, demeurant inerte. Si le diazote avait été pur, la réaction aurait été complète [1]*.

En raison de l'extrême inertie chimique de ce gaz, Ramsay lui attribua le nom d'argon, dérivé du mot grec ἀργός signifiant "paresseux" ou "inactif" [2]*. Après cette découverte majeure, Ramsay et son collaborateur Morris W. Travers explorèrent la possibilité de l'existence d'autres gaz similaires. Ils identifièrent d'abord l'**hélium** en 1895, isolé à partir d'un minéral terrestre (la clévéite), bien qu'il ait été observé spectroscopiquement dans le soleil dès 1868 [1*, 3*]. Par la suite, en 1898, par distillation fractionnée* de l'air liquide, ils découvrirent le **néon** (du grec "nouveau"), le **krypton** (du grec "caché") et le **xénon** (du grec "étranger") [1*, 2*]. Le **radon**, sixième gaz noble, fut quant à lui identifié pour la première fois en 1900 par le chimiste allemand Friedrich E. Dorn [3]*.

En reconnaissance de ces découvertes révolutionnaires, Lord Rayleigh fut lauréat du prix Nobel de physique en 1904. La même année, William Ramsay se vit décerner le prix Nobel de chimie pour ses services dans la découverte des éléments gazeux inertes dans l'air et la détermination de leur place dans le système périodique [1*, 2*].



William Ramsay



Lord Rayleigh

Figure 3.2: Lord Rayleigh (à gauche) et William Ramsay (à droite), pionniers dans la découverte des gaz rares.

3. L'Existence Naturelle des Gaz Nobles

Comme l'a établi William Ramsay il y a plus d'un siècle, les gaz nobles représentent collectivement près d'un pour cent du volume de l'atmosphère terrestre [1]*. Cependant, il est crucial de noter que cette proportion est majoritairement due à la présence de l'argon, qui constitue environ 0,93% de l'air sec. Cette abondance élevée de l'argon s'explique principalement par la désintégration radioactive du potassium-40 (^{40}K) présent dans la croûte terrestre [1*, 2*, 3*].

Les autres gaz nobles – l'hélium, le néon, le krypton et le xénon – sont présents dans des concentrations atmosphériques bien moindres (voir **Tableau 3.2** pour des exemples de leurs teneurs en parts par millions et masses volumiques). Par exemple, le néon se trouve à environ 18 ppm*, le krypton à 1 ppm, et le xénon à seulement 0,1 ppm. Quant à l'hélium, bien qu'il soit le deuxième élément le plus abondant dans l'univers, sa concentration atmosphérique n'est que d'environ 5 ppm, car il tend à s'échapper de l'atmosphère terrestre. Il est majoritairement extrait des gisements de gaz naturel, où il s'accumule via la désintégration alpha des éléments radioactifs [1*, 3*].

La rareté de la plupart de ces gaz, à l'exception notable de l'argon, a historiquement justifié leur appellation de "gaz rares". Cependant, en raison de l'abondance relative de l'argon, le terme "gaz nobles" est aujourd'hui privilégié par la communauté scientifique, car il souligne mieux leur caractéristique fondamentale de faible réactivité chimique plutôt que leur simple quantité [1*, 2*].

Gaz Noble	Symbole	Masse Molaire (g/mol)	Abondance (ppm)	Masse Volumique (g/L)	Composés Connus	Applications Principales
Hélium	He	4.0026	5.2	0.1786	Aucun	IRM, dirigeables, plongée profonde
Néon	Ne	20.1797	18.2	0.9002	Aucun	Éclairage néon, lasers
Argon	Ar	39.948	9340	1.7837	ArF ₂ (rare)	Soudage, remplissage d'ampoules
Krypton	Kr	83.798	1.1	3.7493	KrF ₂	Éclairage haute performance
Xénon	Xe	131.293	0.09	5.894	XeF ₂ , XeF ₄ , XeO ₃ , XeO ₄	Lampes à décharge, anesthésie
Radon	Rn	222	10 ⁻⁴ ×6	9.73	RnF ₂ (théorique)	Radiothérapie (usage limité)

Tableau 3.2 : Propriétés des gaz nobles



Remarque

Abondance : Mesurée en parties par million (ppm) dans l'atmosphère terrestre. Par exemple, 1 ppm de krypton signifie qu'il y a 1 atome de krypton pour 1 million d'atomes dans l'atmosphère.

Masse volumique : Données valables à température et pression standard (0°C, 1 atm).

Composés : La plupart des gaz nobles sont chimiquement inertes, mais certains comme le xénon et le krypton peuvent former des composés dans des conditions spécifiques.

4. Hélium (He)

L'hélium (He), deuxième élément le plus léger après l'hydrogène, se distingue par des propriétés physiques et chimiques uniques qui lui confèrent un rôle indispensable dans de nombreuses technologies de pointe [1] .

4.1. Propriétés critiques

L'hélium possède la **température de liquéfaction la plus basse** de tous les éléments connus, atteignant environ -268.9°C (ou 4.2K) à pression atmosphérique [1^{*}, 2^{*}]. Cette propriété cryogénique exceptionnelle en fait le fluide de refroidissement idéal pour des applications nécessitant des températures extrêmement basses, comme la supraconductivité^{*}. De plus, l'hélium liquide présente une **conductivité thermique exceptionnelle**, surpassant même celle du cuivre à des températures similaires, ce qui est crucial pour un transfert de chaleur efficace dans les systèmes cryogéniques [3]^{*}.

Cette combinaison de propriétés est particulièrement avantageuse par rapport à d'autres gaz légers comme l'hydrogène. En effet, l'hélium est non inflammable et non réactif, offrant une sécurité inégalée par rapport à l'hydrogène, hautement combustible, tout en fournissant des performances de refroidissement supérieures (voir **Tableau 3.3** pour une comparaison détaillée des propriétés de sécurité et de performance de l'He et de l'H₂).

Caractéristique	Hélium (He)	Hydrogène (H ₂)
Sécurité		
Inflammabilité	Non inflammable	Hautement inflammable ; forme des mélanges explosifs avec l'air sur une large plage de concentrations
Réactivité chimique	Très faible (gaz noble inerte)	Réactif, notamment avec l'oxygène (combustion)
Toxicité	Non toxique (mais peut être asphyxiant en remplaçant l'oxygène de l'air)	Non toxique (mais peut être asphyxiant en remplaçant l'oxygène de l'air)
Performance		
Température de liquéfaction (à 1 atm)	La plus basse connue : $\approx -268.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\approx 4.2\text{ K}$)	Basse : $\approx -252.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\approx 20.3\text{ K}$)
Conductivité thermique	Exceptionnelle à très basses températures (supérieure à l'H ₂ et la plupart des métaux à ces T)	Très bonne
Pouvoir de portance (pour aéronefs)	Élevé (environ 92% de celui de l'H ₂)	Le plus élevé (le plus léger des gaz)
Applications cryogéniques	Idéal pour des températures extrêmes (IRM, LHC, supraconducteurs)	Utilisé dans certaines applications cryogéniques, mais moins froid et plus risqué que l'He

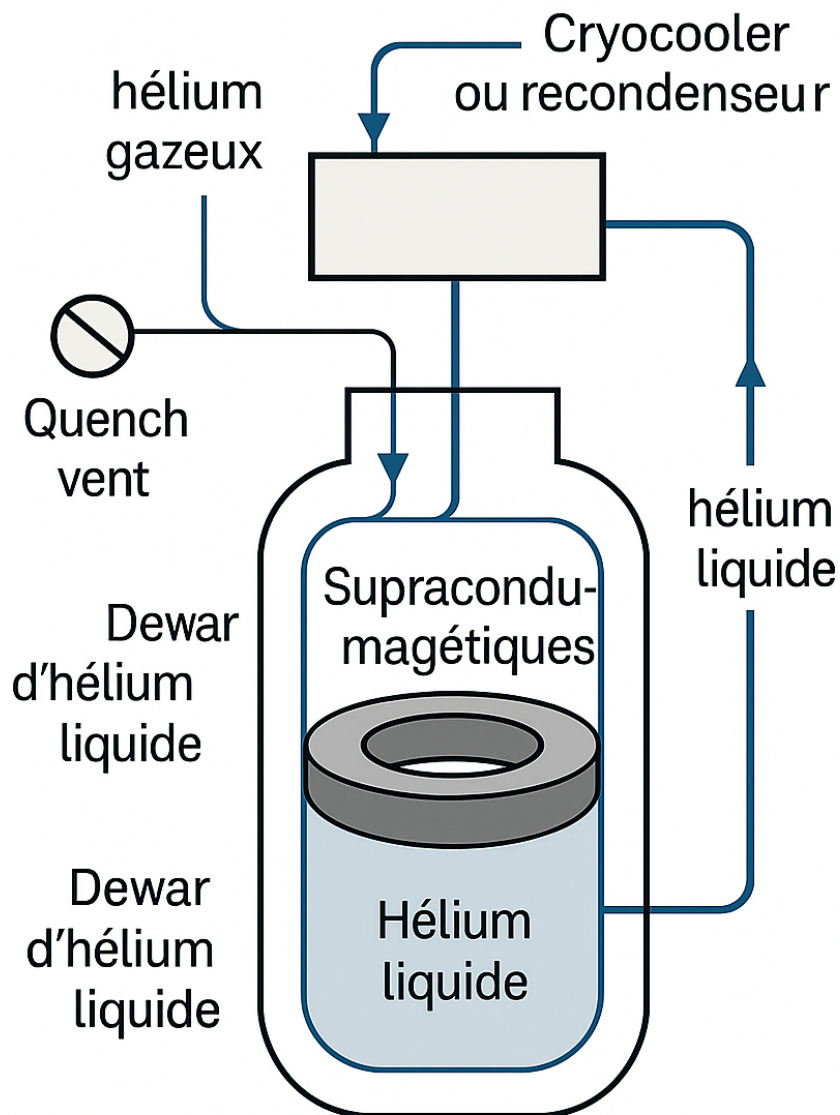
Tableau 3.3 : Comparaison de l'Hélium (He) et de l'Hydrogène (H₂) (Sécurité et Performance)

4.2. Applications clés

Les propriétés uniques de l'hélium le rendent indispensable dans des domaines technologiques variés :

Technologie médicale : L'application la plus emblématique de l'hélium liquide est le **refroidissement des aimants supraconducteurs** utilisés dans les appareils d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Ces aimants nécessitent des températures proches du zéro absolu pour fonctionner sans résistance électrique, et seul l'hélium liquide peut les maintenir dans cet état [1^{*}, 3^{*}]. Le schéma d'un système cryogénique typique utilisé dans une IRM est illustré dans la **Figure 3.3**.

Aérospatial : Dans le secteur aérospatial, l'hélium est largement employé pour la **pressurisation des réservoirs** de carburant et de comburant des fusées. Sa faible masse moléculaire, son inertie chimique et sa capacité à rester gazeux même à très basse température le rendent idéal pour maintenir une pression constante à l'intérieur des réservoirs des ergols liquides, assurant ainsi une alimentation stable des moteurs-fusées [1*, 2*].



Système de refroidissement à l'hélium liquide (exemple de système d'IRM)

Figure 3.3: Schéma d'un système de refroidissement à l'hélium liquide (exemple de système d'IRM)

5. Néon (Ne)

Après l'argon et l'hélium, le néon (Ne) est le troisième gaz noble le plus abondant de l'atmosphère terrestre, où il est présent à une concentration d'environ 18 parties par million (ppm) [1]*. Ses propriétés physiques, notamment sa signature lumineuse unique, sont exploitées dans des applications industrielles variées.

5.1. Signature optique

L'une des caractéristiques les plus distinctives du néon est son **spectre d'émission** optique*. Lorsqu'un courant électrique traverse un tube contenant du gaz néon à basse pression, il excite les atomes de néon, poussant leurs électrons vers des niveaux d'énergie supérieurs. Au retour des électrons à leur état fondamental, ils libèrent cette énergie sous forme de photons, créant une lumière caractéristique d'une teinte rouge-orangée intense [1*, 2*]. Cette lumière est principalement concentrée dans une bande de longueurs d'onde allant de **620 à 640 nm** [5]*. L'analyse de ces émissions, appelée spectroscopie*, permet d'identifier la présence du néon, comme illustré dans la **Figure 3.4**.

Spectre d'émission optique du néon excité par décharge électrique

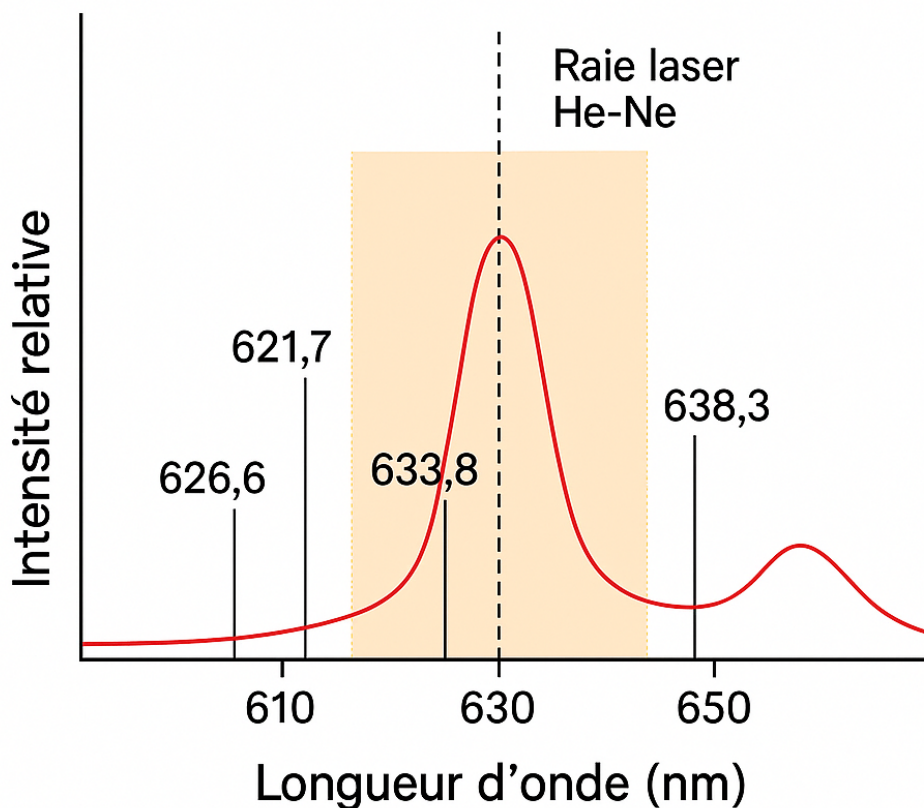


Figure 3.4: Spectre d'émission lumineux caractéristique du néon dans la région rouge-orangée

5.2. Applications industrielles

Les propriétés optiques et de décharge électrique du néon sont utilisées dans plusieurs domaines industriels clés :

Éclairage : La plus célèbre application du néon est sans doute dans la fabrication des **enseignes lumineuses**. Les tubes scellés contenant du néon sont alimentés par une tension électrique qui provoque l'émission de la lumière rouge-orangée caractéristique. Bien qu'il soit souvent utilisé comme terme générique, d'autres gaz nobles et mélanges peuvent être ajoutés pour produire une variété de couleurs [1^{*}, 2^{*}]. Par rapport aux technologies d'éclairage plus modernes comme les LED^{*}, les systèmes au néon présentent des avantages et des inconvénients en termes de coût initial et de performance (voir **Tableau 3.4** pour une comparaison plus détaillée).

Lasers : Le néon est un composant essentiel des **lasers hélium-néon^{*} (He-Ne)**, inventés en 1961. Dans ces systèmes, un mélange de 10 parties d'hélium pour 1 de néon est excité par une décharge électrique. Les atomes d'hélium excités transfèrent leur énergie par collision aux atomes de néon, qui émettent alors de manière cohérente dans le spectre visible (généralement à 632,8 nm). Ces lasers sont largement utilisés en métrologie, pour des applications de mesure de distance de haute précision, d'alignement optique et d'holographie [3^{*}, 6^{*}].

Caractéristique	Éclairage au néon (Enseignes)	Éclairage LED (Diodes électroluminescentes)
Coût initial	Élevé (fabrication artisanale, transformateurs haute tension)	Moyen à faible (production de masse, technologie standard)
Coût de fonctionnement	Moyen (consommation d'énergie supérieure à celle des LED)	Très faible (très haute efficacité énergétique)
Durée de vie	Très longue (le verre et le gaz durent longtemps, mais le transformateur peut nécessiter une maintenance)	Très longue (dizaines de milliers d'heures)
Efficacité énergétique	Bonne	Excellente (la plus efficace actuellement)
Performance optique	Éclairage distinctif et chaud, couleur rouge-orangé pure (pour le néon pur), autres couleurs avec ajout de gaz	Très large spectre de couleurs, éclairage intense, contrôle précis des couleurs et de l'intensité
Flexibilité de conception	Excellente, permet de façonner à la main des lettres et des formes	Excellente, permet de concevoir des formes complexes et fines
Maintenance	Moyenne (peut nécessiter une maintenance par des spécialistes)	Faible (nécessite rarement une maintenance)
Sécurité	Haute tension (nécessite une bonne isolation), verre fragile	Basse tension (plus sûr), matériaux robustes

Tableau 3.4 : Comparaison des coûts et des performances entre l'éclairage au néon et les LED

Note : Ce tableau reflète une comparaison générale. Les valeurs précises peuvent varier en fonction de la qualité spécifique du produit et de l'application finale.

6. Argon (Ar)

L'argon est le plus abondant des gaz nobles dans l'atmosphère, où sa concentration atteint près d'un pour cent en volume [1]*. Bien que chimiquement inerte, ses propriétés physiques uniques en font un élément essentiel dans l'industrie moderne, notamment dans les processus nécessitant une protection contre les gaz réactifs.

6.1. Avantages techniques

L'un des avantages les plus significatifs de l'argon est sa **densité, qui est environ 1.38 fois supérieure à celle de l'air** [2]*. Cette caractéristique physique est cruciale pour le soudage, en particulier dans les procédés tels que le soudage à l'arc* sous gaz inerte au tungstène (**TIG**). Grâce à sa densité élevée, l'argon gazeux, expulsé de la torche, crée une couverture de protection qui se dépose autour de l'arc de soudage et du bain de fusion. Cette "atmosphère inerte" lourde chasse l'air ambiant, empêchant l'oxygène et l'azote d'entrer en contact avec le métal en fusion. Cela permet de prévenir l'oxydation et la formation de nitrures, qui affaibliraient la soudure [7]*. Le principe de cette protection gazeuse est illustré dans la **Figure 3.5**.

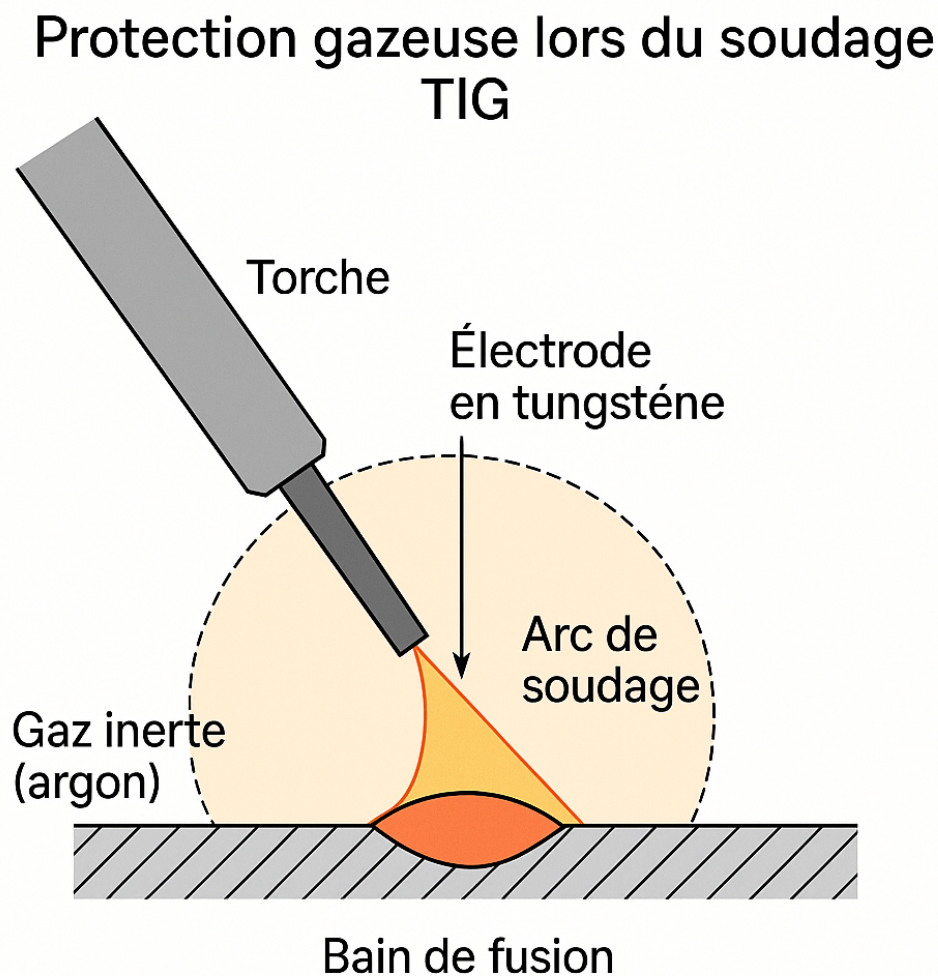


Figure 3.5: Schéma de torche TIG (Tungsten Inert Gas) avec protection gazeuse à l'argon

6.2. Utilisations stratégiques

L'inertie chimique de l'argon, combinée à son faible coût relatif et à son abondance, le rend indispensable dans plusieurs secteurs stratégiques :

- **Métallurgie** : L'argon est largement utilisé pour créer une **atmosphère inerte** dans les fours et les creusets de haute température. Il est injecté pour purger les impuretés gazeuses, protéger les métaux et alliages réactifs de l'oxydation et de la nitruration, et prévenir la décomposition des matériaux pendant leur fusion et leur traitement [1*, 3*].
- **Électronique** : Dans l'industrie des semi-conducteurs, l'argon joue un rôle vital. Il sert de gaz porteur et d'environnement inerte pendant les processus de fabrication délicats, tels que la croissance cristalline, le dépôt en phase vapeur (CVD) et la pulvérisation cathodique (sputtering) pour la création de couches minces [3]*. La pureté de l'argon est un facteur critique dans ces applications, et des niveaux de pureté extrêmes sont souvent requis pour garantir l'intégrité des produits finaux (voir **Tableau 3.5** pour les niveaux de pureté typiques requis).

Application	Niveaux de pureté typiques requis	Explication de la nécessité de la pureté
Soudage TIG/MIG	% 99.999 - % 99.996	La présence d'impuretés (O ₂ , N ₂) peut affaiblir la soudure en provoquant des porosités, de l'oxydation ou de la fragilisation.
Sidérurgie	% 99.99 - % 99.9	Utilisé pour agiter l'acier liquide et éliminer les impuretés gazeuses sans réagir avec le métal. Un argon de haute pureté empêche la contamination.
Industrie électronique	99,999 % - 99,9999 % (ou plus)	Des impuretés de l'ordre de quelques parties par million (ppm) peuvent contaminer les semi-conducteurs et les circuits intégrés, causant des défauts critiques.
Chromatographie en phase gazeuse (GC)	% 99.9999 - % 99.999	Sert de gaz porteur. Des impuretés pourraient fausser les résultats de l'analyse en interférant avec les composants à détecter.
Production de titane	% 99.999 - % 99.99	Le titane est très réactif à l'oxygène et à l'azote à haute température. Un environnement d'argon très pur est nécessaire pour empêcher la formation de composés fragiles.

Tableau 3.5 : Niveaux de pureté de l'argon requis par application

Note : Ces valeurs indiquent une pureté typiquement requise. Certaines applications spécialisées peuvent nécessiter des niveaux de pureté encore plus élevés.

7. Krypton (Kr) et Xénon (Xe)

Les gaz nobles les plus lourds, le krypton et le xénon, sont les plus rares de la série et partagent des propriétés distinctives qui les rendent indispensables pour des applications de niche, souvent à la pointe de la technologie. Contrairement à leurs homologues plus légers comme l'hélium et le néon, leur utilisation est principalement motivée par leurs caractéristiques de masse atomique élevée et de facilité d'ionisation [1*, 2*].

7.1. Caractéristiques distinctives

Le krypton et le xénon possèdent une **conductivité électrique contrôlable** en raison de leur potentiel d'ionisation relativement faible par rapport aux gaz nobles plus légers. Une tension électrique plus basse est nécessaire pour provoquer une décharge lumineuse dans ces gaz, ce qui permet de les utiliser efficacement dans divers types de lampes et de tubes [1*, 3*]. Cette propriété est directement liée à leur comportement

diélectrique et peut être analysée par des courbes de rupture diélectrique* (courbes de Paschen), qui illustrent la relation entre la tension de claquage, la pression du gaz et la distance entre les électrodes (voir **Figure 3.6** pour un exemple).

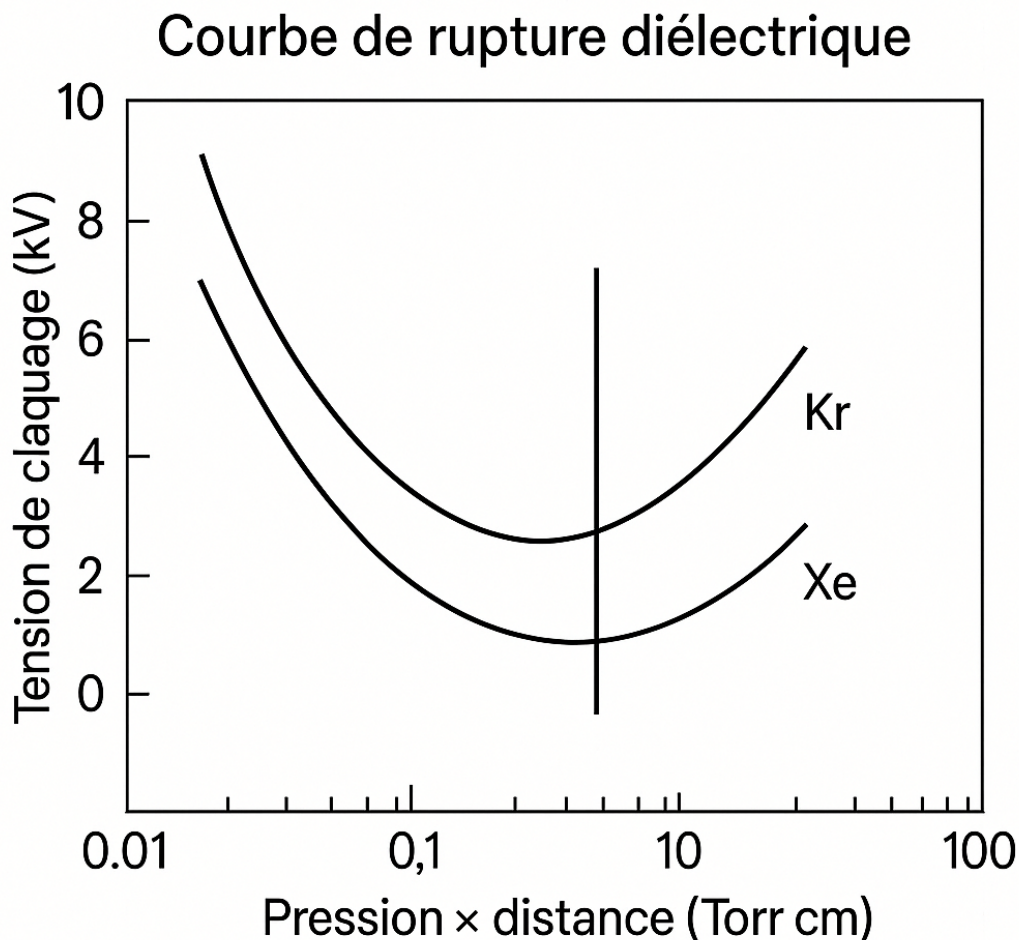


Figure 3.6: Courbe de rupture diélectrique (Courbe de Paschen)

7.2. Innovations technologiques

Les propriétés uniques de ces gaz leur permettent d'être utilisés dans des innovations technologiques spécialisées :

- Krypton : Lampes haute puissance

Le krypton est utilisé pour remplir des lampes à incandescence et des lampes à décharge de haute puissance, notamment dans les **projecteurs et les flashes photographiques**. Sa masse atomique élevée le rend plus efficace que l'argon pour ralentir l'évaporation du filament de tungstène, permettant à la lampe de fonctionner à des températures plus élevées et de produire une lumière plus blanche et plus brillante [1*, 5*].

- Xénon : Propulsion ionique*

Le xénon est le gaz de choix pour les **systèmes de propulsion ionique** utilisés sur les satellites et les engins spatiaux. Dans ces systèmes, des atomes de xénon sont ionisés et accélérés par un champ électrique. L'éjection de ces ions à très haute vitesse génère une faible poussée, mais très efficace, qui permet de modifier l'orbite des

- L'**argon** est le gaz noble le plus consommé, principalement dans l'**industrie lourde** pour le soudage [7]^{*} et la métallurgie [3]^{*} en tant qu'atmosphère inerte.
- L'**hélium** est majoritairement utilisé dans la **cryogénie** [1]^{*}. Il permet de refroidir les aimants supraconducteurs des appareils d'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) [3]^{*} et des grands instruments de recherche [1]^{*}. Il sert également de gaz porteur en chromatographie en phase gazeuse [3]^{*}.
- Le **néon** est indispensable dans la **fabrication de semi-conducteurs** [1]^{*}, où il est utilisé dans les lasers excimères pour la photolithographie [6]^{*}. Il est aussi employé dans les lasers hélium-néon pour la métrologie [6]^{*}.
- Le **krypton** et le **xénon** sont utilisés dans des niches technologiques à forte valeur ajoutée [1]^{*}. Le krypton est utilisé pour les lampes à incandescence et les flashes photographiques de haute puissance [6]^{*}, tandis que le xénon est utilisé dans la **propulsion ionique** des satellites en raison de sa masse atomique élevée [8]^{*}.

Un **diagramme des flux d'utilisation** (Figure 3.7) montrerait la répartition de ces volumes, avec l'argon constituant la majeure partie de la consommation industrielle, tandis que les autres gaz nobles, plus rares, sont réservés à des applications de pointe.

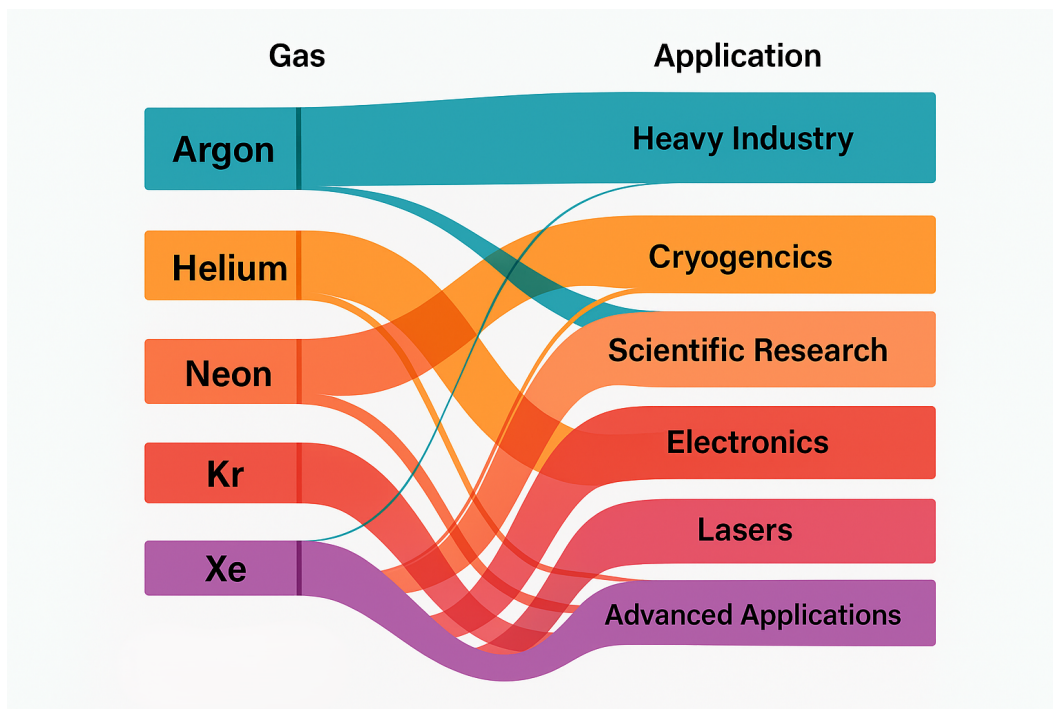


Figure 3.7 : Diagramme des flux d'utilisation des gaz nobles par secteur

8.2. Défi : La pénurie d'hélium et alternatives

L'analyse des tendances du marché des gaz nobles met en évidence un défi majeur : la **pénurie d'hélium** [1]^{*}, [3]^{*}. L'hélium est une ressource non renouvelable, extraite des gisements de gaz naturel, et sa faible densité lui permet de s'échapper de l'atmosphère terrestre une fois libéré [1]^{*}. L'instabilité de l'approvisionnement et l'augmentation de la demande, en particulier dans la cryogénie médicale et la recherche scientifique, ont conduit à une volatilité des prix et à des tensions sur le marché [3]^{*}.

Pour faire face à cette pénurie, deux approches sont explorées :

- **Récupération et recyclage** : Des systèmes sophistiqués sont mis en place dans les hôpitaux et les laboratoires pour capturer l'hélium évaporé et le re-liquéfier, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'approvisionnement [1]*.
- **Substituts** : Pour certaines applications où une inertie chimique est requise mais pas une cryogénie extrême, des alternatives plus abondantes et moins chères comme l'argon peuvent être utilisées [7]*.

9. Activité d'auto-évaluation

Exercice : Exercice 1

Qui, parmi les scientifiques suivants, a découvert l'argon après avoir remarqué que l'azote extrait de l'air était plus dense que l'azote synthétisé en laboratoire ?

- ☐ a) William Ramsay
- ☐ b) Lord Rayleigh
- ☐ c) Morris W. Travers
- ☐ d) Friedrich E. Dorn

Exercice : Exercice 2

L'hélium possède le point d'ébullition le plus bas de tous les éléments, ce qui le rend idéal pour les applications de cryogénie.

- ☐ Vrai
- ☐ Faux

Exercice : Exercice 3

Pourquoi la densité élevée de l'argon est-elle un avantage crucial dans les procédés de soudage comme le TIG ?

Exercice : Exercice 4

Associez chaque gaz noble à son application principale :

Protection des soudures et des métaux

Éclairage des enseignes publicitaires

Propulsion ionique pour les satellites

Néon	Argon	Xénon

Exercice : Exercice 5

Quelle propriété du néon est exploitée pour créer la lumière caractéristique des enseignes lumineuses ?

Exercice : Exercice 6

D'après le Tableau 1, quel gaz noble est le plus abondant dans l'atmosphère et quelle est sa concentration approximative ?

- ☐ a) L'hélium, avec une concentration de 5 ppm.
- ☐ b) Le néon, avec une concentration de 18 ppm.
- ☐ c) L'argon, avec une concentration de 9300 ppm.
- ☐ Le krypton, avec une concentration de 1 ppm.

Exercice : Exercice 7

Le krypton et le xénon sont préférés à l'argon dans les systèmes de propulsion ionique en raison de leur faible masse atomique.

- ☐ Vrai
- ☐ Faux

Exercice : Exercice 8

Quelle est la principale source naturelle de l'hélium et pourquoi est-il considéré comme une ressource vulnérable à la pénurie ?

- ☐ a) L'hélium est un sous-produit de la combustion du charbon, et sa pénurie est due à la pollution.
- ☐ b) L'hélium est extrait des gisements de pétrole, et il est vulnérable car il est difficile à transporter.
- ☐
- c) L'hélium est extrait des gisements de gaz naturel, et sa faible densité le fait s'échapper de l'atmosphère terrestre une fois libéré.

- ☐ d) L'hélium est une ressource renouvelable produite par le soleil, mais son extraction est trop coûteuse.

Exercice : Exercice 9

Dans le contexte du soudage, quel autre gaz, plus abondant et moins cher, peut être utilisé comme substitut partiel à l'hélium pour certaines applications ?

- ☐ a) Néon
- ☐ b) Xénon
- ☐ c) Krypton
- ☐ d) Argon

Exercice : Exercice 10

Selon le diagramme des flux d'utilisation, vers quels secteurs se dirigent principalement les gaz nobles les plus rares, le krypton (Kr) et le xénon (Xe) ?

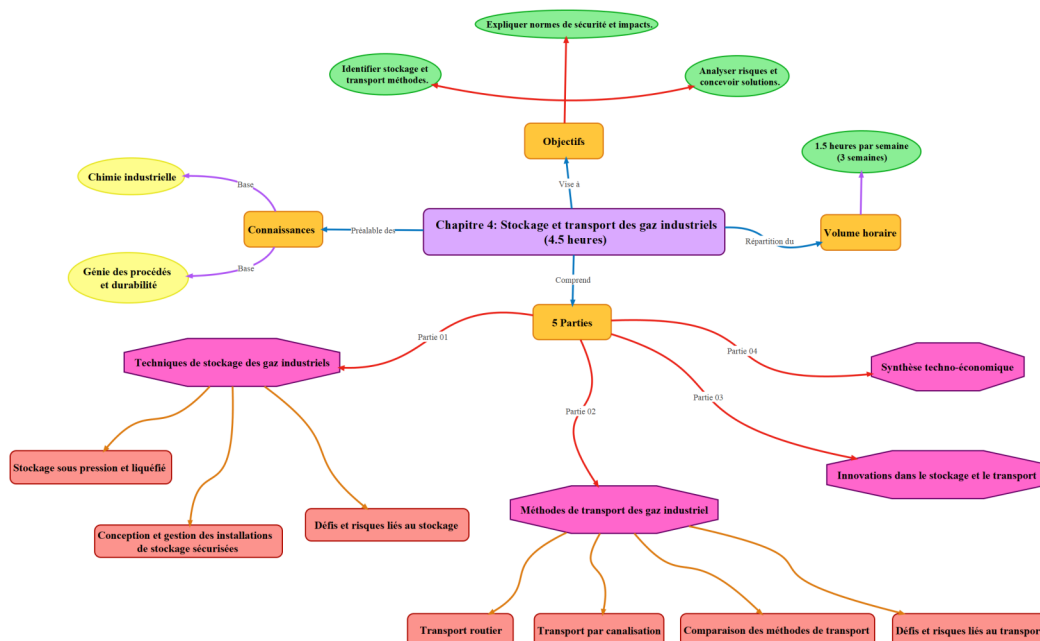
- ☐ a) L'industrie lourde
- ☐ b) La cryogénie et la recherche scientifique
- ☐ c) L'électronique et les lasers
- ☐ d) Les applications avancées

Chapitre 4: Stockage et transport des gaz industriels

V

Dans ce chapitre, nous explorerons les concepts fondamentaux du **stockage** et du **transport** des **gaz industriels**, en mettant un accent particulier sur leurs exigences uniques en termes de **sécurité** et d'**efficacité**. Ces caractéristiques, qui distinguent leur gestion des autres procédés industriels, sont la base de leurs **applications** cruciales dans les secteurs **chimiques**, **pétrochimiques** et **médicaux**. Les **propriétés** des gaz, telles que leur **compressibilité**, leur **état liquide** ou **gazeux** et leurs **risques associés**, seront étudiées en détail.

Nous aborderons les principes des **méthodes de stockage**, comme les **bouteilles sous pression** et les **réservoirs cryogéniques**, ainsi que les **techniques de transport**, telles que le **routier** et par **canalisation**. Ces études incluent l'identification des principales **applications industrielles**, la compréhension des **normes de sécurité** (ADR, ATEX), l'analyse des **défis environnementaux**, comme les **émissions de CO₂**, et l'évaluation des **innovations technologiques** dans le contexte des enjeux **économiques** et **durables**.



Carte mentale du chapitre 4

1. Techniques de stockage des gaz industriels

Le stockage des gaz industriels est une étape essentielle pour garantir leur disponibilité tout en assurant la sécurité des installations et des utilisateurs. Cette section examine les méthodes de stockage, les exigences de conception des installations et les défis associés, en s'appuyant sur les principes fondamentaux de la chimie industrielle et de la sécurité des procédés [1] *.

1.1. Stockage sous pression et liquéfié

Les gaz industriels sont stockés soit sous haute pression dans des bouteilles métalliques, soit sous forme liquéfiée dans des réservoirs cryogéniques *, selon les besoins des applications industrielles et médicales. Les bouteilles, généralement en acier ou en alliages d'aluminium, sont conçues pour résister à des pressions élevées, typiquement entre 200 et 300 bars, comme pour l'oxygène utilisé dans les hôpitaux ou l'argon pour le soudage à l'arc * [2] *. La **Figure 4.1** illustre les composants d'une bouteille de gaz comprimé, incluant le chapeau de protection, le robinet de régulation, l'ogive, l'étiquette d'identification et le fût en acier. Pour les petites quantités ou les applications nécessitant une densité élevée, le stockage liquéfié est privilégié, comme pour l'azote liquide (température de liquéfaction : $-195,8\text{ °C}$) utilisé en cryogénie médicale pour la conservation des tissus biologiques, ou l'hydrogène liquide ($-252,9\text{ °C}$) pour les propulseurs spatiaux [1] *. Les réservoirs cryogéniques, tels que les vases de Dewar, utilisent une isolation par vide poussé pour maintenir les gaz à basse température, comme montré dans la **Figure 4.2**, qui présente une coupe transversale d'un vase de Dewar avec son réservoir intérieur et son isolation thermique. Le **Tableau 4.1** récapitule les méthodes de stockage et les applications courantes de différents gaz.

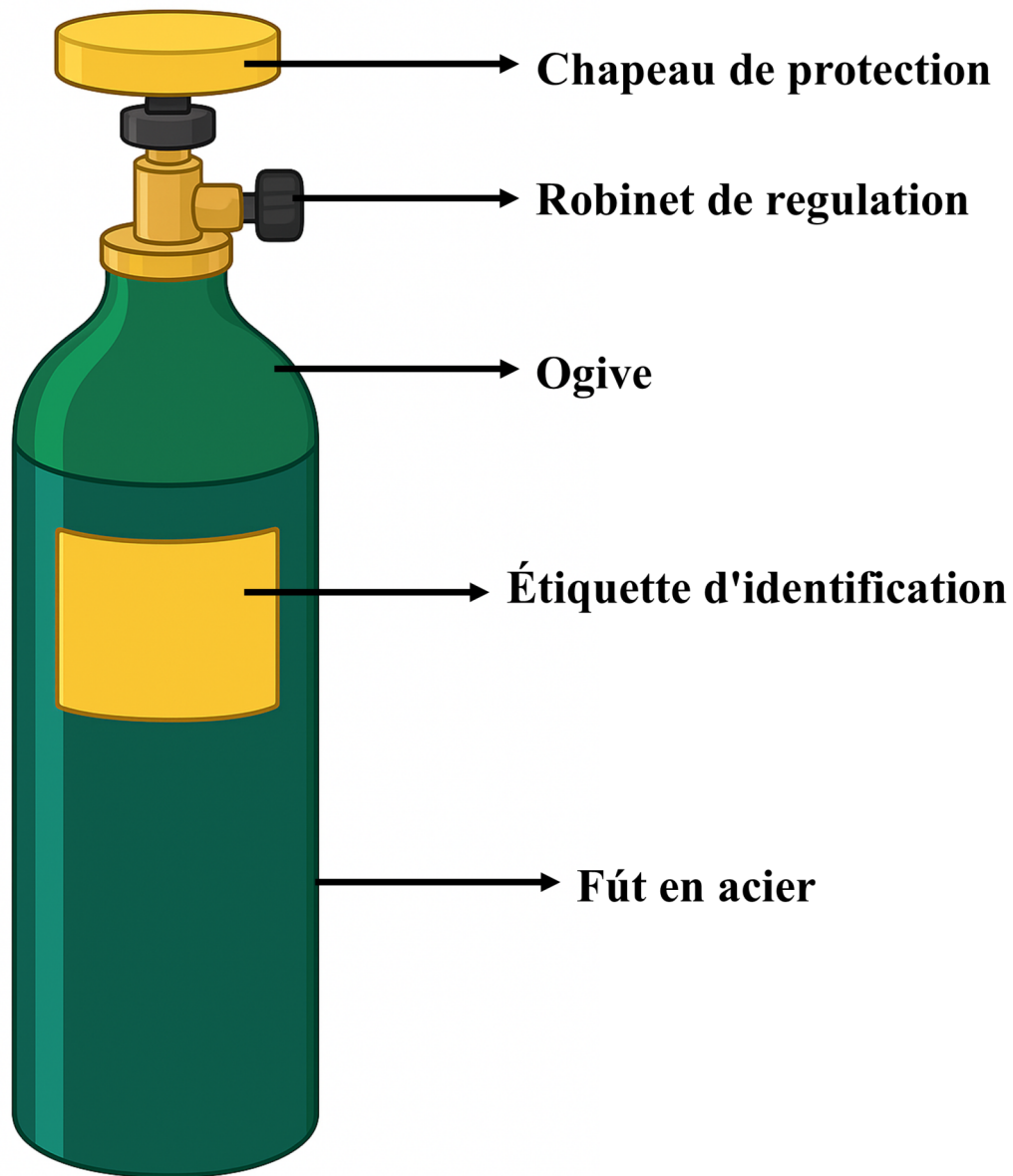


Figure 4.1 : Schéma d'une bouteille de gaz comprimé, illustrant ses composants (chapeau de protection, robinet de régulation, ogive, étiquette d'identification, fût en acier).

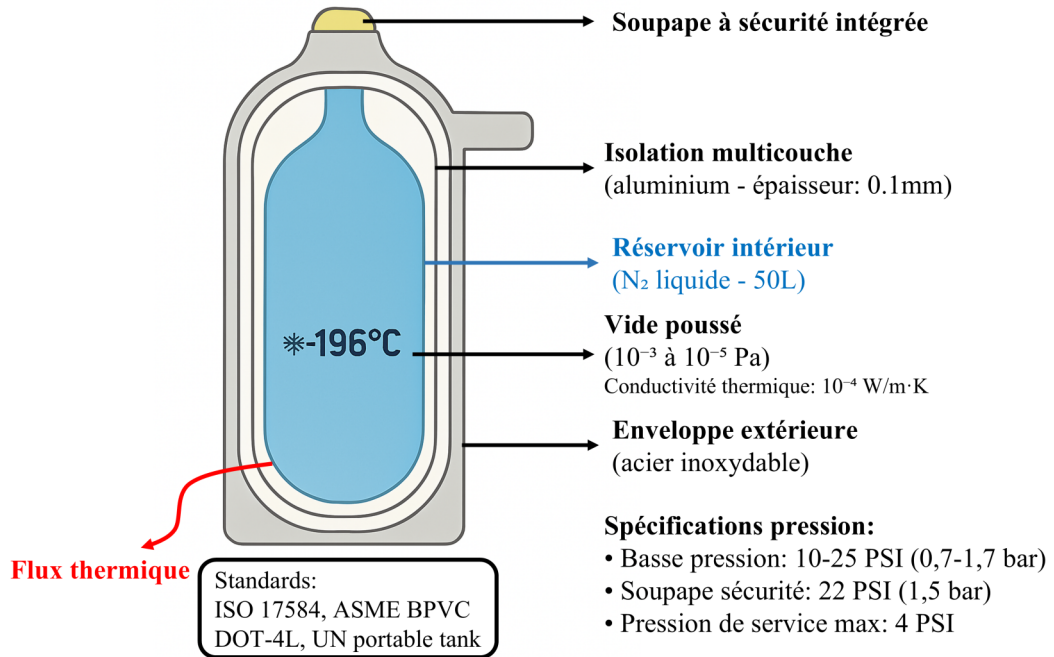


Figure 4.2 : Coupe transversale d'un vase de Dewar, montrant le réservoir intérieur pour le gaz liquéfié et l'isolation thermique par vide poussé.

Gaz	Méthode de stockage	Temp/Pression	Applications
Azote	Liquéfié/Comprimé	-196°C, 1-10 bar 200-300 bar	• Cryogénie médicale • Conservation alimentaire
Oxygène	Liquéfié/Comprimé	-183°C 200-300 bar	• Assistance respiratoire • Coupage à la flamme
Argon	Comprimé	200-250 bar	• Soudage à l'arc (TIG/MIG) • Protection des métaux
Hydrogène	Liquéfié/Comprimé	-253°C, 1.5 bar 350-700 bar	• Propulsion spatiale • Piles à combustible

Tableau 4.1 : Méthodes de stockage et applications des gaz industriels

1.2. Conception et gestion des installations de stockage sécurisées

La conception des installations de stockage doit respecter des normes strictes pour minimiser les risques d'accidents. Les locaux de stockage sont idéalement situés à l'extérieur pour assurer une ventilation naturelle, réduisant le risque d'accumulation de gaz en cas de fuite [2]*. Pour les installations intérieures, une ventilation mécanique* conforme aux normes européennes, telles que la norme EN* 60079 pour les atmosphères explosives, est requise [2]*. La température ambiante doit être contrôlée pour éviter une surpression dans les bouteilles ou une vaporisation prématurée des gaz liquéfiés [1]*. Un auvent ignifuge peut protéger les bouteilles des intempéries, comme la pluie ou le rayonnement solaire prolongé. Les bouteilles doivent être organisées par famille de risques (inflammables, comburants, toxiques) pour prévenir les interactions dangereuses et fixées verticalement à l'aide de chaînes ou de sangles non conductrices, comme illustré dans la **Figure 4.3**, qui montre un stockage extérieur avec une grille de sécurité et un auvent protecteur [2]*. La conformité aux réglementations ATEX* (Directive 2014/34/UE) est essentielle pour les gaz inflammables, comme l'hydrogène ou le méthane, afin de limiter les risques d'explosion [2]*.

Recommandations de sécurité :

- Restreindre l'accès à la zone de stockage aux personnes autorisées, avec des systèmes de verrouillage sécurisés.
- Installer des panneaux d'avertissement clairs et des consignes d'urgence visibles (ex. : procédures en cas de fuite ou d'incendie).
- Séparer physiquement les bouteilles par type de risque, avec des barrières ignifuges si nécessaire.

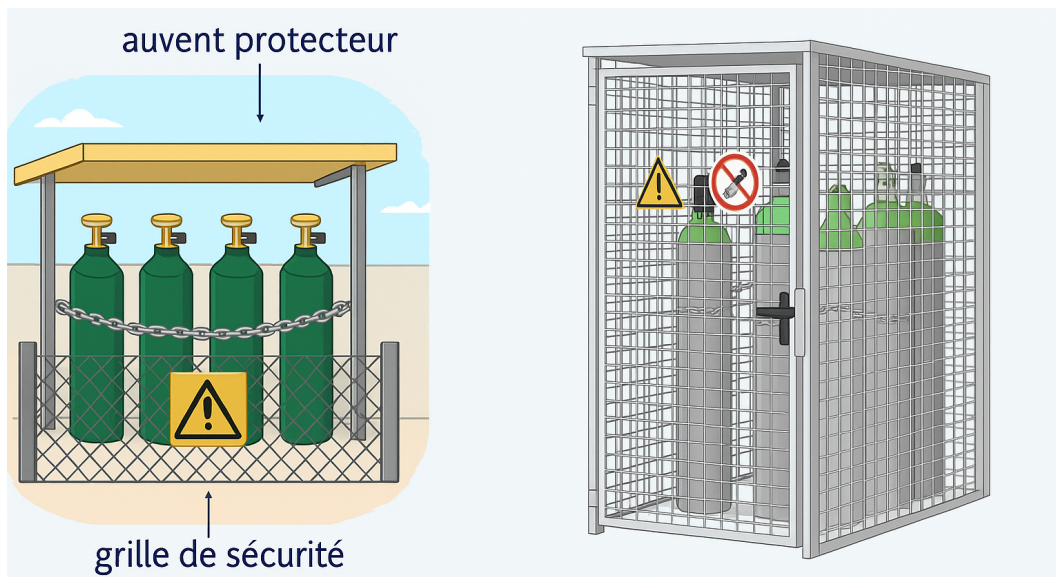


Figure 4.3 : Illustration d'un stockage extérieur de bouteilles de gaz, équipé d'une grille de sécurité et d'un auvent protecteur.

1.3. Défis et risques liés au stockage

Le stockage des gaz industriels présente des défis techniques, sécuritaires et économiques. Les gaz liquéfiés nécessitent des réservoirs cryogéniques capables de maintenir des températures basses (ex. : $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour l'oxygène liquide), ce qui entraîne des coûts énergétiques élevés pour le refroidissement et l'isolation [1]*. Les risques sécuritaires incluent les fuites, qui peuvent provoquer une asphyxie pour des gaz comme l'azote ou l'argon, ou des explosions pour des gaz inflammables comme l'hydrogène [2]*. Une fuite d'oxygène liquide peut enrichir l'atmosphère en oxygène, augmentant le risque d'incendie [2]*. Les contraintes économiques incluent les coûts d'entretien des réservoirs cryogéniques et des systèmes de détection de fuites [1]*. Les impacts environnementaux*, tels que les rejets accidentels de gaz à effet de serre comme l'hexafluorure de soufre (SF_6), doivent également être considérés [1]*. Le **Tableau 4.2** résume les principaux défis et leurs solutions proposées.

Défi	Solution proposée
Fuites de gaz	• Capteurs électrochimiques (précision: 1-5 ppm) • Vannes automatiques à fermeture instantanée • Systèmes de détection LASER (TDLAS) en temps réel
Températures élevées	• Réservoirs cryogéniques à double paroi sous vide • Isolation en mousse polyuréthane • Ventilation forcée (20 renouvellements d'air/h)
Coûts d'entretien élevés	• Matériaux composites résistants à la corrosion (ex: AISI 316L + revêtement PTFE) • Maintenance préventive basée sur l'IA (prédiction des défaillances)

Tableau 4.2 : Défis et solutions dans le stockage des gaz industriels

2. Méthodes de transport des gaz industriel

Le transport des gaz industriels est essentiel pour répondre aux besoins des industries chimiques, pétrochimiques et médicales, tout en respectant des contraintes de volume, de coût, de sécurité et de durabilité. Contrairement au stockage, qui se concentre sur la préservation des gaz dans des conditions stables [3]^{*}, le transport nécessite des infrastructures adaptées pour acheminer les gaz efficacement et en toute sécurité. Cette section explore les méthodes de transport routier^{*} et par canalisation, leurs avantages, leurs limites et les défis associés, en s'appuyant sur les principes de la chimie industrielle et de la sécurité des procédés [3]^{*}.

2.1. Transport routier

Le transport routier des gaz industriels est régi par l'Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route (ADR), qui impose des normes strictes pour les véhicules (ex. : citernes à double paroi avec une pression maximale de 300 bars), les emballages (ex. : bouteilles en acier conformes à la norme ISO^{*} 9809) et la formation des conducteurs (ex. : certificats ADR renouvelés tous les 5 ans) [3]^{*}. Les petites quantités de gaz sont transportées dans des bouteilles métalliques, comme l'argon utilisé pour le soudage à l'arc dans les ateliers de fabrication métallique, tandis que les volumes plus importants sont acheminés via des camions-citernes, par exemple pour l'oxygène liquide destiné aux unités de soins intensifs ou aux aciéries pour le coupage à la flamme^{*} [4]^{*}. Les gaz sont classés en trois catégories selon leur dangerosité : toxiques (catégorie 1, ex. : chlore pour la désinfection de l'eau), inflammables (catégorie 2, ex. : hydrogène pour l'hydrocraquage^{*} pétrochimique) et asphyxiants/comburants (catégorie 3, ex. : azote pour l'inertage, oxygène pour la combustion) [3]^{*}. Le **Figure 4.4** illustre les types de véhicules utilisés, notamment les camions-citernes pour les gaz liquéfiés et les remorques à tubes haute pression pour les gaz comprimés. Le **Tableau 4.3** résume les options d'approvisionnement en fonction du gaz, de son état et de la méthode de transport.

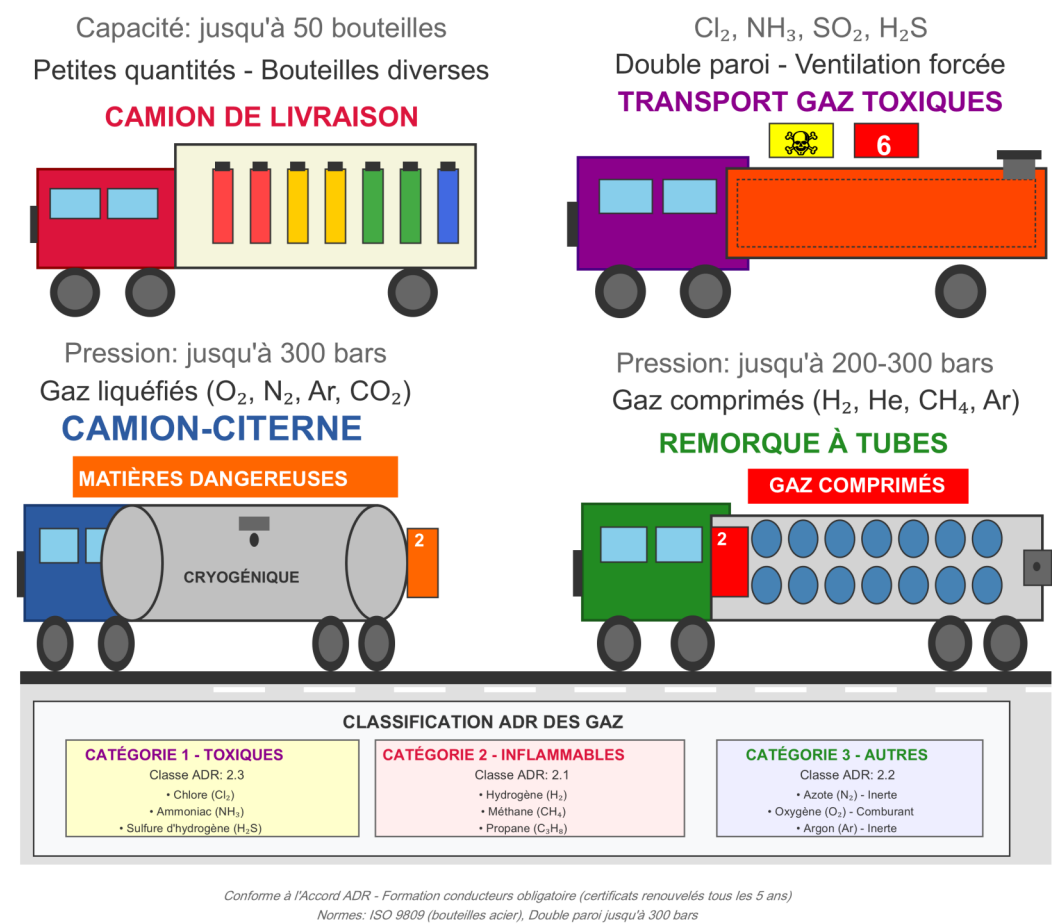


Figure 4.4: Illustration des types de véhicules utilisés pour le transport routier, comme les camions-citernes pour les gaz liquéfiés et les remorques à tubes haute pression pour les gaz comprimés.

Gaz	État	Méthode de transport	Applications courantes
Azote	Gazeux/Liquéfié	Bouteilles/Camions-citernes	Inertage chimique, conservation alimentaire
Oxygène	Gazeux/Liquéfié	Bouteilles/Camions-citernes	Assistance respiratoire, coupage à la flamme
Argon	Gazeux	Bouteilles	Soudage à l'arc
Hydrogène	Gazeux/Liquéfié	Bouteilles/Remorques à tubes	Hydrocraquage pétrochimique, piles à combustible

Tableau 4.3 : Options d'approvisionnement selon le gaz et la méthode de transport

2.2. Transport par canalisation

Le transport par canalisation est la méthode la plus économique pour acheminer de grandes quantités de gaz industriels sur de longues distances, comme l'hydrogène pour les procédés d'hydrocraquage dans les raffineries pétrochimiques ou l'azote pour l'inertage dans les usines chimiques [4] *. Cette méthode permet une livraison continue avec une capacité élevée (ex. : jusqu'à 1,2 million de m³ par jour pour l'hydrogène), mais elle présente des risques significatifs, tels que les fuites ou les explosions, en raison des pressions élevées (50 à 100 bars) et des propriétés des gaz [3] *. Les canalisations sont construites en acier au carbone avec des revêtements époxy anti-corrosion ou en alliages d'acier inoxydable pour les gaz corrosifs, avec des stations de compression tous les 100 à 200 km pour maintenir la pression [4] *. La **Figure 4.5** présente un diagramme de la chaîne d'approvisionnement, illustrant les méthodes de transport (routier et par canalisation) en fonction de la demande, de la production à l'utilisateur final.

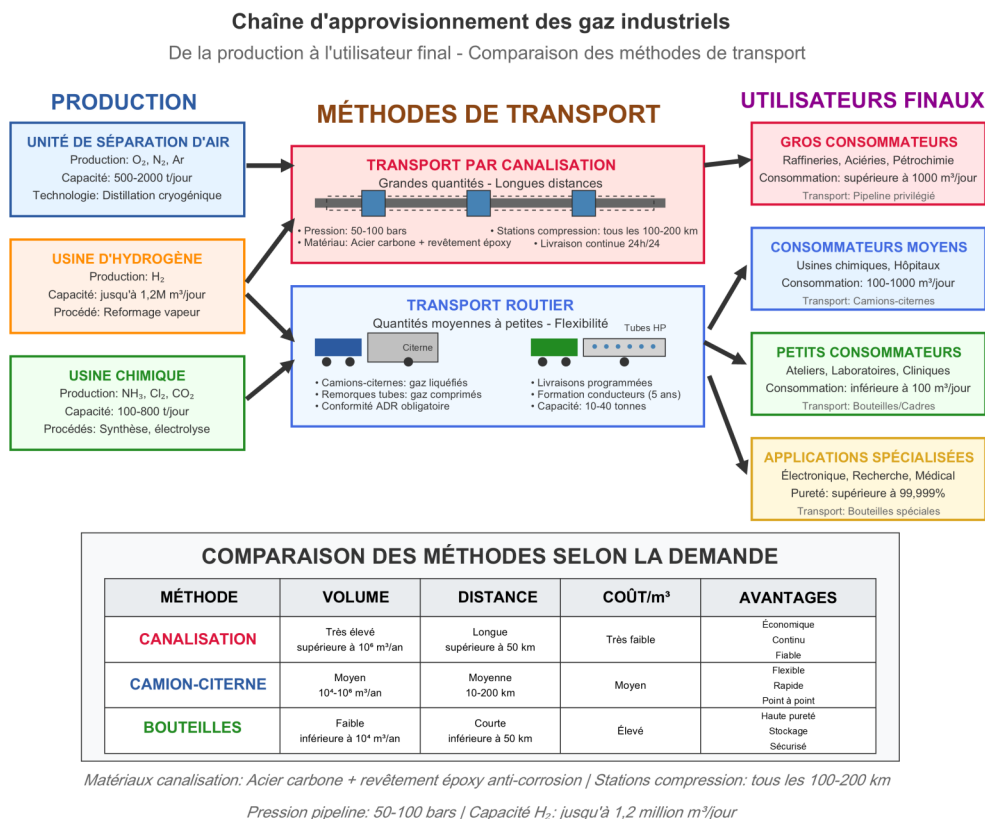


Figure 4.5: Diagramme de la chaîne d'approvisionnement des gaz industriels, de la production à l'utilisateur final, comparant les méthodes de transport selon la demande.

2.3. Comparaison des méthodes de transport

Cette section compare le transport routier et le transport par canalisation selon quatre critères : coût, flexibilité, volume transporté et risques associés*. Le transport routier est flexible, permettant de desservir des sites dispersés, mais il est coûteux pour les gros volumes, avec des coûts de carburant générant environ 0,8 kg de CO₂ par litre de diesel [5]*. Le transport par canalisation est économique, avec des coûts d'exploitation estimés à 0,01-0,03 €/kg d'hydrogène transporté, mais sa flexibilité est limitée aux installations fixes [4]*. Les risques du transport routier incluent les accidents de la route, tandis que les canalisations sont vulnérables aux fuites massives, nécessitant des systèmes de détection avancés [3]*. Le **Tableau 4.4** résume ces critères pour clarifier les différences.

Critère	Transport routier	Transport par canalisation
Coût	Élevé pour gros volumes	Faible pour gros volumes
Flexibilité	Élevée (adapté à plusieurs sites)	Limitée (sites fixes)
Volume	Limité par bouteilles/citernes	Très élevé (jusqu'à 1,2 M m ³ /jour)
Risques	Accidents routiers, fuites	Fuites massives, explosions

Tableau 4.4 : Comparaison des méthodes de transport

2.4. Défis et risques liés au transport

Le transport des gaz industriels présente des défis distincts de ceux du stockage. Pour le transport routier, les accidents de la route, souvent dus à des erreurs humaines ou à des défaillances des citernes, et les fuites des bouteilles sont des risques majeurs [3]*. Pour le transport par canalisation, les fuites massives peuvent provoquer des explosions, en particulier pour l'hydrogène, dont la faible densité ($0,089 \text{ kg/m}^3$) favorise une dispersion rapide [4]*. Les impacts environnementaux incluent les émissions de CO_2 des camions-citernes, estimées à 0,8 kg par litre de diesel, et les rejets accidentels de gaz à effet de serre, comme le méthane, lors des fuites de canalisations [5]*. La corrosion des canalisations peut représenter jusqu'à 5 % des coûts d'exploitation annuels [4]*. Le **Tableau 4.5** récapitule les défis et leurs solutions.

Défi	Solution proposée
Accidents routiers	Formation certifiée ADR, maintenance des véhicules
Fuites de canalisations	Capteurs IoT pour la détection, revêtements anti-corrosion
Impact environnemental	Véhicules à hydrogène, optimisation des itinéraires

Tableau 4.5 : Défis et solutions dans le transport

3. Innovations dans le stockage et le transport

Les innovations dans le transport des gaz industriels visent à améliorer la sécurité et la durabilité, en complément des avancées dans le stockage. Les systèmes de surveillance basés sur l'Internet des objets (IoT) utilisent des capteurs optiques pour détecter les fuites dans les canalisations et les citernes en temps réel, avec un temps de réponse inférieur à 10 secondes [3]*. Les canalisations modernes intègrent des composites polymères renforcés de fibres de carbone, réduisant le poids de 30 % et les coûts d'entretien de 20 % par rapport à l'acier [4]*. Dans le transport routier, les camions à hydrogène*, avec une autonomie de 500 km et une capacité de 1000 kg de gaz liquéfié, réduisent les émissions de CO₂ de 80 % par rapport aux véhicules diesel [5]

. Les algorithmes d'intelligence artificielle optimisent les itinéraires de livraison, réduisant la consommation de carburant de 10 à 15 % [3]. Ces innovations se distinguent des systèmes de détection de fuites pour le stockage, en se concentrant sur la logistique et l'efficacité énergétique.

4. Conclusion et perspectives

Le stockage et le transport des gaz industriels, abordés dans les sections 4.2 et 4.3, sont cruciaux pour répondre aux besoins industriels et médicaux tout en garantissant sécurité et durabilité [3]^{*}. Le choix des méthodes, qu'il s'agisse de bouteilles, de réservoirs cryogéniques, de camions-citernes ou de canalisations, dépend des volumes requis, des coûts et des applications, comme l'inertage chimique^{*} ou le coupage à la flamme [4]^{*}. Le respect des normes de sécurité^{*}, telles que l'ADR pour le transport et l'ATEX pour le stockage, est essentiel pour minimiser les risques de fuites ou d'explosions [3]^{*}.

L'impact environnemental reste un défi majeur. Le transport routier génère des émissions de CO₂ (environ 0,8 kg/litre de diesel), tandis que les réservoirs cryogéniques consomment une énergie importante pour maintenir des températures basses [5]^{*}. Les rejets accidentels de gaz à effet de serre, comme le méthane, aggravent

l'empreinte carbone [5]*. À l'avenir, les systèmes de surveillance intelligente basés sur l'Internet des objets (IoT) amélioreront la détection des fuites, et les matériaux composites réduiront les coûts d'entretien des canalisations [4]*. Les camions à hydrogène, réduisant les émissions de 80 %, et l'optimisation des itinéraires par intelligence artificielle renforceront la durabilité [5]*. Ces avancées, alliées à des normes rigoureuses, permettront une gestion plus efficace et responsable des gaz industriels.

5. Activité d'auto-évaluation

Exercice : Exercice 1

Quelle méthode est utilisée pour le stockage des gaz industriels à haute pression selon le chapitre ?

- ☐ a) Bouteilles sous pression (200-300 bars)
- ☐ b) Réservoirs à température ambiante sans isolation
- ☐ c) Camions-citernes à basse pression
- ☐ d) Canalisations en acier non revêtu

Exercice : Exercice 2

À quelle catégorie de dangerosité appartient l'oxygène selon le chapitre ?

- ☐ Toxique
- ☐ Inflammable
- ☐ Comburant
- ☐ Inerte

Exercice : Exercice 3

Quelle norme régit le transport routier des gaz industriels selon le chapitre ?

- ☐ a) ISO 14001
- ☐ b) ATEX
- ☐ c) ADR
- ☐ d) EN 15001

Exercice : Exercice 4

Quel est l'impact environnemental principal du stockage des gaz industriels dans des réservoirs cryogéniques ?

- ☐ a) Consommation énergétique élevée pour le refroidissement
- ☐ b) Émissions de CO₂ par litre de diesel

- ☐ c) Pollution sonore des installations
- ☐ d) Rejets d'eau contaminée

Exercice : Exercice 5

Pour stocker de l'azote liquide utilisé en cryogénie médicale, quelle méthode est la plus adaptée selon le chapitre ?

- ☐ a) Bouteilles sous pression
- ☐ b) Réservoirs cryogéniques
- ☐ c) Camions-citernes
- ☐ d) Canalisations

Exercice : Exercice 6

Quel gaz industriel est principalement utilisé pour l'inertage chimique selon le chapitre ?

- ☐ a) Oxygène
- ☐ b) Argon
- ☐ c) Azote
- ☐ d) Hydrogène

Exercice : Exercice 7

Quelle est la principale différence entre le transport routier et le transport par canalisation en termes de flexibilité ?

- ☐ a) Le transport routier est moins flexible
- ☐ b) Le transport par canalisation est plus flexible
- ☐ c) Le transport routier est plus flexible
- ☐ d) Les deux ont la même flexibilité

Exercice : Exercice 8

Quel est le principal risque du stockage de l'oxygène liquide dans des réservoirs cryogéniques ?

- ☐ a) Pollution sonore
- ☐ b) Enrichissement de l'atmosphère en oxygène, augmentant le risque d'incendie
- ☐ c) Corrosion des réservoirs

- ☐ d) Émissions de gaz à effet de serre

Exercice : Exercice 9

Quelle mesure est imposée par les normes ATEX pour le stockage des gaz inflammables ?

- ☐ a) Utilisation de camions à hydrogène
- ☐ b) Ventilation mécanique pour les locaux intérieurs
- ☐ c) Stockage à haute pression sans isolation
- ☐ d) Absence de séparation des bouteilles

Exercice : Exercice 10

Quelle innovation améliore la sécurité du transport des gaz industriels selon le chapitre ?

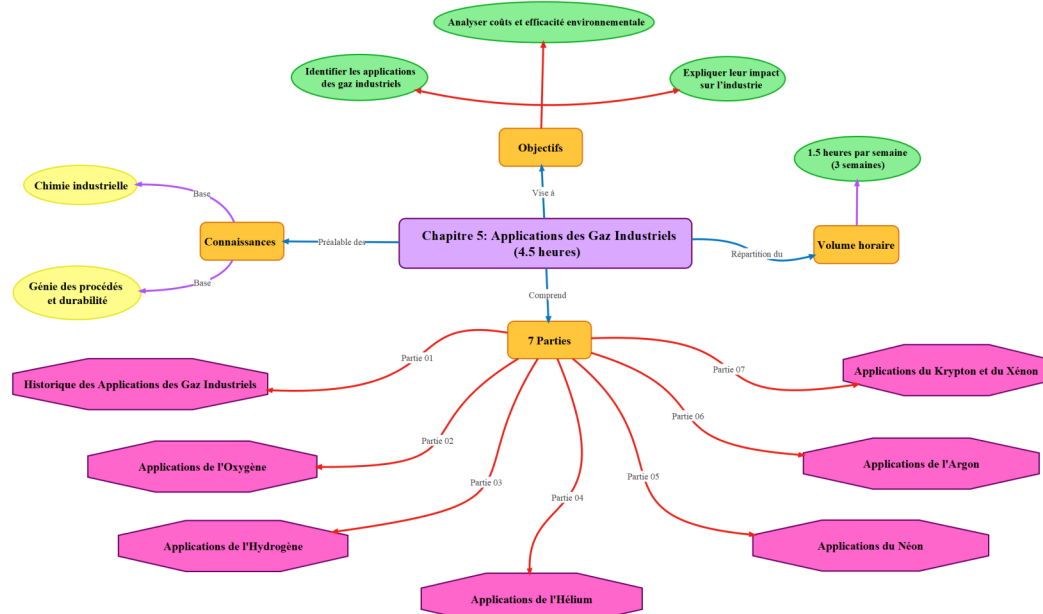
- ☐ a) Capteurs IoT pour la détection des fuites
- ☐ b) Bouteilles sans revêtement de protection
- ☐ c) Réservoirs cryogéniques non isolés
- ☐ d) Canalisations à basse pression

Chapitre 5: Applications des Gaz Industriels

VI

Dans ce chapitre, nous explorerons les **applications fondamentales** des **gaz industriels**, en mettant un accent particulier sur leurs rôles uniques dans les domaines **médical**, **industriel** et **technologique**. Ces caractéristiques, qui distinguent leur utilisation des autres procédés industriels, sont la base de leur impact sur la **révolution industrielle** et les **avancées technologiques modernes**. Les **propriétés** des gaz, telles que leur **inertie chimique**, leur **densité**, leur **spectre d'émission** et leurs **points d'ébullition**, seront étudiées en détail.

Nous aborderons les principes des **applications** des **gaz industriels** (**oxygène**, **hydrogène**, **hélium**, **néon**, **argon**, **krypton**, **xénon**), allant de la **sidérurgie** et de la **thérapie médicale** à l'**éclairage** et aux **lasers**. Ces études incluent l'identification des principales **applications industrielles** et **médicales**, la compréhension des **procédés clés** (comme Haber-Bosch ou TIG), l'analyse des **défis environnementaux** et de **rareté**, comme les émissions de CO₂ et la disponibilité de l'hélium, et l'évaluation des **innovations technologiques** dans le contexte des enjeux **économiques** et **durables**.



Carte mentale du chapitre 5

1. Historique des Applications des Gaz Industriels

Les gaz industriels, tels que l'oxygène, l'hydrogène et les gaz nobles (hélium, néon, argon, krypton, xénon), ont transformé les domaines de l'industrie, de la médecine et de la technologie depuis le 18e siècle. Leur intégration dans des applications pratiques a marqué des étapes décisives dans le développement industriel et scientifique, en particulier durant la révolution industrielle et au-delà. Ce chapitre explore l'évolution des utilisations des gaz industriels, met en lumière les applications clés qui ont émergé à la suite de leur disponibilité et évalue leur impact sur la révolution industrielle et les avancées technologiques modernes.

L'utilisation des gaz industriels a débuté avec l'oxygène, qui, dès la fin du 18e siècle, a été reconnu pour son rôle dans la combustion. Au 19e siècle, l'oxygène a trouvé une application majeure dans la sidérurgie grâce au procédé Bessemer, introduit dans les années 1850, qui utilisait des jets d'oxygène pour éliminer les impuretés du fer, permettant ainsi une production d'acier à grande échelle et à moindre coût [2]*. Cette avancée a été cruciale pour la construction d'infrastructures comme les chemins de fer et les ponts, piliers de la révolution industrielle [2]*. Parallèlement, l'hydrogène a émergé comme un gaz clé au début du 20e siècle avec le développement du procédé Haber-Bosch*, qui, dès 1910, a permis la production industrielle d'ammoniac pour les engrais, soutenant l'expansion agricole mondiale [1]*. Ce procédé a non seulement transformé l'agriculture, mais a également ouvert la voie à l'utilisation de l'hydrogène dans d'autres applications chimiques, comme la synthèse de composés organiques [3]*.

Au 20e siècle, les gaz nobles, initialement perçus comme inertes, ont révélé un potentiel industriel significatif. L'hélium, disponible en quantités commerciales après les années 1920, a été utilisé dans des applications scientifiques, notamment pour le refroidissement cryogénique dans les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) [4]*. De plus, il a trouvé des usages industriels, comme dans les ballons dirigeables et la plongée en eaux profondes grâce à son inertie et sa faible densité [5]*. Le néon, quant à lui, a révolutionné l'industrie de l'éclairage dès les années 1910 avec le développement des enseignes lumineuses, qui ont transformé la publicité urbaine [5]*. L'argon a été intégré dans les procédés de soudage à l'arc dès les années 1930, où il servait de gaz protecteur pour prévenir l'oxydation des métaux [4]*. Les gaz comme le krypton et le xénon, bien que moins courants, ont trouvé des applications dans l'éclairage à haute efficacité et les technologies médicales, notamment dans les lampes à décharge utilisées en imagerie [5]*.

L'impact des gaz industriels sur la révolution industrielle et les avancées technologiques est indéniable. L'oxygène a permis d'accélérer la production industrielle, réduisant les coûts et augmentant l'efficacité des processus métallurgiques [2]*. L'hydrogène, grâce au procédé Haber-Bosch, a soutenu la sécurité alimentaire mondiale en répondant à la demande croissante en engrais [1]*. Les gaz nobles, en particulier l'hélium et le néon, ont ouvert de nouveaux horizons dans les domaines scientifiques et esthétiques, de l'imagerie médicale à l'éclairage moderne [5]*. Ces applications ont non seulement répondu aux besoins industriels immédiats, mais ont également stimulé l'innovation technologique, posant les bases de nombreuses industries modernes, telles que l'électronique et la médecine de pointe.

Le **Tableau 5.1** ci-dessous résume les étapes clés dans le développement des applications des gaz industriels, mettant en évidence les avancées technologiques majeures et leur contexte historique.

Année	Gaz	Application Clé	Contexte/Impact
1850	Oxygène	Procédé Bessemer pour la production d'acier	Révolution industrielle, sidérurgie
1910	Hydrogène	Procédé Haber-Bosch pour la production d'ammoniac	Agriculture, engrais chimiques
1910	Néon	Développement des enseignes lumineuses	Publicité, éclairage urbain
1920	Hélium	Utilisation dans les ballons et la cryogénie	Aéronautique, IRM
1930	Argon	Soudage à l'arc avec gaz protecteur	Industrie manufacturière

Tableau 5.1 : Chronologie des applications majeures des gaz industriels

2. Applications de l'Oxygène

L'oxygène, en tant que gaz industriel fondamental, joue un rôle essentiel dans les secteurs médical et industriel. Depuis sa reconnaissance comme élément clé pour la combustion et la respiration, ses applications se sont diversifiées pour répondre aux besoins critiques des soins de santé et des processus industriels modernes. Ce chapitre examine les utilisations médicales de l'oxygène, notamment dans la thérapie à l'oxygène* et la respiration artificielle, ainsi que son rôle dans l'industrie, en particulier dans la fabrication de l'acier et le soudage. Une comparaison des applications médicales et industrielles est présentée pour souligner leurs spécificités et leur importance.

Dans le domaine médical, l'oxygène est indispensable pour la thérapie à l'oxygène, utilisée pour traiter les patients souffrant d'hypoxie* ou de maladies respiratoires telles que la pneumonie, la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO), les insuffisances respiratoires aiguës ou, plus récemment, les infections graves comme la COVID-19 [6]**. Cette thérapie consiste à administrer de l'oxygène pur ou enrichi via des masques ou des canules nasales pour augmenter la saturation en oxygène dans le sang, améliorant ainsi la fonction respiratoire. L'oxygène est également crucial dans la respiration artificielle, où il est intégré dans les ventilateurs mécaniques pour soutenir les patients en soins intensifs ou sous anesthésie générale [4]*. Ces applications médicales exigent un oxygène de haute pureté, généralement supérieur à 99 %, et sont soumises à des normes rigoureuses de sécurité et de qualité pour garantir l'efficacité et la protection des patients [4]*.

Dans le secteur industriel, l'oxygène est un pilier des procédés de fabrication, notamment dans la sidérurgie. Depuis les années 1850, le procédé Bessemer a utilisé l'oxygène pour éliminer les impuretés du fer en fusion, permettant une production d'acier à grande échelle et à moindre coût [2]^{*}. Ce procédé a été perfectionné avec le convertisseur à oxygène de base (BOF, Basic Oxygen Furnace), où des jets d'oxygène pur oxydent le carbone et autres impuretés, réduisant le temps et les coûts de production [2]^{*}. Par ailleurs, l'oxygène est largement employé dans le soudage et le coupage des métaux. Dans le soudage oxyacétylénique, il est combiné avec l'acétylène pour générer des flammes à haute température, permettant de fondre et de joindre les métaux avec précision [4]^{*}. Ces applications industrielles consomment des volumes élevés d'oxygène, souvent fourni sous forme liquide pour faciliter le transport et le stockage [3]^{*}.

La **Figure 5.1** présenterait un diagramme schématique illustrant les flux d'utilisation de l'oxygène dans les industries. Ce diagramme montrerait le processus de production de l'oxygène par distillation fractionnée de l'air liquide, suivi de sa distribution vers des applications clés telles que la sidérurgie (convertisseurs BOF), le soudage (chalumeaux oxyacétyléniques) et d'autres secteurs comme la chimie et le traitement des eaux [3]*. Il mettrait en évidence les volumes élevés utilisés dans l'industrie par rapport aux quantités plus limitées mais critiques dans le domaine médical.

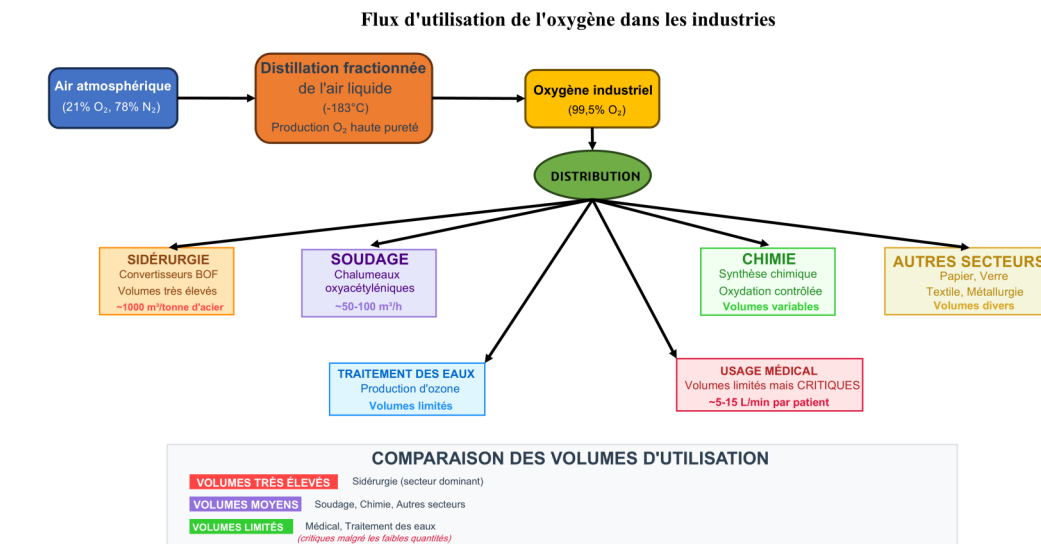


Figure 5.1 : Diagramme illustrant les flux d'utilisation de l'oxygène dans les industries

Le **Tableau 5.2** ci-dessous compare les applications médicales et industrielles de l'oxygène, en mettant en lumière leurs objectifs, exigences techniques et impacts

Critère	Applications Médicales	Applications Industrielles
Objectif	Soutenir la respiration et traiter l'hypoxie	Améliorer la combustion et la transformation des métaux
Pureté Requise	≥ 99 % (qualité médicale stricte)	90–99 % (selon le procédé)
Mode de Livraison	Masques, canules, ventilateurs	Jets à haute pression, réservoirs liquides
Volume Utilisé	Faible, précis (litres par minute)	Élevé (tonnes par jour dans la sidérurgie)
Impact	Sauver des vies, améliorer la santé	Augmentation de l'efficacité et réduction des coûts industriels

Tableau 5.2 : Comparaison des applications médicales et industrielles de l'oxygène

3. Applications de l'Hydrogène

L'hydrogène, en tant que gaz industriel polyvalent, occupe une place centrale dans les domaines de l'énergie et de la chimie, grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques, telles que sa haute densité énergétique et sa capacité à former des liaisons covalentes stables [5]*. Reconnu comme un vecteur énergétique prometteur depuis le début du 20e siècle, l'hydrogène a vu ses applications s'élargir, particulièrement dans le contexte de la transition énergétique vers des sources durables. Ce chapitre explore les utilisations de l'hydrogène dans le

secteur énergétique, notamment dans les piles à combustible pour une production d'énergie propre, ainsi que son rôle dans l'industrie chimique, en particulier pour la synthèse de l'ammoniac et d'autres composés chimiques. Une comparaison des coûts et des impacts environnementaux des piles à combustible est présentée pour évaluer leur viabilité à l'horizon 2025.

Dans le secteur énergétique, l'hydrogène est principalement employé dans les piles à combustible (PAC), des dispositifs électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité via une réaction d'oxydo-réduction avec l'oxygène, produisant de l'eau et de la chaleur comme uniques sous-produits [2]^{*}. Cette technologie offre une alternative propre aux combustibles fossiles, avec un rendement énergétique pouvant atteindre 60 % dans les PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC), largement utilisées dans les véhicules à hydrogène [4]^{*}. L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables, minimise les émissions de CO₂, rendant les PAC particulièrement adaptées pour la mobilité durable et la production d'électricité stationnaire [3]^{*}. Par exemple, dans les véhicules à pile à combustible (VPC), l'hydrogène permet une autonomie supérieure à 500 km avec un temps de recharge rapide, tout en évitant les émissions locales polluantes [1]^{*}.

Dans l'industrie chimique, l'hydrogène est un réactif essentiel pour la production d'ammoniac via le procédé Haber-Bosch, une réaction catalytique exothermique sous haute pression (200–300 bar) et température (400–500 °C) qui synthétise l'NH₃ à partir de N₂ et H₂, représentant environ 50 % de la consommation mondiale d'hydrogène [5]^{*}. Ce procédé, développé au début du 20^e siècle, est fondamental pour la fabrication d'engrais azotés, soutenant l'agriculture intensive et la sécurité alimentaire globale [1]^{*}. Au-delà de l'ammoniac, l'hydrogène intervient dans la synthèse d'autres composés chimiques, tels que le méthanol (via la réaction $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$) et les hydrocarbures par hydrogénation, facilitant des processus comme l'hydrocraquage dans le raffinage pétrolier [2]^{*}. La purification de l'hydrogène, souvent obtenue par reformage du méthane suivi d'une séparation par adsorption à pression modulée (PSA), est cruciale pour atteindre une pureté supérieure à 99,99 % requise dans ces applications [3]^{*}.

La **Figure 5.2** présenterait un diagramme schématique des applications énergétiques de l'hydrogène. Ce diagramme illustrerait les flux principaux de l'hydrogène depuis sa production (électrolyse, reformage) vers ses utilisations dans les piles à combustible, en distinguant les secteurs de la mobilité (véhicules VPC), de la production stationnaire (centrales électriques) et du stockage d'énergie (power-to-gas), avec une emphase sur les rendements et les émissions associées [2]^{*}. Il mettrait en évidence le cycle fermé de l'hydrogène, soulignant son rôle dans la décarbonation du système énergétique.

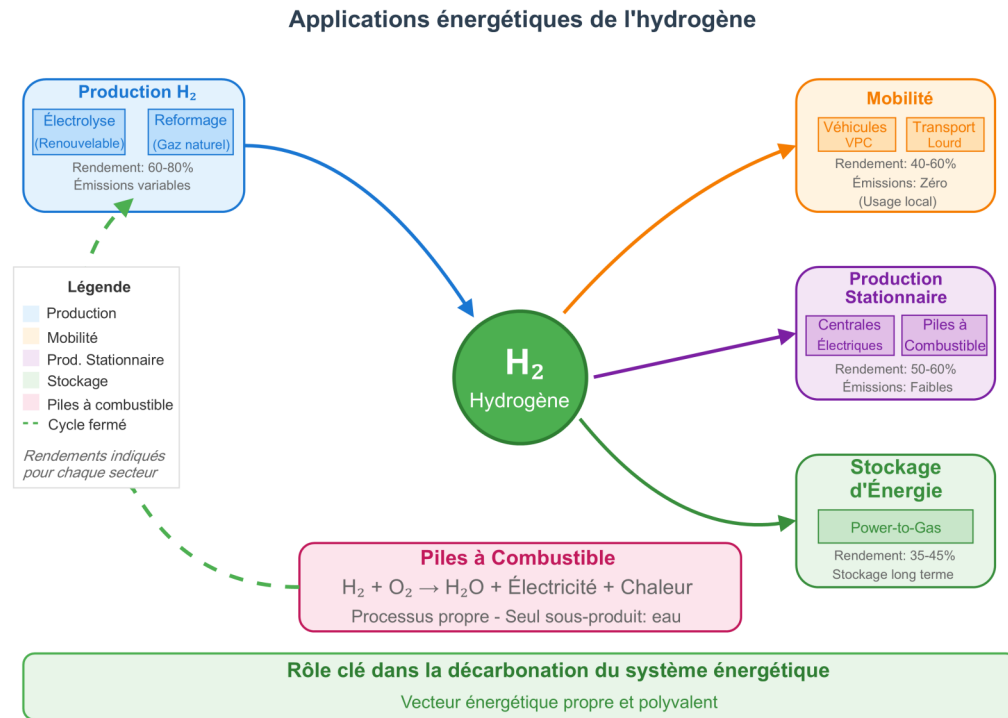


Figure 5.2 : Diagramme schématisant des applications énergétiques de l'hydrogène

Le **Tableau 5.3** ci-dessous compare les coûts et les impacts environnementaux des piles à combustible à hydrogène, en se basant sur des projections pour 2025, par rapport aux technologies alternatives comme les batteries lithium-ion et les moteurs à combustion interne.

Critère	Piles à Combustible à Hydrogène (PEMFC)	Batteries Lithium-Ion (BEV)	Moteurs à Combustion Interne (ICE)
Coût du Système (€/kW, 2025)	53–40	100–50	30–20
Coût du Carburant (€/kg ou €/kWh)	2–7 (H ₂ vert)	0.10–0.15 (électricité)	1.5–2 (essence/diesel)
Émissions de CO₂ (g CO₂ eq/kWh)	0–50 (H ₂ vert)	50–200 (selon source électricité)	300–200
Impact Environnemental (Cycle de Vie)	Faible (eau comme sous-produit, recyclage Pt)	Moyen (extraction Li, Co)	Élevé (émissions NOx, particules)
Rendement Énergétique (%)	60–50	95–85	30–20

Tableau 5.3 : Comparaison des coûts et impacts environnementaux des piles à combustible

4. Applications de l'Hélium

L'hélium, second élément le plus abondant dans l'univers mais rare sur Terre, est un gaz noble caractérisé par son inertie chimique, sa faible densité (0,1785 g/L à 0 °C et 1 atm) et sa capacité à rester gazeux à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu (-268,9 °C) [5]^{*}. Ces propriétés en font un gaz industriel incontournable dans les domaines scientifiques et industriels. Ce chapitre explore l'utilisation de l'hélium dans les applications scientifiques, notamment pour le refroidissement des appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) et les applications cryogéniques, ainsi que dans les applications industrielles, telles que les ballons et la plongée sous-marine. Une analyse de la rareté et des coûts d'approvisionnement de l'hélium est présentée pour évaluer les défis liés à son utilisation.

Dans le domaine scientifique, l'hélium liquide est essentiel pour les applications cryogéniques en raison de son point d'ébullition exceptionnellement bas (4,2 K à la pression atmosphérique) [5]*. Il est largement utilisé pour refroidir les aimants supraconducteurs dans les appareils IRM, permettant de maintenir des champs magnétiques puissants et stables nécessaires à l'imagerie médicale de haute précision [4]*. Un scanner IRM typique nécessite environ 1 500 à 2 000 litres d'hélium liquide pour maintenir les bobines supraconductrices à des températures inférieures à 10 K, garantissant un fonctionnement sans résistance électrique [5]*. L'hélium est également crucial dans d'autres applications cryogéniques, telles que le refroidissement des détecteurs infrarouges dans les télescopes spatiaux (comme le télescope James Webb) et des équipements de recherche en physique des particules, notamment les accélérateurs de particules au CERN [4]*. Ces applications exigent un hélium de très haute pureté (>99,999 %) pour éviter toute contamination susceptible de compromettre les performances des équipements [3]*.

Dans le secteur industriel, l'hélium est principalement connu pour son utilisation dans les ballons et la plongée sous-marine. Grâce à sa faible densité, l'hélium est utilisé pour remplir les ballons météorologiques et les dirigeables, permettant des levées sans risque d'inflammation, contrairement à l'hydrogène, qui était historiquement utilisé mais abandonné en raison de sa réactivité [2]*. Cette application, développée dès le début du 20e siècle, reste essentielle pour la collecte de données atmosphériques et les vols scientifiques [1]*. Dans la plongée sous-marine, l'hélium est mélangé à l'oxygène pour former l'« héliox », un mélange contenant typiquement 20–30 % d'hélium, utilisé pour réduire la narcose à l'azote* lors de plongées profondes au-delà de 30 mètres [4]*. Ce mélange améliore la sécurité des plongeurs en minimisant les risques liés à la toxicité de l'oxygène et à l'absorption excessive d'azote, permettant des plongées prolongées dans des conditions extrêmes [4]*. Ces applications industrielles nécessitent un hélium de pureté modérée (>99 %) et sont souvent fournies sous forme gazeuse pour les ballons ou comprimée pour la plongée [3]*.

La **Figure 5.3** présenterait un diagramme schématisant les applications scientifiques et industrielles de l'hélium. Ce diagramme illustrerait les flux d'utilisation de l'hélium depuis sa production, principalement par séparation cryogénique à partir du gaz naturel, vers ses applications clés : refroidissement des IRM et équipements cryogéniques dans le domaine scientifique, et remplissage des ballons et mélanges de plongée dans le domaine industriel. Il mettrait en évidence les exigences de pureté et les volumes nécessaires pour chaque application, soulignant le rôle stratégique de l'hélium dans les technologies avancées [3]*.

Applications scientifiques et industrielles de l'hélium

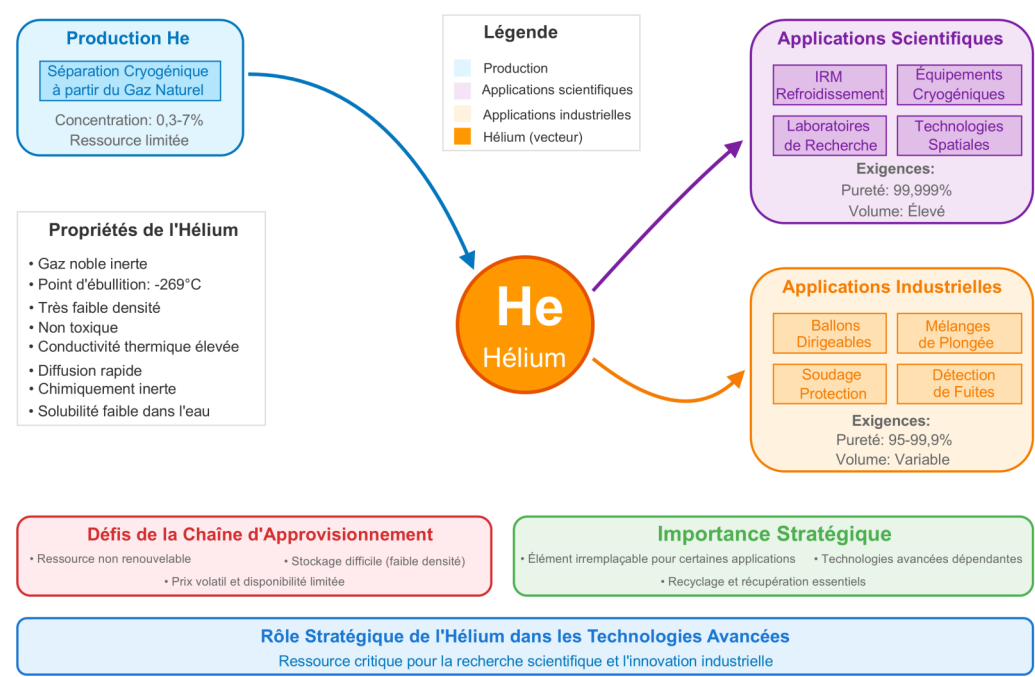


Figure 5.3 : Diagramme des applications scientifiques et industrielles de l'hélium

La rareté de l'hélium, extrait principalement comme sous-produit du gaz naturel dans des gisements spécifiques (notamment aux États-Unis, au Qatar et en Algérie), pose des défis majeurs pour son approvisionnement [3]*. Le **Tableau 5.4** ci-dessous analyse la rareté et les coûts d'approvisionnement de l'hélium, en tenant compte des sources, des prix et des contraintes logistiques.

Critère	Description	Valeur/Impact
Sources Principales	Gisements de gaz naturel (États-Unis, Qatar, Algérie)	Approvisionnement limité à quelques régions, dépendance géopolitique
Production Annuelle	Environ 175 millions de m³ (2020)	Demande croissante excède souvent l'offre, causant des pénuries périodiques
Coût Moyen (€/m³, 2025)	20–30 (hélium gazeux); 100–150 (hélium liquide)	Coûts élevés pour le liquide en raison des besoins cryogéniques
Pureté Requise	>99,999 % pour applications scientifiques; >99 % pour ballons/plongée	Purification coûteuse, surtout pour applications cryogéniques
Impact de la Rareté	Risque de pénurie affectant la recherche et l'industrie médicale	Nécessité de stratégies de recyclage et de nouvelles sources

Tableau 5.4 : Analyse de la rareté et des coûts d'approvisionnement de l'hélium

5. Applications du Néon

Le néon, gaz noble découvert en 1898 par William Ramsay et Morris Travers, est caractérisé par son inertie chimique, sa faible conductivité thermique et son spectre d'émission visible distinct, dominé par des lignes rouges et oranges à des longueurs d'onde de 585 nm et 614 nm [5]*. Ces propriétés en font un gaz industriel emblématique dans les domaines de l'éclairage et de la technologie. Ce chapitre explore les utilisations du néon dans l'éclairage, notamment pour les enseignes lumineuses, ainsi que ses applications technologiques dans les lasers à gaz. Une comparaison des coûts et de l'efficacité des enseignes au néon est présentée pour évaluer leur compétitivité face aux technologies alternatives.

Dans le domaine de l'éclairage, le néon est principalement utilisé dans les enseignes lumineuses, où il est excité par une décharge électrique dans des tubes de verre remplis à basse pression (environ 10–20 Torr), produisant une lueur rouge-orangée caractéristique due à la transition électronique des atomes de néon excités [5]^{*}. Cette technologie, développée dès les années 1910 par Georges Claude, repose sur le principe de la décharge lumineuse^{*}, où un courant électrique (typiquement 10–30 mA à 5–15 kV) ionise le gaz, générant des photons dans le spectre visible [4]^{*}. Les enseignes au néon offrent une luminosité élevée (jusqu'à 1 000 cd/m²) et une durée de vie prolongée (20 000–50 000 heures), ce qui les rend idéales pour la signalisation urbaine et publicitaire, malgré une consommation énergétique relativement élevée (15–30 W par mètre de tube) [2]^{*}. Le néon peut être combiné avec d'autres gaz, comme l'argon, ou des revêtements phosphorescents pour produire une gamme de couleurs, élargissant ses applications dans l'architecture et le design [1]^{*}.

Dans le domaine technologique, le néon est employé dans les lasers à gaz, particulièrement les lasers hélium-néon (He-Ne), qui fonctionnent sur le principe de l'inversion de population^{*} dans un mélange gazeux excité par décharge électrique [5]^{*}. Ces lasers émettent un faisceau cohérent à 632,8 nm (rouge visible), avec une puissance typique de 1–50 mW et une largeur de ligne spectrale étroite (<1 GHz), les rendant adaptés pour des applications en métrologie, holographie et alignement optique [4]^{*}. Le néon sert de milieu actif dans le mélange He-Ne (ratio typique 10:1 He:Ne), où l'hélium excite les niveaux énergétiques du néon via des collisions inélastiques, favorisant l'émission stimulée^{*} [5]^{*}. Ces lasers sont appréciés pour leur stabilité et leur faible bruit, bien qu'ils soient progressivement remplacés par des lasers à semi-conducteurs dans certaines applications en raison de leur encombrement et de leur consommation électrique [2]^{*}.

La **Figure 5.4** présenterait un diagramme schématisant des utilisations du néon dans l'éclairage. Ce diagramme illustrerait les flux d'utilisation du néon depuis sa production (par distillation fractionnée de l'air liquide) vers ses applications principales, telles que les tubes d'enseignes lumineuses et les systèmes d'éclairage décoratif, en mettant en évidence les paramètres techniques comme la pression du gaz (10–20 Torr), la tension appliquée (5–15 kV) et les longueurs d'onde d'émission (585 nm, 614 nm) [3]^{*}. Il soulignerait également les combinaisons avec d'autres gaz pour varier les couleurs, démontrant l'efficacité spectrale du néon dans les environnements urbains [3]^{*}.

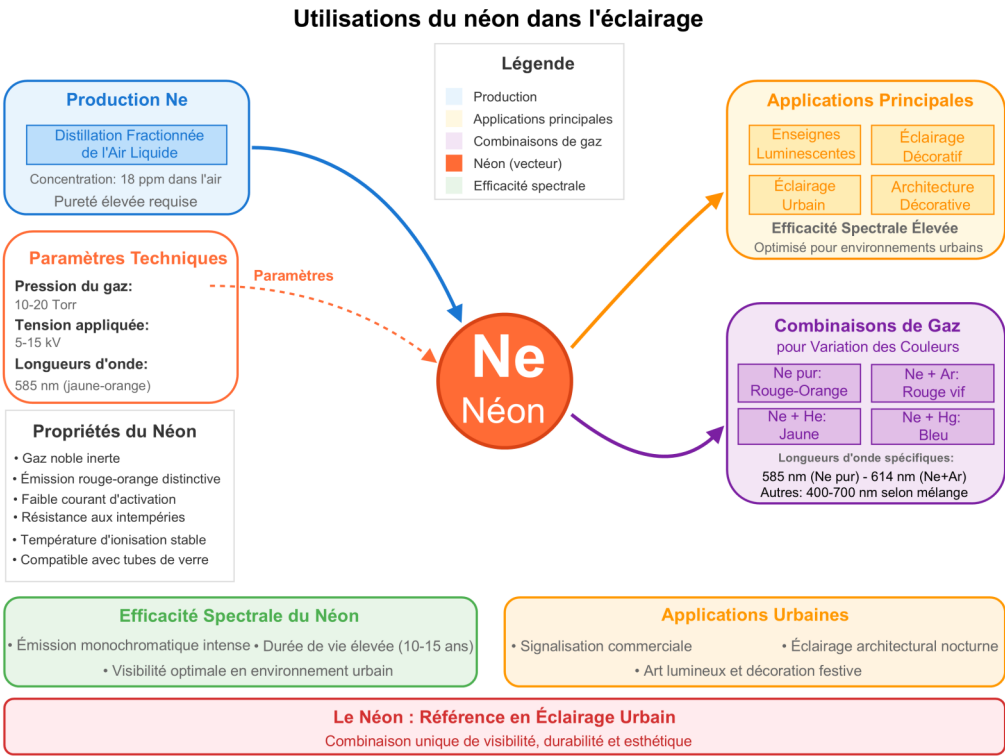


Figure 5.4 : Diagramme des utilisations du néon dans l'éclairage

Le **Tableau 5.5** ci-dessous compare les coûts et l'efficacité des enseignes au néon par rapport aux technologies alternatives comme les LED et les tubes fluorescents, en se basant sur des données typiques pour des installations de 1 mètre linéaire.

Critère	Enseignes au Néon	Enseignes LED	Tubes Fluorescents
Coût Initial (€/m)	100–50	60–30	40–20
Consommation Énergétique (W/m)	30–15	10–5	20–10
Efficacité Lumineuse (lm/W)	40–20	120–80	80–50
Durée de Vie (heures)	50000–20000	100000–50000	000 20–000 10
Impact Environnemental	Moyen (gaz inerte, recyclable)	Faible (pas de mercure)	Moyen (présence de mercure)

Tableau 5.5 : Comparaison des coûts et efficacité des enseignes au néon

6. Applications de l'Argon

L'argon, gaz noble découvert en 1894 par Lord Rayleigh et William Ramsay, est caractérisé par son inertie chimique totale, sa densité relativement élevée (1,784 g/L à 0 °C et 1 atm) et son point d'ébullition bas (-185,8 °C), ce qui en fait un gaz protecteur idéal pour de nombreuses applications industrielles [5]. Ces propriétés permettent à l'argon de déplacer l'oxygène et l'azote sans réagir, évitant ainsi l'oxydation et la contamination. Ce chapitre examine les utilisations de l'argon dans le soudage comme gaz protecteur, ainsi que dans la préservation par création d'atmosphères inertes pour les matériaux sensibles. Une analyse des avantages de l'argon dans la fabrication du verre est présentée pour illustrer son impact sur les processus industriels.

Dans le domaine du soudage, l'argon est utilisé comme gaz protecteur pour prévenir l'oxydation des métaux pendant les opérations à haute température, notamment dans les procédés TIG (Tungsten Inert Gas) et MIG (Metal Inert Gas) [4]^{*}. Dans le soudage TIG, l'argon est injecté à un débit typique de 8–15 L/min sous une pression de 1–2 bar, formant un bouclier gazeux autour de l'arc électrique (température >5 000 °C), protégeant ainsi le bain de fusion des contaminants atmosphériques comme l'oxygène et l'azote, qui pourraient causer des porosités ou des fragilités [2]^{*}. Cette application est essentielle pour le soudage de métaux réactifs tels que l'aluminium, le titane et les aciers inoxydables, où l'argon assure une pénétration uniforme et une qualité de soudure supérieure, avec un rendement thermique pouvant atteindre 70–80 % [4]^{*}. L'argon peut être mélangé avec du CO₂ ou de l'hélium pour optimiser les propriétés de l'arc, réduisant les éclaboussures et améliorant la productivité dans les environnements industriels [3]^{*}.

Dans le domaine de la préservation, l'argon est employé pour créer des atmosphères inertes protégeant les matériaux sensibles contre l'oxydation, l'humidité et les réactions chimiques [3]^{*}. Par exemple, dans l'industrie alimentaire, l'argon est utilisé pour emballer les produits sous atmosphère modifiée (MAP), remplaçant l'air par un mélange à 80–90 % d'argon pour prolonger la durée de conservation des aliments frais en inhibant la croissance bactérienne et l'oxydation lipidique [4]^{*}. Dans la métallurgie et l'électronique, l'argon sert à purger les fours et les chambres de stockage, maintenant une concentration d'oxygène inférieure à 0,1 % pour prévenir la corrosion de composants sensibles comme les semi-conducteurs ou les alliages réactifs [2]^{*}. Cette application repose sur la densité de l'argon, qui lui permet de former une couche protectrice stable, réduisant les pertes matérielles et améliorant la qualité des produits finaux [5]^{*}.

La **Figure 5.5** présenterait un diagramme schématique des applications de l'argon dans le soudage et la préservation. Ce diagramme illustrerait les flux d'utilisation de l'argon depuis sa production (par distillation fractionnée de l'air liquide) vers ses applications clés, telles que le bouclier gazeux dans les procédés TIG/MIG pour le soudage et les atmosphères inertes pour l'emballage MAP ou la purgation de fours dans la préservation, en mettant en évidence les paramètres techniques comme le débit (8–15 L/min), la pression (1–2 bar) et les niveaux d'oxygène résiduel (<0,1 %) [3]^{*}. Il soulignerait les avantages en termes de qualité et de sécurité dans les environnements industriels [3]^{*}.

Applications de l'Argon dans le Soudage et la Préservation

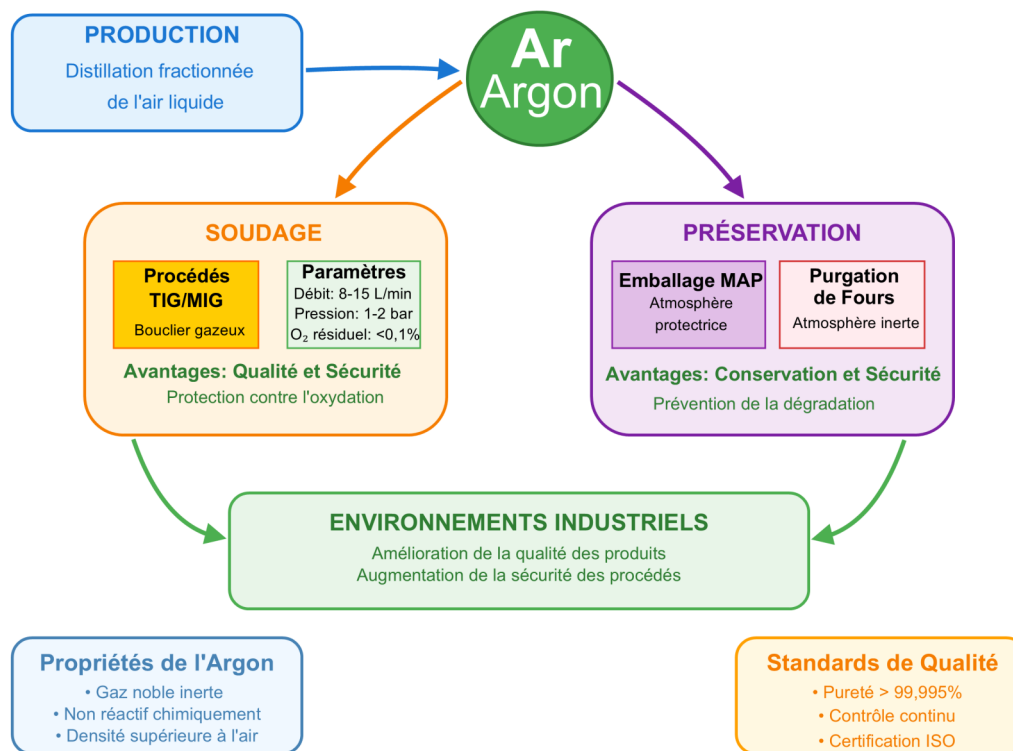


Figure 5.5 : Diagramme des applications de l'argon dans le soudage et la préservation

Le **Tableau 5.6** ci-dessous analyse les avantages de l'argon dans la fabrication du verre, où il est utilisé comme gaz protecteur pour minimiser les défauts oxydatifs lors de la fusion et du formage.

Critère	Description	Avantage Spécifique
Prévention de l'Oxydation	Utilisation comme gaz de purge dans les fours de fusion (température >1 500 °C)	Réduction des bulles et des inclusions oxydées, améliorant la transparence (>95 %)
Amélioration de la Qualité	Création d'atmosphère inerte pour le formage du verre flotté	Augmentation de la résistance mécanique (jusqu'à 20 %) et réduction des défauts de surface
Efficacité Énergétique	Débit contrôlé (10–20 L/min) pour minimiser les pertes thermiques	Diminution de la consommation d'énergie (5–10 %) par rapport à l'air
Coût et Disponibilité	Production à grande échelle par séparation cryogénique	Coût modéré (0,5–1 €/m³) avec une pureté >99,999 %, rendant l'argon économique pour l'industrie verrière
Impact Environnemental	Gaz inerte non toxique, recyclable	Réduction des émissions de NOx et de CO ₂ lors de la fusion, favorisant des processus durables

Tableau 5.6 : Analyse des avantages de l'argon dans la fabrication du verre

7. Applications du Krypton et du Xénon

Le krypton et le xénon, gaz nobles découverts en 1898 par William Ramsay et Morris Travers, sont caractérisés par leur inertie chimique, leurs points d'ébullition relativement élevés parmi les gaz nobles (krypton : -153,4 °C ; xénon : -108,1 °C) et leurs spectres d'émission riches en lignes ultraviolettes et visibles, rendant possibles des applications en éclairage et en technologie médicale [5]^{*}. Ces propriétés permettent au krypton d'améliorer

l'efficacité énergétique des lampes et au xénon de générer des décharges intenses pour des usages précis. Ce chapitre examine les utilisations du krypton dans l'éclairage à haute efficacité, ainsi que les applications médicales et technologiques du xénon dans les lampes à décharge et les appareils IRM. Une comparaison des coûts et de l'efficacité du krypton et du xénon est présentée pour évaluer leur viabilité industrielle.

Dans le domaine de l'éclairage, le krypton est utilisé dans les lampes à incandescence et fluorescentes à haute efficacité, où il remplace l'argon comme gaz de remplissage pour réduire l'évaporation du filament de tungstène et augmenter le rendement lumineux [2]^{*}. Dans une lampe halogène au krypton, le gaz est maintenu à une pression de 2–5 atm, permettant des températures de filament plus élevées (jusqu'à 3 000 K) sans oxydation, ce qui améliore l'efficacité lumineuse à 20–30 lm/W et prolonge la durée de vie à 2 000–3 000 heures [4]^{*}. Cette application est particulièrement utile pour les ampoules automobiles et les projecteurs, où le krypton minimise la diffusion thermique et optimise le spectre d'émission visible [5]^{*}. Le krypton est souvent combiné avec des halogènes pour former un cycle régénérateur, recyclant le tungstène évaporé et maintenant une transparence élevée du verre [3]^{*}.

Dans les domaines médical et technologique, le xénon est employé dans les lampes à décharge pour générer des flashes intenses de lumière blanche, simulant la lumière du soleil avec un indice de rendu des couleurs (IRC) proche de 100 et une température de couleur de 5 000–6 000 K [5]^{*}. Ces lampes, fonctionnant sur le principe d'une décharge à haute pression (10–30 atm), produisent des impulsions ultraviolettes et visibles utilisées en photographie médicale, en endoscopie et en stérilisation [4]^{*}. Dans les appareils IRM, le xénon polarisé (via spin-exchange optical pumping) sert d'agent de contraste pour l'imagerie pulmonaire, exploitant son spin nucléaire (¹²⁹Xe) pour des résolutions spatiales inférieures à 1 mm et une sensibilité aux pathologies respiratoires [4]^{*}. Le xénon est également utilisé dans les lasers excimer (XeCl à 308 nm) pour des applications en ophtalmologie, comme la correction de la vue par LASIK^{*}, où il fournit une énergie précise pour ablater la cornée sans dommages thermiques [2]^{*}.

La **Figure 5.6** présenterait un diagramme comparatif des applications du krypton et du xénon. Ce diagramme illustrerait les flux d'utilisation respectifs : pour le krypton, depuis sa production (distillation fractionnée de l'air) vers les lampes à haute efficacité et les ampoules halogènes ; pour le xénon, vers les lampes à décharge et les agents de contraste IRM, en mettant en évidence les paramètres techniques comme la pression (2–5 atm pour krypton, 10–30 atm pour xénon), les températures d'opération et les longueurs d'onde d'émission (UV-visible pour xénon) [3]^{*}. Il soulignerait les différences en termes d'efficacité énergétique et de coût, démontrant leur complémentarité dans les technologies modernes [3]^{*}.

Applications comparatives du krypton et du xénon

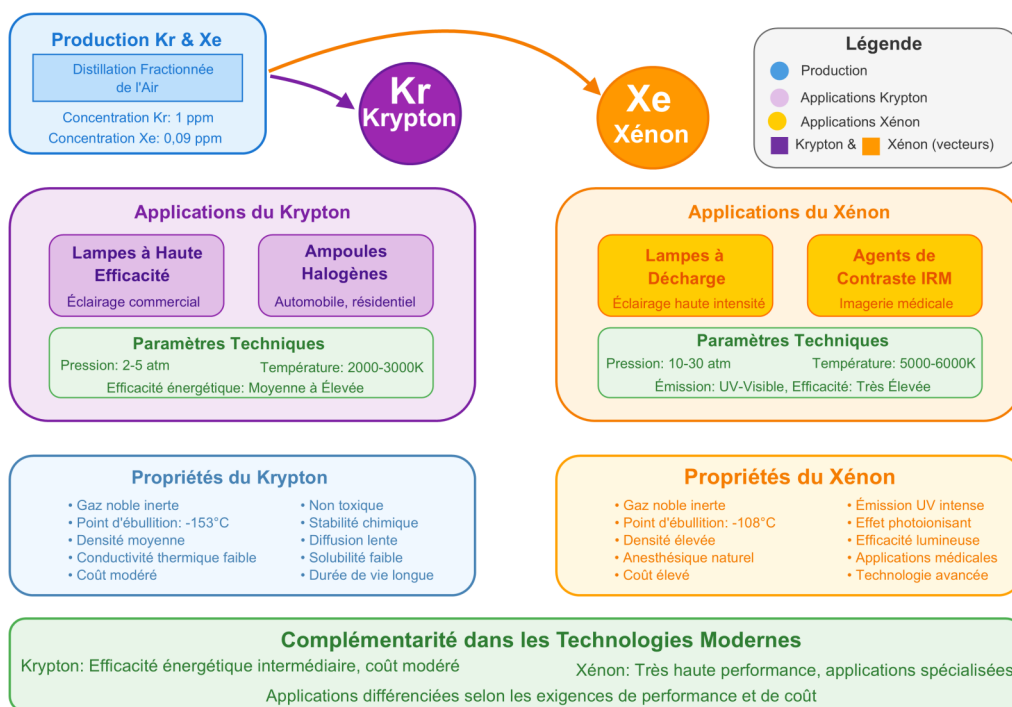


Figure 5.6 : Diagramme comparatif des applications du krypton et du xénon

Le **Tableau 5.7** ci-dessous compare les coûts et l'efficacité du krypton et du xénon, en se basant sur des données typiques pour des applications en éclairage et technologie.

Critère	Krypton	Xénon
Coût Moyen (€/m³)	300–200	2000–1000
Efficacité Lumineuse (lm/W)	20–30 (lampes halogènes)	30–50 (lampes à décharge)
Durée de Vie (heures)	3000 – 2000	500–1 000 (flashes)
Pureté Requise (%)	99,99<	99,999<
Impact Environnemental	Faible (inertie, recyclable)	Faible (non toxique, mais rare)

Tableau 5.7 : Comparaison des coûts et efficacité du krypton et du xénon

8. Activité d'auto-évaluation

Exercice : Exercice 1

Quelle est la principale application médicale de l'oxygène décrite dans le chapitre ?

- ☐ a) Traitement des infections cutanées.
- ☐ b) Thérapie pour l'hypoxie et les maladies respiratoires comme la BPCO.
- ☐ c) Utilisation dans les lasers chirurgicaux.

- d) Production d'ammoniac.

Exercice : Exercice 2

Quelle propriété de l'hélium le rend essentiel pour les applications cryogéniques comme les IRM ?

- ☐ a) Sa haute densité.
- ☐ b) Son point d'ébullition bas (4,2 K).
- ☐ c) Sa réactivité chimique.
- ☐ d) Son spectre d'émission rouge.

Exercice : Exercice 3

Quelle est la longueur d'onde principale d'émission des lasers hélium-néon (He-Ne) ?

- ☐ a) 585 nm.
- ☐ b) 632,8 nm.
- ☐ c) 308 nm.
- ☐ d) 614 nm.

Exercice : Exercice 4

Dans quel procédé l'argon est-il utilisé comme gaz protecteur pour le soudage des métaux réactifs comme l'aluminium ?

- ☐ a) Procédé Haber-Bosch.
- ☐ b) Procédé TIG (Tungsten Inert Gas).
- ☐ c) Procédé LASIK.
- ☐ d) Procédé PEMFC.

Exercice : Exercice 5

Quel est le procédé clé utilisant l'hydrogène pour la production d'ammoniac ?

- ☐ a) Procédé Bessemer.
- ☐ b) Procédé Haber-Bosch.
- ☐ c) Procédé TIG.
- ☐ d) Procédé MAP.

Exercice : Exercice 6

Quelles sont les applications principales du xénon décrites dans le chapitre ? (Sélectionnez toutes les réponses correctes)

- ☐ a) Gaz protecteur dans le soudage.
- ☐ b) Agent de contraste polarisé pour l'imagerie pulmonaire en IRM.
- ☐ c) Lampes à décharge pour flashes intenses en photographie médicale.
- ☐ d) Refroidissement cryogénique des accélérateurs de particules.

Exercice : Exercice 7

Quelles propriétés rendent l'argon adapté comme gaz protecteur dans la préservation des matériaux sensibles ? (Sélectionnez toutes les réponses correctes)

- ☐ a) Inertie chimique totale.
- ☐ b) Densité élevée (1,784 g/L).
- ☐ c) Capacité à former des liaisons covalentes.
- ☐ d) Point d'ébullition bas (-185,8 °C).

Exercice : Exercice 8

Quelles sont les utilisations du krypton dans l'éclairage ? (Sélectionnez toutes les réponses correctes)

- ☐ a) Remplissage des lampes à incandescence pour réduire l'évaporation du filament.
- ☐ b) Création de flashes UV pour stérilisation.
- ☐ c) Amélioration du rendement lumineux à 20–30 lm/W.
- ☐ d) Mélange avec halogènes pour cycle régénérateur.

Exercice : Exercice 9

Quelles sont les caractéristiques des lasers à gaz utilisant le néon ? (Sélectionnez toutes les réponses correctes)

- ☐ a) Émission à 632,8 nm (rouge visible).
- ☐ b) Puissance typique de 1–50 mW.
- ☐ c) Largeur de ligne spectrale >10 GHz.
- ☐ d) Milieu actif dans un mélange He-Ne (ratio 10:1).

Exercice : Exercice 10

Quels sont les impacts environnementaux des applications des gaz nobles comme l'hélium et le néon ?
(Sélectionnez toutes les réponses correctes)

- ☐ a) Faible impact en raison de leur inertie et recyclabilité.
- ☐ b) Émissions élevées de CO2 lors de la production.
- ☐ c) Utilisation dans des technologies durables comme les IRM et les enseignes.
- ☐ d) Risque de pénurie affectant la recherche médicale.

Glossaire

Adsorbant

Matériau solide (comme un tamis moléculaire ou le charbon actif) utilisé pour capturer et retenir sélectivement des composants spécifiques d'un mélange gazeux sur sa surface.

Atmosphère inerte

Environnement gazeux créé par des gaz nobles comme l'argon pour protéger les matériaux sensibles contre l'oxydation, l'humidité ou les réactions chimiques, utilisé en préservation et en métallurgie.

Camions à hydrogène

Véhicules de transport utilisant l'hydrogène comme carburant, réduisant les émissions de CO₂ de 80 %.

Chromatographie en Phase Gazeuse

Technique analytique utilisant des gaz inertes comme l'argon ou l'hélium comme gaz porteur.

Compresseur

Dispositif augmentant la pression d'un gaz, essentiel dans les cycles de liquéfaction.

Couche de Valence

Couche externe d'électrons d'un atome, déterminant sa réactivité chimique.

Coupage à la flamme

Procédé utilisant l'oxygène pour couper des métaux, nécessitant un stockage ou un transport sécurisé.

Cryogénie

Domaine étudiant les phénomènes à très basses températures, notamment pour la liquéfaction des gaz.

Cycle Cascade

Système de liquéfaction utilisant plusieurs cycles en série, où l'évaporateur d'un cycle sert de condenseur pour le suivant.

Cycle de Claude

Cycle de liquéfaction combinant une détente isenthalpique et isentropique, intégrant une turbine pour extraire l'énergie.

Cycle de Kapitsa

Version modifiée du cycle de Claude, utilisant un régénérateur et un moteur d'expansion rotatif.

Cycle de Linde

Cycle de liquéfaction basé sur la détente isenthalpique (Joule-Thomson), utilisé pour la séparation de l'air.

Cycle de liquéfaction

Procédé utilisant des cycles frigorifiques pour liquéfier un gaz, comme les cycles de Linde, Claude, Kapitsa ou Cascade.

Décharge lumineuse

Processus où un courant électrique ionise un gaz (comme le néon) dans un tube à basse pression, produisant de la lumière visible par émission de photons.

Détendeur

Dispositif réduisant la pression de l'air pour le refroidir lors de la séparation cryogénique.

Détente isenthalpique

Processus de réduction de pression sans transfert de chaleur, utilisé dans le cycle de Linde.

Détente isentropique

Processus de réduction de pression sans changement d'entropie, souvent réalisé dans une turbine.

Distillation cryogénique

Technique de séparation par liquéfaction de l'air à basse température, exploitant les différences de points d'ébullition.

Distillation Fractionnée

Procédé de séparation des composants d'un mélange basé sur leurs points d'ébullition, utilisé pour découvrir les gaz nobles.

Émission stimulée

Phénomène laser où des photons excités induisent l'émission de photons supplémentaires, utilisé dans les lasers He-Ne avec néon comme milieu actif.

Flux croisé

Configuration d'écoulement dans un échangeur de chaleur où les fluides se déplacent perpendiculairement.

Fractionnement

Procédé de séparation des composants de l'air en utilisant des colonnes de distillation à plusieurs étages.

Gaz Inertes

Synonyme de gaz nobles, utilisé pour souligner leur faible réactivité chimique.

Gaz Nobles

Éléments du groupe 18 du tableau périodique, caractérisés par une couche de valence complète, les rendant chimiquement stables et peu réactifs.

Hydrocraquage

Procédé pétrochimique utilisant l'hydrogène pour transformer des hydrocarbures lourds, nécessitant un transport par canalisation.

Hypoxie

Manque d'oxygène dans les tissus, traité par thérapie à l'oxygène dans des maladies respiratoires comme la BPCO.

Impacts environnementaux

Effets négatifs des opérations de stockage et transport, comme les émissions de CO₂ (0,8 kg/litre de diesel) ou les rejets de gaz à effet de serre (ex. : méthane, SF₆).

Inertage chimique

Utilisation de gaz comme l'azote pour prévenir les réactions chimiques indésirables dans les procédés industriels.

Inversion de population

État où plus d'atomes sont dans un niveau énergétique excité que dans le niveau fondamental, essentiel pour l'opération des lasers.

Ionic Transport Membrane (ITM)

Technologie de membrane utilisant le transport ionique pour séparer les gaz.

Laser Hélium-Néon

Laser utilisant un mélange d'hélium et de néon pour produire une lumière cohérente, utilisé en métrologie.

Liquide cryogénique

Gaz qui a été liquéfié et est maintenu à très basse température (ex. : azote liquide à -196°C, oxygène liquide à -183°C) pour le stockage et le transport.

Machine à expansion

Appareil convertissant l'énergie thermique (ex. vapeur) en énergie mécanique, comme les turbines ou moteurs à piston.

Narcose à l'azote

Effet narcotique causé par l'azote à haute pression en plongée, réduit par l'utilisation d'hélium dans les mélanges héliox.

Normes de sécurité

Règlements comme l'ADR (transport) et l'ATEX (stockage) pour minimiser les risques d'explosion ou de fuite des gaz industriels.

Pré-purification

Étape de prétraitement de l'air comprimé pour éliminer les impuretés (CO₂, H₂O, hydrocarbures) qui gèleraient et obstrueraient les équipements cryogéniques. Utilise généralement des tamis moléculaires.

Pressure Swing Adsorption (PSA)

Procédé de régénération par réduction de la pression du lit adsorbant.

Procédé Haber-Bosch

Synthèse industrielle de l'ammoniac à partir d'azote et d'hydrogène sous haute pression et température, utilisant l'hydrogène comme réactif.

Propulsion Ionique

Technologie utilisant le xénon pour générer une poussée efficace dans les satellites.

Pureté

Pourcentage du composant gazeux principal dans le produit final (ex. : O₂ à 99,9% de pureté). Un paramètre critique qui influence le choix de la technologie et le rendement.

Reflux

Dans une colonne de distillation, c'est la partie du liquide condensé en tête de colonne qui est renvoyée vers le haut de la colonne. Ce reflux améliore la pureté des produits en augmentant les contacts liquide-vapeur. Son débit est un paramètre d'optimisation crucial.

Régénérateur

Dispositif combinant pré-refroidissement et purification dans certains cycles de liquéfaction comme le cycle de Kapitsa.

Rendement

Quantité de produit (O₂, N₂, Ar) effectivement récupérée par rapport à la quantité théorique maximale contenue dans l'air traité. Souvent en compromis avec la pureté.

Réservoirs cryogéniques

Contenants isolés (ex. : vases de Dewar) pour stocker des gaz liquéfiés à basse température (ex. : -195,8 °C pour l'azote liquide), adaptés à la cryogénie.

Risques associés

Dangers liés au stockage (ex. : fuites, asphyxie) et au transport (ex. : accidents, explosions), nécessitant des mesures de sécurité.

Rupture Diélectrique

Phénomène où un gaz devient conducteur sous une certaine tension électrique.

Séparation de l'air

Processus d'extraction des gaz (O₂, N₂, Ar) de l'air à l'aide de techniques comme la distillation cryogénique ou l'adsorption.

Séparation par adsorption

Procédé non cryogénique utilisant des matériaux adsorbants (ex. zéolites) pour capturer sélectivement N₂ ou O₂.

Séparation par membrane

Technique utilisant des fibres polymères poreuses pour séparer les gaz selon leur perméabilité.

Soudage à l'arc

Technique utilisant l'argon pour protéger la soudure contre l'oxydation, souvent stocké dans des bouteilles sous pression.

Soudage à l'Arc

Technique utilisant des gaz inertes comme l'argon pour protéger la zone de soudure de l'oxydation.

Spectre d'Émission Optique

Motif lumineux émis par un gaz excité électriquement, utilisé en spectroscopie.

Spectroscopie

Analyse de la lumière émise ou absorbée par une substance pour déterminer sa composition.

Supraconductivité

Phénomène permettant la conduction de l'électricité sans résistance à très basse température.

Tamis moléculaire

Matériau (ex. zéolite) adsorbant sélectivement certains gaz pour purifier O₂ ou N₂.

Technologies non cryogéniques

Procédés de séparation de l'air fonctionnant à des températures proches de l'ambiante. Principalement l'Adsorption par Variation de Pression (PSA/VSA/TSA) et la Séparation par Membrane. Adaptés pour des productions plus petites et des puretés modérées.

Thérapie à l'oxygène

Administration d'oxygène pur ou enrichi pour traiter l'hypoxie, via masques ou ventilateurs, avec une pureté >99 %.

Transport routier

Méthode économique pour acheminer de grands volumes de gaz industriels (ex. : 1,2 million de m³/jour d'hydrogène) sur de longues distances, avec des risques de fuites.

Ventilation mécanique

Système requis par l'ATEX pour les locaux intérieurs de stockage des gaz inflammables, réduisant les risques d'explosion.

Zéolite

Aluminosilicate cristallin microporeux couramment utilisé comme tamis moléculaire dans les procédés de pré-purification et de PSA pour adsorber sélectivement l'eau, le CO₂ ou l'azote.

Abréviations



ATEX : Atmosphères Explosibles (Directive 2014/34/UE pour les équipements en environnements explosifs)

EN : Norme européenne (ex. : EN 60079 pour la ventilation en atmosphères explosives)

ISO : Organisation internationale de normalisation (ex. : norme ISO 9809 pour les bouteilles en acier)

ITM : Ionic Transport Membrane

J-T : Joule-Thomson

LASIK : Laser-Assisted In Situ Keratomileusis (procédure ophtalmologique utilisant des lasers excimer au xénon).

LED : Diode Électroluminescente (Light Emitting Diode)

ppm : Parties par million (Parts per million)

Bibliographie



Castle, W. F. (2002). Air separation and liquefaction: recent developments and prospects for the beginning of the new millennium. *Séparation et liquéfaction d'air : développements récents et perspectives au début du nouveau millénaire*. International Journal of Refrigeration, 25(1), 158-172. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00003-2)

Shriver, D. F., & Atkins, P. W. (2006). Inorganic Chemistry (4th ed.). W. H. Freeman and Company.

Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (Eds.). (2018). Perry's Chemical Engineers' Handbook (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Almqvist, E. (2003). History of Industrial Gases. Kluwer Academic/Plenum Publishers.

Barron, R. F. (1985). Cryogenic Systems. Oxford University Press.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Compressed Gas Association. (2013). Handbook of Compressed Gases (5th ed.). Springer.

Reid, R. C., Prausnitz, J. M., & Poling, B. E. (2001). The Properties of Gases and Liquids (5th ed.). McGraw-Hill.

Timmerhaus, K. D., & Flynn, T. M. (2014). Cryogenic Process Engineering. Springer.

Cotton, F. A., Wilkinson, G., Murillo, C. A., & Bochmann, M. (1999). Advanced Inorganic Chemistry (6th ed.). John Wiley & Sons.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2019). Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications (4th ed.). Pearson.

Kerry, F. G. (2007). Industrial Gas Handbook: Gas Separation and Purification. CRC Press.

Smith, A. R., & Klosek, J. (2001). A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. Fuel Processing Technology, 70(2), 115-134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00131-X)

Weeks, M. E. (1932). The Discovery of the Elements. Journal of Chemical Education, 9(9), 1599.

Kidnay, A. J., Parrish, W. R., & McCartney, D. G. (2020). Fundamentals of Natural Gas Processing (3rd ed.). CRC Press.

Compressed Gas Association. (2013). Handbook of Compressed Gases (5th ed.). Springer.

Kittel, C. (1986). Introduction to Solid State Physics (6th ed.). John Wiley & Sons.

Speight, J. G. (2021). Handbook of Industrial Hydrocarbon Processes (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Csele, M. (2004). Fundamentals of Light Sources and Lasers. John Wiley & Sons.

Jeffus, L. (2012). Welding: Principles and Applications (7th ed.). Cengage Learning.

Goebel, D. M., & Katz, I. (2008). Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. John Wiley & Sons.

Redjeb Y (2022) Technologie du gaz. Université El Oued

Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2010). Separation Process Principles (3rd ed.). Wiley.

FISCHER B, FERSCHNEIDER G (2010) Liquéfaction du gaz naturel. Opérations unitaires Génie la réaction Chim. <https://doi.org/10.51257/a-v2-j3601>

Redjeb Y (2022) Technologie du gaz. Université El Oued

Menidjel A (2009) Exploitation des échangeurs à faisceaux et calandre. I AP/SPA Ski

Koldaev AI, Koldaeva ZM, Evdokimov AA, et al (2020) Design of a fuzzy controller for a membrane gas separation process control system. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 873:012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/873/1/012026>

Webographie



World Health Organization. (2020). COVID-19 oxygen emergency impacting more than half a million people in low- and middle-income countries every day, as demand surges . Retrieved from <https://www.who.int/news/item/25-02-2021-covid-19-oxygen-emergency-impacting-more-than-half-a-million-people-in-low--and-middle-income-countries-every-day-as-demand-surges> on August 8, 2025.

