

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-
ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE SCIENCE D'INGENIEUR
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENT EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

Calcul thermique d'une installation cryogénique de
Liquéfaction de l'hydrogène

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : Génie Mécanique

SPECIALITE : ENERGETIQUE

PRESENTE PAR :

CHAIB RASSOU SABRINA

Directeur du mémoire :

HAOUAM Abdallah (MC-A)

UBMAnnaba

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT : MERZOUG BACHIR

(PR) U.B.M.A

Rapporteur : HAOUAM Abdallah

(MCA) U.B.M.A

EXAMINATEURS : SARI Mohamed Rafic

(PR) U.B.M.A

MECHIGEL Farid

(MC A) U.B.M.A

PROMOTION : 2017

Remerciements

Louange à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé, la patience et ses biens innombrables qu'il a bénis et accordés à son humble mortel pour qu'il puisse arriver à ce stade.

Je remercie mon encadreur Mr HAOUAM Abdallah.
Pour avoir assuré la direction scientifique de ce travail.

Je remercie également les membres de jury qui nous a honorés en acceptant l'invitation de discuter ce modeste travail.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour leur patience durant mes études.

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère et mon père

Mes sœurs

Mon frère,

Toute mes amies,

A tout les étudiants de génie mécanique,

Ainsi qu'à tous mes amies et tout qui me connaissent.

Dédicace

J'ai le grand honneur de dédier ce

Modeste travail

A ceux qui m'ont fait de moi une femme

« MA MERE » et « MON PERE » qui m'ont aidés

Encouragé beaucoup durant tous mes études

Et mes frères

A toutes mes oncles cousins des familles

A toutes mes amies que je ne m'ont aidés de loin ou de près durant

Le moment difficile

Enfin à tous l'ensemble du personnel de département

Génie mécanique et toute

La promotion 2017/2018

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction général

Chapitre I : généralité sur l'hydrogène et la liquéfaction de l'hydrogène.

I.1. Définitions

I.2. L'histoire de l'hydrogène

I.3. L'hydrogène et l'univers

I.4. L'hydrogène comme carburant ?

- I.4.1. Comment l'hydrogène est-il le carburant le plus efficace ?
- I.4.2. Pourquoi l'hydrogène est-il le carburant le plus propre ?

I.5. Propriétés physico chimiques de l'hydrogène

I.6. Production de l'hydrogène

I.7. Applications de l'énergie hydrogène

I.8. Transfert de l'hydrogène liquide

I.9. Transport de l'hydrogène liquide

I.10. L'avenir de l'hydrogène liquide

I.11. Utilisations

I.12. Les avantages de l'hydrogène

I.13. Les pile à combustibles

Chapitre II : Calcul thermodynamique d'une installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène.

II.1. Introduction

II.2. Cycle cryogénique à étranglement simple de LINDE avec refroidissement préalable du gaz de travail

II.3. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant avec un seul étage de refroidissement préalable

II.3.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=8\text{MPa}$

II.3.2 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=12\text{MPa}$

II.3.3 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=16\text{MPa}$

II.4 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant avec deux étages de refroidissement préalable.

II.4.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=8\text{MPa}$

II.4.2. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=12\text{MPa}$

II.4.3. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=16\text{MPa}$

Chapitre III : Dimensionnement des principaux équipements de l'installation cryogénique.

III.1 Introduction

III.2. Pré dimensionnement d'un compresseur

III.2.1 Calcul des caractéristiques thermodynamiques du compresseur à $P_2=8\text{MPa}$

III.2.2 Calcul des caractéristiques thermodynamiques à $P_2=12\text{MPa}$

III.2.3 Calcul des caractéristiques thermodynamiques à $P_2=16\text{MPa}$

III.3. Dimensionnement de l'échangeur à tubes et calandre

III.4. Dimensionnement d'un échangeur type à tubes et calandre

III.4.1 Dimensionnement au niveau $P=8\text{MPa}$

III.4.2 Dimensionnement au niveau $P=12\text{MPa}$

III.4.3 Dimensionnement au niveau $P=16\text{MPa}$

Nomenclature :

Glossaire	latines	Indices
symbole	Désignation	Unités
X	La quantité de gaz	/
q_0	quantité de chaleur	KJ/kg
w_k	Travail de compression	KJ/kg
w_{sup}	Travail supplémentaire	KJ/kg
W	La consommation d'énergie	KJ/kg
w_0	La consommation d'énergie spécifique	KJ/kg
h	L'enthalpie	KJ/kg
ϵ_r	L'efficacité réelle de l'installation	/
ϵ_{th}	L'efficacité théorique	/

Introduction générale

L'atome d'hydrogène est le plus simple et le plus petit des atomes car son noyau est constitué d'un seul proton autour duquel gravite un électron circulant perpétuellement autour d'un unique proton.

C'est l'élément le plus répandu de l'univers, avec 75% de la masse visible du cosmos, mais il ne représente que 0,9% en poids de la croûte terrestre en raison de la faiblesse de l'attraction de la Terre par rapport à d'autres astres. La concentration de l'hydrogène dans l'atmosphère jusqu'à une altitude de 80 kilomètres (troposphère et stratosphère) est sensiblement constante (10^{-5}) ; elle augmente considérablement dans l'exosphère.

Il existe aussi bien dans la molécule d'eau qu'au niveau des hydrocarbures lesquels associent hydrogène et carbone, présents dans tous les tissus vivants du monde animal ou végétal.

L'hydrogène est considéré comme un vecteur énergétique (qui transporte de l'énergie) et aujourd'hui il est utilisé pour de multiples applications. Il est utilisé essentiellement dans la chimie, le raffinage ou l'industrie. La distribution actuelle des carburants automobiles, si elle est une référence, n'est guère transposable au cas de l'hydrogène. Les carburants pétroliers sont liquides alors que l'hydrogène dans sa forme la plus courante est gazeux et s'il est liquide c'est à -253°C soit à 20 K (à la pression atmosphérique), une température qui nécessite un excellent conditionnement cryogénique.

L'hydrogène est un gaz inodore et incolore ; c'est le plus léger de tous les éléments chimiques. Son numéro atomique est égal à 1. Il perd son électron unique dans ses combinaisons avec les éléments non-métalliques ; il s'unit également avec les métaux pour donner des hydrures dans lesquels il peut jouer le rôle d'anion (H^-). Enfin les composés les plus nombreux et notamment tous les composés organiques hydrogénés sont des composés covalents.

Son stockage s'avère donc coûteux aussi bien d'un point de vue énergétique que pécuniaire.

Ces caractéristiques sont très pénalisantes pour son utilisation aussi bien dans les systèmes stationnaires que portables.

Les différentes solutions envisagées à ce jour pour stocker de l'hydrogène sont :

- Sous forme de gaz comprimé dans des réservoirs (de 300 à 700 bars) ;
- Sous forme de liquide par procédé cryogénique (moins de 20 K) ;
- Sous forme solide dans des microbilles de verre ou dans des hydrures.

Le choix du thème du projet de fin d'études de Master en énergétique a été effectué suite à un stage effectué durant le mois d'avril 2018 au niveau de la centrale à oxygène de l'entreprise nationale Sider. Bien que cette centrale fournisse essentiellement de l'oxygène et l'azote liquide au complexe d'El Hadjar, l'existence d'une unité de liquéfaction de l'hydrogène par électrolyse à l'arrêt, attira notre attention particulièrement et éveilla notre curiosité pour le choix d'un thème lié à l'obtention de l'hydrogène non pas par électrolyse mais par un procédé de liquéfaction des gaz industriels.

Ainsi l'objectif visé par ce projet est l'étude d'une installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène, dans le but de déterminer ses performances énergétiques.

Le projet constitue une application fondamentale des connaissances acquises en cryogénie.

Le travail s'articulera sur une introduction générale et trois chapitres suivis d'une conclusion générale.

- Le premier chapitre traitera les généralités sur la liquéfaction de l'hydrogène.
- Le deuxième chapitre sera consacré au calcul thermodynamique d'une installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène basé sur l'utilisation des cycles cryogéniques et l'élaboration de bilans énergétiques visant la détermination des grandeurs caractéristiques de l'installation cryogénique notamment son coefficient de liquéfaction, sa consommation d'énergie spécifique et son rendement thermodynamique.
- Le troisième chapitre complètera cette étude thermodynamique par le dimensionnement des principaux composants de l'installation à savoir les compresseurs et les échangeurs de chaleur utilisés.

I.1. Définitions: [1]

L'hydrogène est l'élément chimique de numéro atomique 1, de symbole H.

Premier élément dans la table périodique. Dans les conditions normales c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H₂.

L'atome d'hydrogène, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Son nombre atomique est 1 et son poids atomique 1,00797. C'est un des composés principaux de l'eau et de toute la matière organique, et il est largement étendu non seulement dans la terre mais également dans l'univers entier. Il y a trois isotopes d'hydrogène: le protium, de masse 1, trouvé dans plus de 99.98% de l'élément normal; le deutérium, de masse 2, trouvé dans la nature à approximativement 2%, et tritium, de masse 3, qui apparaît en petite quantité dans la nature. Il peut aussi être artificiellement produit par diverses réactions nucléaires.

La fusion de noyaux d'hydrogène libère une énergie considérable. La maîtrise de cette fusion permettrait de disposer d'une source d'énergie pratiquement inépuisable (comme celle du soleil). Des voies différentes (nouvelles) sont empruntées pour la fusion nucléaire contrôlée.

Elles sont actuellement à l'étude : la fusion par confinement inertiel (utilisation de lasers mégajoules et térajoules), la fusion froide et la sonoluminescence. [2].

I.2. L'histoire de l'hydrogène : [3]

L'hydrogène, bien que découverte au XVIII^e siècle, a en réalité une histoire plus ancienne. En effet, au début du XVI^e siècle, Paracelse, un alchimiste suisse analysa la réaction de l'acide sulfurique sur du fer. Il s'interrogea sur le fait que l'air obtenu avait des similitudes avec l'air que l'on respirait puisqu'il était inodore et n'empoisonnait pas.



Figure I.4: Parace

Ce n'est qu'en 1766 que le physicien et chimiste Henry Cavendish reprend les travaux de Paracelse. Il parvient à obtenir cet air qu'il nomma « air inflammable », du fait qu'il était capable de brûler, dans des vessies de porc et il constata par la suite deux choses : que sa densité était plus faible que celle de l'air, et que sa combustion formait de la vapeur d'eau.

En 1783, Lavoisier, un très célèbre chimiste français fit la synthèse de ces travaux qu'il présenta à l'académie des sciences. Et c'est lui qui donna le nom « d'hydrogène » à ce gaz qui se traduit en grec par « qui produit de l'eau ». De ce fait, la même année, on entreprit le premier vol avec un ballon gonflé à l'hydrogène (un vol de 2 heures et de 35 km).

Cela lui permet d'écrire, dès le lendemain à l'académie des sciences française, après la description de l'expérience : « nous ne balançâmes pas à en conclure que l'eau n'est pas une substance simple et qu'elle est composée, poids pour poids, d'air inflammable et d'air vital »

Avril de l'année suivante, Lavoisier et Meusnier présentent à l'académie un procédé quasi industriel de production d'hydrogène en grande quantité par action de l'eau sur le “fer au rouge”

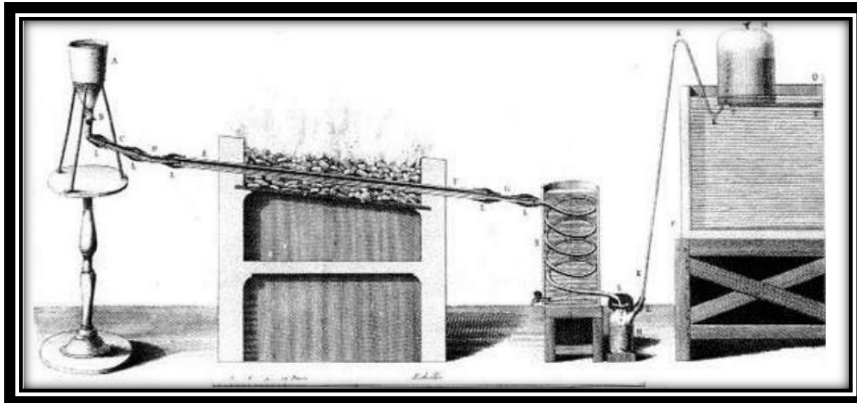
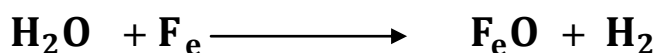


Figure I.5 : l'expérience de Lavoisier.

Il s'agissait en fait d'une oxydation du fer et d'une réduction de l'eau, par la réaction :



Cavendish avait également mis en évidence la faible densité de l'hydrogène, résultat retrouvé par le physicien et chimiste français Jacques Alexandre Charles, lequel l'expérimenta sur des bulles de savon. Ces expériences sont connues des frères Montgolfier, fabricants de papier à Annonay près de Lyon, qui se passionnent pour la navigation aérienne. Ils font quelques essais avec de “ l'air inflammable ” dont ils gonflent de petits ballons de papier et de tissu de soie, mais constatent que la force ascensionnelle n'est que momentanée. Par suite, leurs

travaux sont réorientés vers l'air chaud, ce qui conduira à la très célèbre montgolfière. Un vol de démonstration de cette machine avec des animaux est présenté au roi de France le 13 septembre 1783, et est suivi par le premier vol humain, avec Pilastre de Rosier et le Marquis d'Arlandes.

De son côté Jacques Alexandre Charles persévère dans son idée d'utiliser l'hydrogène pour les aérostats des frères Montgolfier et le 27 août 1783, fait voler devant 300 000 spectateurs Rassemblés aux tuileries, un ballon gonflé à l'hydrogène. De proche en proche, cela amènera, en juin 1794, aux premières observations aériennes avec le ballon "Entreprenant" qui, depuis une altitude de 300 mètres, a permis à l'Etat major des armées de la révolution française de déjouer, en plusieurs points, les mouvements de l'armée autrichienne et en définitive de remporter la bataille de Fleurus ce qui changea le cours de l'histoire.

En 1804, le français Louis Joseph Gay Lussac et l'allemand Alexander Von Humboldt démontrent conjointement que l'eau est composée d'un volume d'oxygène pour deux volumes d'hydrogène, et en 1839, William Grove découvre le principe de la pile à combustible.

Puis, à la fin du XIX siècle, indépendamment l'un de l'autre, le suisse Adolphe Pictet et le français Louis Paul Cailletet liquéfient l'oxygène. Puis à la suite de ces travaux, le professeur Sigismond Wroblewski, de l'université de Cracovie, réussit la première liquéfaction de l'hydrogène. En 1898, à récupérer ce liquide en un bain statique stable. Enfin, les allemands Fritz Haber et Carl Bosch inventent le procédé de synthèse de l'ammoniac qui est perfectionné ensuite par le français Georges Claude, fondateur de la société air liquide.

L'hydrogène devient alors une matière première de l'industrie chimique qui aujourd'hui, outre la synthèse de l'ammoniac est utilisée dans de nombreux secteurs (pétrochimie, fabrication d'amines, de méthanol, d'eau oxygénée, industrie alimentaire, etc.).



Figure I.6 : ballon à l'hydrogène

En 1803, Philippe Lebon dont la première démonstration fut faite à Paris.

L'élément combustible de ce gaz était en effet l'hydrogène qui se trouvait en proportion de 40 à 60%, les autres éléments étant, pour l'essentiel, du monoxyde de carbone accompagné de gaz carbonique et de méthane. Le bec de gaz, moyen de novateur d'éclairer la ville, s'imposa peu à peu tout au long du siècle.

Chaque cité se dota d'un dispositif complet allant de l'usine à gaz au réseau de distribution grâce à la mise en place d'une infrastructure en sous-sol qui après avoir été employée pour l'éclairage public devient peu à peu l'outil de la distribution d'énergie calorifique et motrice dans les immeubles en particulier.

La science de l'hydrogène née en Europe et plus particulièrement en France, a continué à stimuler les esprits en particulier en raison de son pouvoir calorifique énergétique. Ainsi vers 1960, on y étudie un moteur-fusée à l'hydrogène, qui fonctionne en 1968 et est le premier spécimen connu hors des États-Unis. Ce succès est une des raisons de la réussite du lanceur européen de satellites Ariane, qui utilise dès l'origine un étage supérieur cryotechnique. Cet essor du moteur de fusée à l'hydrogène durant la seconde moitié du XX^e siècle peut sans nul doute être considéré comme l'un des éléments précurseurs de l'ère de l'hydrogène énergie.

I.3.L'hydrogène et l'univers [4]

L'hydrogène est l'élément le plus abondant représentant près des trois quarts de la masse de l'Univers. L'hydrogène se trouve dans l'eau qui recouvre 70 % de la surface de notre planète ainsi que dans toutes les matières organiques.

L'hydrogène est l'élément le plus simple dans l'univers. Il est composé d'un proton et d'un électron.

L'hydrogène est l'élément le plus léger de tous les éléments et de tous les gaz ; il est 14 fois plus léger que l'air. Un « déversement » d'hydrogène gazeux se diffuse immédiatement dans l'air et ne pollue ni le sol ni la nappe phréatique.

L'hydrogène est invisible, inodore et non toxique. Il ne provoque pas de pluies acides, n'appauvrit pas la couche d'ozone et ne génère pas d'émissions dangereuses.

L'hydrogène est le principal constituant du soleil et de la plupart des étoiles, et de la matière interstellaire ou intergalactique. C'est un composant majeur des planètes géantes, sous forme métallique au cœur de Jupiter et de Saturne, et sous la forme de dihydrogène solide, liquide ou gazeux dans leurs couches plus externes et dans les autres planètes géantes. Sur Terre il est

surtout présent à l'état d'eau liquide, solide (glace) ou gazeuse (vapeur d'eau), mais il se trouve aussi dans les émanations de certains volcans sous forme H_2 et de méthane CH_4 . [1]

Ce gaz a été mis en évidence par Cavendish en 1766, qui l'a appelé « air inflammable » parce qu'il brûle ou explose en présence de l'oxygène, où il forme de la vapeur d'eau. Lavoisier a désigné ce gaz par le nom hydrogène, composé du préfixe « hydro », et du suffixe « gène ».

Il s'agit du gaz de formule chimique H_2 dont le nom scientifique est désormais dihydrogène.

Le dihydrogène est toujours appelé « hydrogène » dans le langage courant.

I.4.L'hydrogène comme carburant ?

L'hydrogène est le carburant parfait. Il s'agit du combustible le plus propre et le plus efficace. L'hydrogène peut produire de l'énergie et l'électricité peut produire de l'hydrogène, créant une boucle d'énergie renouvelable et sans danger pour l'environnement. L'hydrogène se combine chimiquement avec la plupart des éléments ; c'est pourquoi il est utilisé comme produit chimique industriel dans une large gamme d'applications depuis de nombreuses années. Pour les véhicules, l'hydrogène peut être utilisé comme carburant de deux manières : soit pour produire de l'énergie dans une pile à combustible et ceci est l'option la plus propre soit dans un moteur à combustion interne dans lequel les émissions sont considérablement réduites par rapport aux autres carburants.

I.4.1.Comment l'hydrogène est-il le carburant le plus efficace ?

L'hydrogène dispose de l'énergie de combustion la plus haute par livre comparée à tous les autres carburants ; il est ainsi plus efficace sur la base du poids que les carburants actuellement utilisés.

- L'hydrogène fournit 2 à 3 fois plus d'énergie que la plupart de carburants courants. Il se combine facilement avec de l'oxygène dégageant une énergie considérable en tant que chaleur.

I.4.2.Pourquoi l'hydrogène est-il le carburant le plus propre ?

A la différence des combustibles à base de carbone, l'hydrogène ne produit pas de sous-produits nocifs lors de sa combustion. Lorsque l'hydrogène est combiné à l'oxygène dans une pile à combustible, seules de l'énergie et de l'eau propre sont produites.

I.5. Propriétés physico chimiques de l'hydrogène

1.5.1 Propriétés physiques

Numéro atomique	1
Masse atomique	1,0080
Masse volumique	$0,0899 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ à 20 °C
Température de fusion	- 259,14 °C
Température d'ébullition	- 252,87 °C
Pouvoir calorifique inférieur	33.33kwh/kg
Pouvoir calorifique supérieur	39.41kwh/kg
Isotopes	le deutérium et le tritium (respectivement 1 et 2 neutrons)
Configuration électronique	1s ¹
Energie de première ionisation	1311 kJ.mol ⁻¹
Poids moléculaire	2 g/mol
Point d'ébullition	20.3 K (-253°C)
Point de fusion	14 K (-259°C)
Densité liquide (20 K)	70 kg/m ³
Densité gazeuse	(273 K) 90 g/m ³
Energie de liquéfaction	14 MJ/kg
Electronégativité de Pauling	2.1
Rayon atomique	0.12nm

Tableau I.1 : Les propriétés physiques de l'hydrogène.

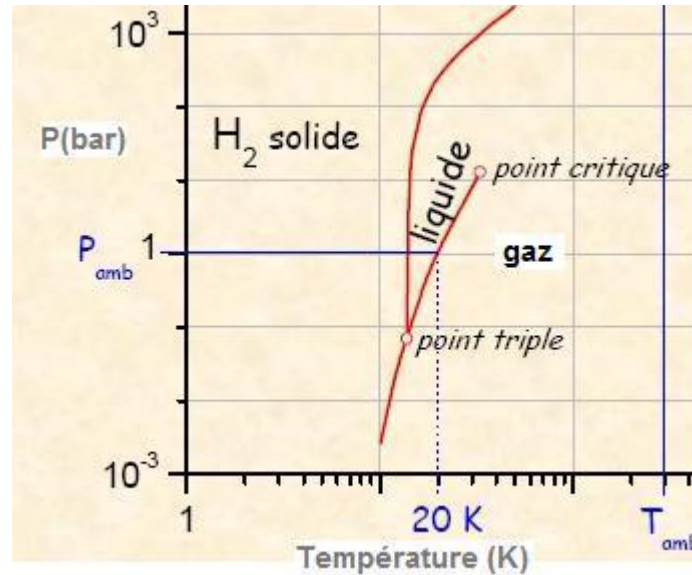


Diagramme des phases gaz /liquide/solide de l'hydrogène.

Caractéristiques des phases de l'hydrogène: [1]

Phase gazeuse :

1. Masse volumique de la phase gazeuse (1013,25 h_p_a , à 15 °C) : 0,085 kgm^{3-1} .
2. Equivalent gaz/liquide (1013,25 h_p_a et 15 °C) : 1 m^3 de gaz H_2 (0,085 kg) > 1,184 litre de liquide.
3. Volume spécifique (1013,25 h_p_a , à 21 °C) : 11,986 $m^3 kg^{-1}$.
4. Chaleur spécifique à pression constante (C_p) (1000 h_p_a et 25 °C) : 29 J/ (mole.K).
5. Viscosité (1013,25 h_p_a , à 15 °C) : 0,0000865 Poise.
6. Conductivité thermique (1013,25 h_p_a , à 0 °C) : 168.35 mW/ (m.K)
7. Solubilité dans l'eau (1013,25 h_p_a , à 0 °C) : 0,0214 vol/vol (21,4 ml dans 1 litre d'eau, à 0°C et 1 atm).

Phase liquide :

1. Masse volumique de la phase liquide (1013,25 h_p_a , au point d'ébullition) : 70.973 kgm^{3-1} .
2. Equivalent gaz/liquide (1013,25 h_p_a et 15 °C) : 1 m^3 de H_2 liquide > 844 m^3 de gaz [71,74 kg].
3. Point d'ébullition (1013,25 h_p_a) : -252,8 °C (20,35 K).
4. Chaleur latente de vaporisation (1013,25 h_p_a , au point d'ébullition de -252,8 °C) : 454,3 $kJkg^{-1}$.

Phase solide :

1. Point de fusion : -259.14 °C (14.01 K).
2. Chaleur latente de fusion ($1013,25\text{hp}_a$, au point triple) : $58,158\text{ kJkg}^{-1}$.

I.5.2. Propriétés chimiques : [5]

Peu actif à froid, l'hydrogène donne à chaud ou au contact de catalyseurs de nombreuses réactions. Élément univalent, il présente un caractère nettement électropositif. Il se combine directement à la plupart des non-métaux ainsi qu'aux métaux alcalins et alcalinoterreux. Les halogènes donnent avec lui des hydracides. Il brûle avec une flamme bleue, et son mélange avec l'oxygène, détonant au contact d'une étincelle ou de mousse de platine, est employé dans le chalumeau oxyhydrique. L'hydrogène se combine au soufre à chaud et à l'azote sous pression (préparation de l'ammoniac). Particulièrement avide d'oxygène et de chlore, il peut réduire beaucoup de leurs combinaisons. Il réduit les oxydes du soufre, de l'azote, de l'arsenic, etc. Il réduit aussi le monoxyde de carbone à chaud en donnant du méthane (en présence de nickel), des carbures saturés (synthèse de Fischer-Tropsch) ou du méthanol (en présence de ZnO). Les conditions de réduction sont améliorées lorsque le corps à réduire est placé dans le milieu même où l'hydrogène est produit (l'hydrogène naissant, vraisemblablement sous forme atomique). En soufflant de l'hydrogène dans un arc électrique, on obtient l'hydrogène atomique de Langmuir, qui réduit tous les oxydes et se combine à froid à la plupart des non-métaux.

Avec les métaux de transition, l'hydrogène donne des composés interstitiels, les atomes d'hydrogène se plaçant dans les vides du réseau cristallin. Certains métaux peuvent absorber ainsi des quantités importantes d'hydrogène : certains hydrures métalliques font l'objet d'études pour le stockage de l'hydrogène à bord de véhicules où il servirait de carburant.

Élément le plus abondant de l'Univers, l'hydrogène n'occupe pas sur Terre la première place. L'air atmosphérique en renferme de petites quantités ($3/10\ 000$ en volume) ; à l'état de combinaison, l'hydrogène figure dans l'eau, dans beaucoup de corps minéraux et dans tous les corps organiques. C'est à partir de l'hydrogène que se forment les éléments plus lourds dans les étoiles, lors des réactions thermonucléaires.

I.6 Production de l'hydrogène

Le reformage de gaz naturel par application de chaleur est actuellement le procédé le plus économique pour produire de l'hydrogène.

L'électrolyse produit de l'hydrogène en utilisant un courant électrique pour séparer l'eau en hydrogène et oxygène.

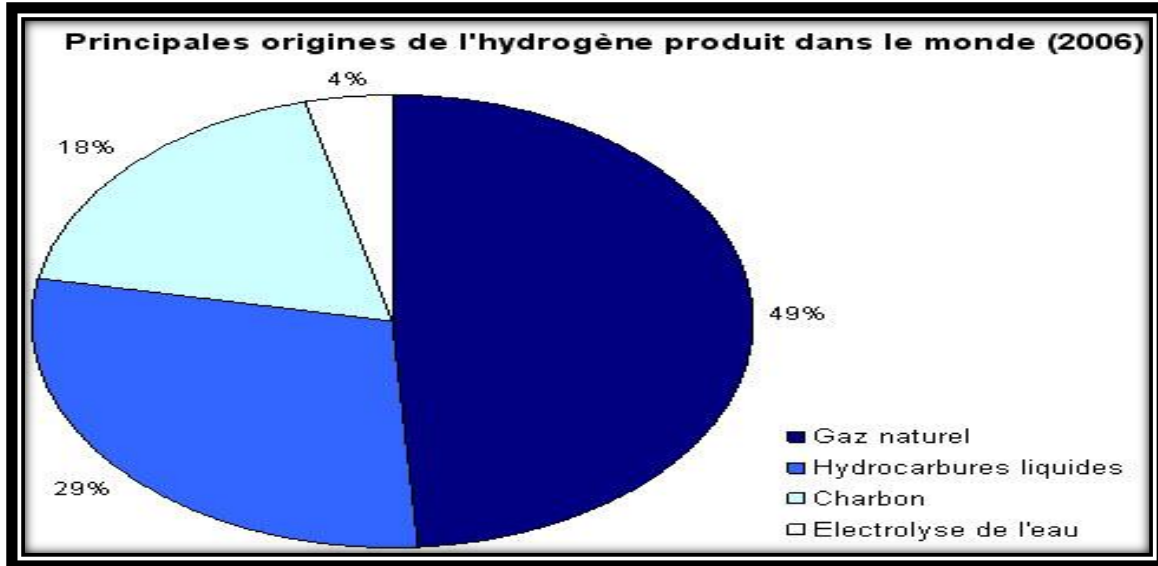


Figure I.1 : principales origines de l'hydrogène produit dans le monde (2006)

L'hydrogène possède un haut pouvoir énergétique gravimétrique : 120 MJ/kg comparé au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger (2.016 g/mol), d'où un faible pouvoir volumétrique : 10.8 MJ/m³ comparé au méthanol (16 MJ/m³) et au gaz naturel (39.77 MJ/m³). L'hydrogène pose, donc, un véritable problème de stockage et de transport. [6]

On remarque que si l'hydrogène a un pouvoir calorifique exceptionnel par unité de masse, il est en revanche très mauvais lorsque l'on raisonne en termes de volumes.

C'est l'un des inconvénients majeurs de ce vecteur énergétique. [7]



Figure I.2 : Usine H₂ de Guyane au Centre Spatial Guyanais, à Kourou.



Figure I.3 : Incendie et explosion à Lakehurst, aux Etats-Unis, du dirigeable "Hindenburg".

I.6.1. Production de l'hydrogène à partir des hydrocarbures fossiles : [6]

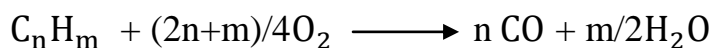
Le gaz naturel est composé en majeure partie de méthane, mais contient aussi du CO_2 et du soufre. Ce dernier doit être d'abord éliminé avec la désulfuration. Le procédé de vaporeformage se scinde, alors en deux réaction : la première est la réaction du méthane avec l'eau (à 850°C et à 25 bar) qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de Water Gas Shift, entre l'eau et le CO , qui produit du CO_2 et de l'hydrogène.

On élimine ensuite le CO . Pour cela, on peut utiliser les réactions de High Temperature Shift, vers 400 et 200°C . On a alors un gaz avec essentiellement de H_2 , du CO_2 , de H_2O , un peu de CO et du CH_4 . Cette étape est suivie par une ultime purification du gaz.

La pressure Swing Adsorption (PSA) permet d'obtenir de l'hydrogène pur à 99.999%.

- **L'oxydation partielle :**

Elle peut s'appliquer aux hydrocarbures (légers, lourds, asphaltes, coke de pétrole), mais aussi au charbon et à la biomasse. L'hydrocarbure est brûlé sous une atmosphère d'oxygène et de la vapeur d'eau.



C'est une réaction exothermique et ex entropique, qui porte le mélange gazeux à une température allant de 1000 à 1400°C , moyennant un préchauffage à 300°C . Le mélange gazeux obtenu, est refroidi, puis lavé à l'eau pour en éliminer les suies. Il est traité pour la conversion du CO en CO_2 . On élimine ensuite les gaz acides (CO_2 , H_2S) et l'on termine l'opération par une purification de l'hydrogène.

- **Gazéification du charbon :**

Le principe est le suivant : on mélange le charbon à de l'eau et à de l'air, à 1000°C et sous haute pression. On obtient un gaz contenant, en majorité, du CO et de l'hydrogène. On peut

alors séparer H₂ et CO des autres impuretés. Le CO est éliminé par Water Gas Shift, le CO₂ est ainsi, séparé du reste et stocké (carbone séquestration).

I.6.2 Production de l'hydrogène à partir de l'eau :

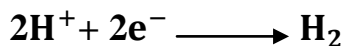
- **L'électrolyse de l'eau :**

De l'eau très pure est nécessaire pour éviter que les impuretés perturbent le fonctionnement de l'électrolyse. Typiquement, la cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (cathodes et anodes), d'une électrolyse (qui peut être une solution aqueuse acide ou basique, une membrane polymère échangeuse) et d'un générateur de courant continu. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, on a les réactions suivantes :

- à l'anode, l'eau se dissocie en oxygène et en protons, les électrons partent dans le circuit.



- à la cathode, les protons, passent à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène :



I.7.Applications de l'énergie hydrogène : [6]

La production de l'hydrogène représente, au début des années 2000, 500 milliards de Nm³, soit 6.5EJ (1 ex joule = 10¹⁸J). Or, la demande mondiale en énergie primaire est de 40 EJ, dominée majoritairement par le pétrole et le charbon. Ce qui signifie que la production actuelle (2003) ne recouvrirait que 1.5% de la demande.

Il y a, donc beaucoup à faire concernant la production de l'hydrogène pour atteindre une part significative. Compte tenu, de la demande énergétique mondiale qui ne cesse de croître. En 2050, le besoin énergétique prévu est de 850 EJ. La production de l'hydrogène devra, alors atteindre les 12500 milliards de Nm³.

L'hydrogène est produit en majeure partie à partir du reformage d'hydrocarbures (95%), l'électrolyse de l'eau en fournit seulement 2%.

Si l'hydrogène joue un rôle important dans l'industrie, il n'est presque pas utilisé comme vecteur d'énergie, sauf pour les fusées. Classiquement, il est utilisé surtout dans :

- l'industrie chimique et pétrochimique, l'industrie verrière, l'électronique, l'alimentaire, en métallurgie et dans la production de carburants à faible teneur en soufre.
- C'est la production d'hydrogène, en vue d'utilisation énergétique, qui semble avoir le plus d'avenir, que ce soit comme carburant dans les piles à combustible ou pour les moteurs à combustion interne.

I.7.1 Le stockage de l'hydrogène :

Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène imposent de lourdes contraintes pour une utilisation sûre. Son stockage pose des problèmes. Fort de son expérience, le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) développe des solutions de son stockage en évaluant leur sûreté.

La problématique du stockage de l'hydrogène dépend des contraintes inhérentes à son utilisation à savoir : la pureté, la quantité, le débit, la température de son utilisation et l'environnement thermomécanique. Il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de l'hydrogène, telle que d'une part, l'explosibilité et l'inflammabilité, et d'autre part, la faible dimension de son rayon atomique. En effet, il s'agit du plus petit atome existant dans la nature.

L'évaluation des performances des différents modes de stockage de l'hydrogène se fit sur la base des densités volumétriques et gravimétrique de l'hydrogène et du stockage dans son ensemble, ainsi que des conditions générales de son stockage et de son déstockage. A ceci s'ajouteront les critères déterminants de la sécurité et du coût. Parmi ces différents modes de stockage, nous citons :

➤ **Le stockage sous forme comprimé :**

Le stockage sous forme comprimé est l'un des plus utilisés actuellement (automobiles : PSA, Nissan, Daimler Chrysler). La pression va de 200 à 700 bars. L'hydrogène peut être stocké dans des bouteilles de 10 litres jusqu'à des réservoirs de 10000 m³.

Ces réservoirs sont ronds ou cylindriques et sont faits de métal très résistant à la corrosion.

Ils sont souvent en aluminium renforcé par des fibres en carbone. Des stations services existent déjà : notamment à Munich, Hambourg, Chicago et Détroit.

➤ **Le stockage souterrain :**

Tout comme le gaz naturel, il est possible de stocker l'hydrogène sous terre, sous forme comprimée : aquifères, cavernes salées...etc. cette méthode est intéressante pour les quantités importantes d'hydrogène.

➤ **Le stockage sous forme liquide ou cryogénique :**

L'hydrogène est stocké sous forme liquide à -253°C , dans un réservoir à double paroi, espacée par du vide. Ceci pour éviter les pertes thermiques par convection. Ce réservoir est en acier mais, actuellement, on tente d'utiliser des matériaux composites.

➤ **Le stockage sous forme d'hydrures métalliques :**

Certains métaux ou alliages ont la propriété de former des liaisons covalentes ou ioniques avec l'hydrogène, permettant ainsi, son stockage. Etant donné que le phénomène est réversible. Il s'agit, par exemple de matériaux et alliages suivant : du palladium pd, du magnésium Mg, de ZrMn_2 , de Mg_2Ni et de $\text{Mg-Mg}_2\text{Ni}$.

I.7.2 Stockage basse pression :

Une alternative à l'utilisation de réservoirs, sous pression gazeuse, consiste à stocker l'hydrogène sous forme d'hydrures métalliques. Ces composés, obtenus par réaction directe de certain métaux ou alliages métalliques avec l'hydrogène, sont capables d'absorber l'hydrogène et de le restituer lorsque cela est nécessaire.

Ces métaux sont très étudiés, depuis plusieurs années, et la palette de performances accessibles est aujourd'hui très large. Les critères de sélection d'un tel hydrure métallique dépendent, bien entendu, de l'application envisagée (mobile, stationnaire ou fixe) et de son environnement (température). Ces matériaux doivent surtout posséder une capacité massique d'absorption élevée, une cinétique d'absorption/désorption rapide. Ils doivent, également garantir l'intégrité du confinement et être peu sensible aux impuretés présentes dans l'hydrogène à stocker.

I.8 .Transfert de l'hydrogène liquide :

Pour transférer de l'hydrogène liquide d'un cryostat à un autre, que ce soit d'une unité de production à la citerne cryogénique d'un camion pour son transport, de la réserve d'une station service au réservoir d'un véhicule ou du remplissage des réservoirs de fusée, il existe deux méthodes. La première est le système habituel de transfert des liquides cryogéniques :

l'enceinte à vider est rendue étanche et ainsi se pressurise naturellement par l'hydrogène qui se vaporise en raison des pertes thermiques (cf. ci-dessus). Un tube plongé dans le liquide, dit canne de transfert, se prolonge à l'extérieur jusqu'au récipient récepteur et permet l'écoulement. L'inconvénient de la méthode est de soumettre le cryostat à une surpression ce qui n'est pas le cas de la seconde méthode qui met en jeu une pompe cryogénique à piston.

I.9. Transport de l'hydrogène liquide :

➤ **Son transport et sa distribution : [10]**

L'hydrogène est très léger, ce qui est un handicap pour son stockage et son transport. On utilise en général des bouteilles ou des pipelines dans lesquels il voyage sous forme comprimée. La forme liquide (à - 253°) est beaucoup plus coûteuse. Le pipeline est le moyen le plus utilisé, avec un réseau de plus de 2 500 km dans le monde, dont 1 500 en Europe et 900 aux Etats-Unis.

➤ **Transport par route :**

Le transport de l'hydrogène liquide par camion est le plus courant pour l'alimentation des stations-services à hydrogène comme cela est le cas pour les stations de démonstration mises en œuvre dans de nombreux pays. L'hydrogène est contenu dans des réservoirs cryogéniques cylindriques à l'image des camions citernes transportant des liquides. Ces véhicules peuvent transporter jusqu'à 3.5 t d'hydrogène liquide pour un poids total de 40 t.

➤ **Transport par mer :**

Le fait que l'hydrogène liquide soit dense et que les réservoirs cryogéniques le contenant puissent avoir de très importantes capacités suggère assez naturellement le transport par mer depuis les lieux pouvant avoir une grande capacité de production à ceux de forte consommation. C'est ce qu'avaient prévu les projets japonais WE-NET et européen Euro-Québec EQHHPP en adaptant à l'hydrogène liquide ce qui se fait pour le gaz naturel liquéfié.

I.10. L'avenir de l'hydrogène liquide :

Aujourd'hui :

La consommation d'hydrogène gazeux est en progression sensible tant dans l'industrie chimique que pétrolière (désulfuration) ; les débits et puretés demandés varient beaucoup d'un client à l'autre et exigent des appareils de production adaptés.

La consommation d'hydrogène liquide reste en comparaison très faible. La production et la livraison de l'hydrogène sous forme liquide peuvent, de par l'exigence de haute pureté requise par son procédé de fabrication, être dans certains cas la solution pour les besoins en hydrogène très pur : en effet, la pureté est difficile à conserver quand l'hydrogène gazeux est comprimé et livré en emballage sous haute pression.

Au futur : [3]

L'hydrogène peut être envisagé comme un vecteur énergétique au même titre que l'électricité. En raison de l'absence de pollution lors de sa combustion (résolution des problèmes environnementaux, effet de serre). La possibilité de son stockage rend ce combustible intéressant pour remplacer les combustibles d'origine fossile (dont les réserves sont limitées).il pourrait être la clef de voute concernant des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire ou éolienne, en permettant le stockage de cette énergie sous une forme chimique pour une utilisation ultérieure. La combustion de l'hydrogène avec l'oxygène ne produit que de l'eau et fait donc de l'hydrogène un carburant propre.

I.11.Utilisations:

L'hydrogène est un gaz polyvalent utilisé soit comme produit chimique (c'était, il y a encore quelques années quasiment la seule utilisation), soit comme vecteur d'énergie. Les domaines couverts sont sommairement détaillés ci-après :

- L'industrie chimique : l'application la plus importante est la fabrication de l'ammoniac NH_3 .
- Base de la fabrication des engrais ; viennent ensuite les fabrications des amines, du méthanol,
- De l'eau oxygénée et autres produits ;

I.12.Les avantages de l'hydrogène : [13]

Les bénéfices d'une utilisation étendue de l'hydrogène, en particulier dans le domaine des transports, pourraient être réels :

- Pas d'émissions de gaz à effet de serre ni de polluants lorsqu'il est issu de sources renouvelables, sa consommation ne provoquant que de la vapeur d'eau.
Pour l'hydrogène produit à partir d'énergies fossiles, solution la plus économique aujourd'hui, il faut régler le problème du gaz carbonique (CO_2) dégagé en quantité importante lors de sa production, sous peine d'annuler l'un de ses principaux atouts.

- Renforcement de l'indépendance énergétique dans le cas de l'hydrogène produit à partir de sources d'énergie renouvelables et du nucléaire.

I.13. Les piles à combustibles : [8-9]

I.13.1 Introduction :

La pile à combustible est un excellent convertisseur de l'hydrogène en électricité. Elle était, d'abord, limitée à des applications où le coût était un facteur secondaire. Ce type de pile vise désormais des marchés quantitativement significatifs. On cite, à cet égard, les installations fixes pour la production d'électricité et de chaleur

Depuis longtemps, un grand avenir lui est, par ailleurs, promis pour l'alimentation de véhicules électriques. Cette application, doit être une réalité pour le transport en commun.

Réduire les émissions de gaz carbonique (CO_2) est un objectif majeur car il est le plus préoccupant des gaz à effet de serre qui est produit par la combustion de composés hydrocarbonés, dont les hydrocarbures (pétrole, gaz naturel). Ces derniers sont au demeurant, abondamment utilisés pour la production de l'énergie électrique, thermique ou mécanique. Cette réduction peut être poursuivie selon deux voies, à savoir : augmenter les rendements des convertisseurs d'énergie, utilisant les hydrocarbures par le développement de la technologie sobre ou/et utiliser des combustibles d'origine non fossile. Dans ce dernier cas, deux solutions sont envisageables : l'hydrogène et les biocombustibles.

En effet, l'hydrogène peut être synthétisé par l'électrolyse de l'eau, à partir d'une électricité produite sans émissions de CO_2 (éolienne, solaire, hydraulique) ou par gazéification de produits provenant de la biomasse.

La plupart des systèmes de conversion énergétique ont un rendement médiocre. Ce n'est pas le cas des générateurs d'électricité à basse de pile à combustible (PAC), dont le rendement avoisine les 50%. Il est bien supérieur à celui des turbines ou des générateurs électro-diesels qui est de l'ordre de 30%.

Le programme-cadre de l'Union européenne supporte l'effort de recherche et développement technologique et de démonstration des piles à combustible depuis 1988. Cet effort, qui ne cesse de s'accroître, se justifie encore et toujours car la communauté considère que l'utilisation des piles à combustibles représente une solution qui pourrait contribuer au développement durable de l'Union et à l'aboutissement des objectifs de diverses politiques européennes. Ceci concerne essentiellement la problématique énergétique se rapportant à l'environnement et au transport.

I.13.2 Historique :

Le principe de la pile à combustible fut mis en évidence en 1839 par Sir William Grove. Il étudia ce qui se révélera être un précurseur de ce type de générateur électrochimique. Il plaça du platine dans des tubes remplis d'hydrogène et d'oxygène et en plongeant le tout dans de l'acide sulfurique. Il constata évidemment, une faible tension aux bornes de la cellule. Il avait, néanmoins saisi l'importance du contact à trois phases (gaz, électrolyse et platine), lesquelles sont nécessaires à la production de l'énergie. Il consacra ainsi son temps à la recherche d'une électrolyse permettant la production d'un courant électrique stable et fit remarquer, dès le départ, l'intérêt commercial que pouvait présenter un tel système. Un tel intérêt se concrétise si l'hydrogène venait à remplacer le bois et le charbon en tant que source énergétique.

1. Principe de fonctionnement de la pile à combustible :

Une pile à combustible est un système électrochimique (générateur d'énergie) qui convertit directement l'énergie chimique, d'une réaction d'oxydations d'un combustible, en énergie électrique.

Le principe de fonctionnement est simple, une cellule élémentaire est constituée de deux électrodes (anodes et cathodes), séparées par un électrolyte. La pile est alimentée en hydrogène et en oxygène. A l'anode, l'hydrogène réagit en se séparant en deux protons H^+ et en deux électrons. Les protons passent à travers l'électrolyte et les électrons passent plutôt dans le circuit électrique. Les ions de l'hydrogène se lient avec l'oxygène à la cathode pour donner de l'eau. De chaque côté des électrodes se trouvent les plaques bipolaires chargées de collecter le courant. Dans la pratique, ces cellules élémentaires sont assemblées les unes aux autres, en séries ou en parallèle, pour former un «STACK » on peut ainsi couvrir un large spectre de puissance, selon le nombre de piles, leur assemblage et leur surface. Ce spectre de puissance va de quelques KW à plusieurs MW.

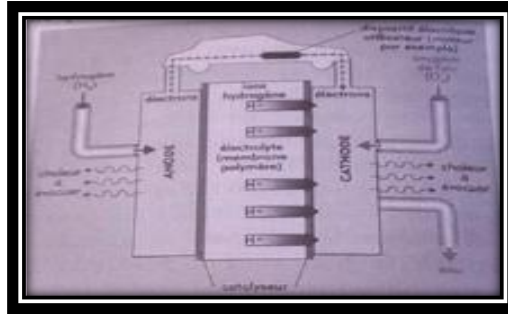
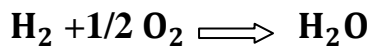


Figure I.7: fonctionnement de la pile à combustible.

Il s'agit d'une combustion électrochimique contrôlée ayant pour combustible l'hydrogène et l'oxygène et produisant de l'électricité, de l'eau et de chaleur. Ce processus suit une réaction chimique globale universellement connue :



I.13.3 Applications : pile à combustible :

En fait, les piles à combustible ont de multiples applications que l'on divise comme suit :

1. Automobile : véhicule particulier, bus...
2. Stationnaire (cogénération) : génération de chaleur et d'électricité (résidences, bâtiments publics type piscine, hôpital, école, générateurs de secours)
3. Portable : téléphone, ordinateur portable, caméra, matériels de camping ou militaire, le spatial, bateaux et sous-marins.

- **Les applications portables :**

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile qui consomme une puissance moyenne de l'ordre 400 mw, 50 mw en veille et 1 W conversation et l'ordinateur portable qui consomme en moyenne 10 W pour. Ceci donne une idée de l'enjeu civilisationnel. Il suffit de considérer le marché des « portable » : 300 millions d'unités vendues de téléphones mobiles en fin de l'année 1999 dans le monde et 640 millions avait été prévus pour 2005. 18 millions d'ordinateurs portables sont vendus en 1999 et 40 millions ont été prévus pour 2005.



Figure I.8 : pile à combustible capable de fournir avec un seul « plein » l'énergie électrique nécessaire à un ordinateur portable pendant 20 heures.

- **Application dans le transport :**

La pile à combustible connaît une histoire pratiquement longue de deux siècles. Pour relever les défis lancés par la protection de l'environnement, l'industrie automobile réfléchit à la meilleure façon d'aborder la révolution technologique qui se dessine. A l'horizon de 2020, le moteur électrique supplantera progressivement le traditionnel moteur thermique. Les perspectives actuelles de commercialisation de ces futurs véhicules sont basées essentiellement sur l'emploi d'un reformeur qui convertit un hydrocarbure, tel que le méthane, en hydrogène. Cet hydrogène sert à alimenter une pile à combustible.

- **Les véhicules légers :**

Dans ce domaine, de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993. L'Allemand Daimler Chrysler, qui s'équipe en piles à combustible chez Ballard, a montré quatre prototypes. Nekar, dont le plus récent modèle est la Nekar 4 qui est alimentée en hydrogène liquide, présenté en 99, et est construit sur une base class A. la Nekar 5, modèle de prés-série, est équipée d'un reformeur qui est alimenté en méthanol. Il a vu le jour en novembre 2000.



Figure I.9: le prototype de véhicule à pile à combustible actuellement développé par PSA.

- **Le bâtiment et le tertiaire :**

La pile à combustible de type EURO 1 (première génération) a été mise en place en octobre 2003, dans un bâtiment expérimental, au centre de Recherche Gaz de France à la Plaine Saint Denis, elle produit de l'électricité utilisée pour les besoins du bâtiment, et fournit du chauffage et de l'eau chaude, accumulée dans des ballons, pour sept logements expérimentaux.

Une autre pile, de type EURO 2 (deuxième génération), a été installée dans un collectif de 52 logements, à Sarreguemines, et a été inaugurée le 25 juin 2004.

I.13.4. Avantages et inconvénients :

Les piles à combustibles sont souvent présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique de l'automobile. Cet attrait est justifié par leurs nombreux avantages :

- Rendement énergétique élevé même à charge partielle. Il est de 40% à 70% pour l'énergie électrique, et atteint plus de 85% compte tenu de l'énergie thermique.
- Faibles émissions sonores.
- Peu d'émissions de gaz toxiques (en particulier en termes de CO, NO_x, C_nH_m et particules, mais elles dépendent des combustibles et du type d'applications).
- Elles sont de construction modulaire.
- Fonctionnant à diverses températures : cela permet d'utiliser la chaleur en couplant avec une turbine ou pour des applications allant de l'eau chaude à la vapeur.
- Pas de parties rotatives.

Le meilleur carburant est l'hydrogène, utilisé dans les piles à combustible. Il reste quelques points faibles qui doivent être réglés pour le développement de ces piles et leur généralisation ;

- Le poids et le volume de ces piles sont élevés, surtout, si on veut l'intégrer dans un véhicule.
- La durée de vie : elles doivent durer de 40000h dans les applications stationnaires.
- L'intégration thermique : entre valoriser la chaleur ou l'évacuer, ceci selon le type de pile et son application.
- Le coût : le prix des piles est bien supérieur à celui pouvant assurer sa commercialisation

Chapitre II :

Calcul thermodynamique d'une installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène.

II.1.Introduction :

L'obtention de l'hydrogène liquide peut être réalisée suivant différents cycles cryogéniques ; du cycle à étranglement simple utilisant le processus de détente Joule Thomson aux cycles combinant le refroidissement préalable du gaz de travail par un agent cryogénique externe ou bien ceux utilisant à la fois la détente isentropique et la détente isenthalpique de l'hydrogène. L'objectif de ce chapitre consiste à la détermination des performances énergétiques d'une installation cryogénique destinée à la liquéfaction de l'hydrogène fonctionnant selon le cycle de Linde à étranglement simple à refroidissement préalable étagé, utilisant l'azote à l'état liquide saturé à 77 K puis l'azote sous vide atmosphérique à 65 K.

II.2.Cycle cryogénique à étranglement simple de LINDE avec refroidissement préalable du gaz de travail :

Le schéma du cycle thermodynamique de l'installation cryogénique de liquéfaction de l'hydrogène est représenté sur la figure ci-dessous (Fig. 1).

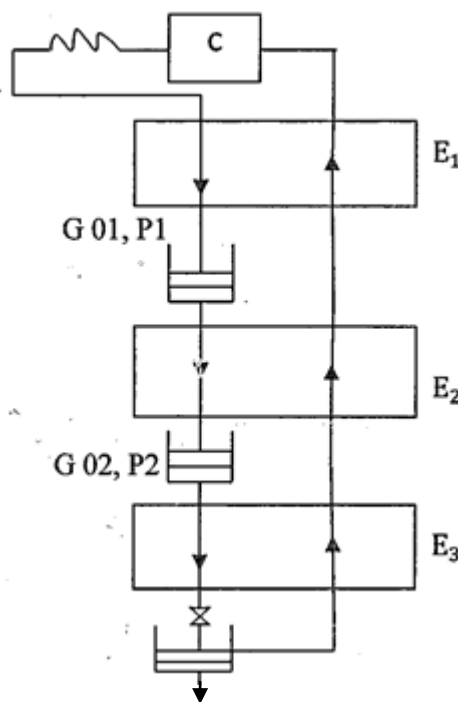


Figure II.1 : processus de liquéfaction de l'hydrogène (ES+RP à deux étage de RP).

C : Compresseur muni d'un refroidisseur R.

E₁, E₂ : Echangeurs de chaleur.

P : Cuve du refroidissement préalable.

D : Détendeur (isenthalpique).

V : Cuve de liquéfaction.

G₀ : Débit du gaz de refroidissement préalable (azote).

qa₁ ; qa₂ : Apports de chaleur du milieu extérieur aux échangeurs.

x : quantité de gaz hydrogène liquéfié.

qin₁ ; qin₂ : Imperfections des échangeurs de chaleur.

II.3 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant avec un seul étage de refroidissement préalable :

Le calcul thermodynamique sera effectué pour le cycle utilisant le refroidissement préalable de l'hydrogène par l'azote liquide saturé à 77 K (Fig. 2).

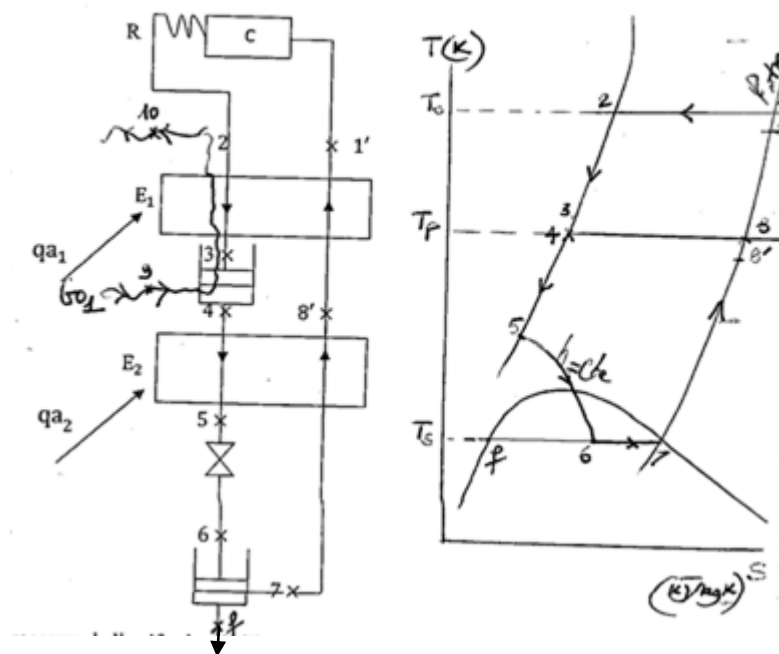


Figure II.2 : processus de liquéfaction de l'hydrogène (ES+RP à seul étage de RP) et diagramme TS associé au cycle.

- **Détermination de la quantité de gaz hydrogène liquéfié (x) : Coefficient de liquéfaction**

Considérons le contour (C₁) du dernier étage du processus, faisons le bilan énergétique en régime permanent : Sortie – Entrée = 0

$$\text{Sortie} = \text{Entrée}$$

$$h_4 + qa_2 = x h_f + (1-x) h_{8'}$$

$$h_8 - h_{8'} = c_p \Delta T_{8-8'} = qin_2$$

$$h_4 + qa_2 = x h_f + (1-x) (h_8 - qin_2)$$

$$h_4 + qa_2 = x h_f + h_8 - qin_2 - xh_8 + xqin_2$$

$$x (h_8 - h_f - q_{in_2}) = h_8 - h_4 - q_{in_2} - q_{a_2}$$

$h_8 - h_4 = \Delta h_{TII}$: effet isothermique d'étranglement du 2^{ème} étage.

$q_{in_2} + q_{a_2} = \sum q_2$: la somme des pertes du 2^{ème} étage.

$$X = \frac{\Delta h_{TII} - \sum q_2}{h_8 - h_f - q_{in_2}} \quad (1)$$

- **Calcul de la quantité de chaleur extraite au niveau de la cuve P de refroidissement préalable : q_0**

$$q_0 = G_0 (h_{10} - h_9)$$

Considérons le contour C_2 de la cuve P et de l'échangeur E_1 et faisons le bilan énergétique :

$$G_0 h_0 + h_2 + q_{a_1} + (1-x) h_8' = G_0 h_{10} + h_4 + (1-x) h_1'$$

$$q_0 = G_0 (h_{10} - h_9) = h_2 + q_{a_1} - h_4 + (h_8' - h_1') (1-x)$$

$$q_0 = (h_8 - h_4) - (h_1 - h_2) + (h_1 - h_1') - (h_8 - h_8') + q_{a_1} + x(h_1' - h_8')$$

$$q_0 = \Delta h_{TII} - \Delta h_{TI} + (q_{in_1} - q_{in_2}) + q_{a_1} + x(h_1' - h_8') \quad (2)$$

$\Delta h_{TI} = h_1 - h_2$: Effet isothermique d'étranglement du 1^{er} étage

Caractéristiques données de l'installation cryogénique:

$T_0 = 293$ K; $P_1 = 0.1$ MPa;

$r = 4157$ J/kg.K constante spécifique de l'hydrogène ;

$c_p = 14.1$ kJ/kg.K : chaleur spécifique de l'hydrogène ;

$\eta_k = 0.65$ rendement du compresseur ;

$T_p = 77$ K azote liquide saturé.

$\Delta T_1 = \Delta T_{1-1'} = 13$ K; $\Delta T_{II} = \Delta T_{8-8'} = 2$ K; $q_a = 4\%$ ΔHT ;

P_2 : En fin de compression isothermique variable de 8 à 16 MPa.

$q_{x_{sup}} = 1.04 \text{ kJ/kg}$: Apport de chaleur supplémentaire au niveau de la cuve P du refroidissement préalable.

II.3.1 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=8\text{MPa}$:

- Détermination des points figuratifs du cycle de l'installation cryogénique

Pts	P (MP _a)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	8	293	4166
3	8	128	1846
4	8	77	1180
5	8	47	659
6	0.1	20	659
7	0.1	20	712
8	0.1	77	1340
8'	0.1	75	1310
f	0.1	20	272

Tableau II.01 : Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

- Calcul du coefficient de liquéfaction (X) :

De l'équation (1) et du tableau (1) on calcule le coefficient de liquéfaction x :

$$\Delta h_{T_{II}} = h_8 - h_4 = 1340 - 1180 = 160 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{II} = q_{in_2} + q_{a_2} = 28.2 + \left(\frac{4 \cdot 160}{100}\right) = 34.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II} = 125.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 - h_f - q_{in_2} = 1340 - 272 - 28.2 = 1039.8 \text{ kJ/kg}$$

$$X = \frac{\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II}}{h_8 - h_f - q_{in_2}}$$

$$X=12\%$$

- **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P**

La quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P est déterminée par l'équation (2) à l'aide des points relevés sur le tableau (1).

$$q_0 = (\Delta h_{T_{II}} - \Delta h_{T_I}) + (q_{in_1} - q_{in_2}) + q_{a_{1+x}}(h_{1'} - h_{8'})$$

$$q_{in_1} = h_1 - h_{1'}$$

$$q_{in_2} = h_8 - h_{8'}$$

$$q_0 = [(1340-1180)-(4130-4166)] + [(4130-3944)-(1340-1310)] + \frac{-36 \cdot 4}{100} + 0.12 (3944-1310)$$

$$q_0 = 666.64 \text{ kJ/kg}$$

- **Calcul de la consommation d'énergie lors de processus de liquéfaction de l'hydrogène en utilisant l'azote liquide comme gaz de refroidissement préalable.**

Travail de compression isothermique :

$$W_k = \frac{rT_0}{\eta_k} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_k = \frac{4.157(293)(\ln 80)}{0.65} \quad W_k = 8.21 \text{ MJ/kg}$$

Calcul du travail supplémentaire dépensé au niveau de la cuve P du refroidissement préalable.

$$W_{sup} = \frac{q_0}{q_{x_{sup}}} = \frac{666.64}{1.04}$$

$$W_{sup} = 641 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{sup}$$

$$W = 8211 + 641$$

$$W = 8852 \text{ kJ/kg}$$

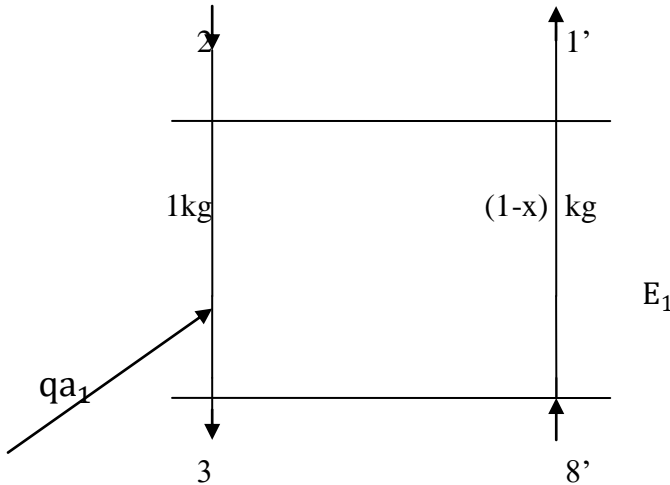
La consommation d'énergie **spécifique** W_0 se rapportera au kg de gaz liquéfié (hydrogène)

$$W_0 = \frac{W}{x}; \quad W_0 = \frac{8852}{0.12}$$

$$W_0 = 73766 \text{ kJ/kg} = 73.76 \text{ MJ/kg}$$

- Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .

Considérons le contour C2 de E_1 sans la cuve de refroidissement préalable P.



$$h_2 + qa_1 + (1-x) h_{8'} = h_3 + (1-x) h_{1'}$$

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x) (h_{8'} - h_{1'}) \quad (3)$$

$$h_3 = 4166 + (4130 - 4166) * \frac{4}{100} + (1 - 0.12) (1310 - 3944)$$

$$h_3 = 1846.54 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture de l'enthalpie du point 3, on détermine la température T_3 sur le diagramme T_s de l'hydrogène.

$$T_3 \approx 128 \text{ K}$$

- Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).

$$h_6 = h_5 = x h_f + (1-x) h_7 \quad (4)$$

A l'aide de l'équation (4) :

$$h_5 = xh_f + (1-x) h_7$$

$$h_5 = 0.12(272) + (1-0.12)712$$

$$h_5 = 659.2 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_5) on trouve

$$T_5 \approx 47\text{K}$$

- **Calcul du rendement thermodynamique de l'installation cryogénique de LINDE avec refroidissement préalable du gaz de travail (l'hydrogène) par l'Azote liquide.**

$$\eta_{th} = \frac{\mathcal{E}_r}{\mathcal{E}_{th}}$$

$$\mathcal{E}_r = \frac{q_x}{W} \text{ Est l'efficacité réelle de l'installation.}$$

$q_x = x (h_1 - h_f)$; Quantité de chaleur que l'on doit enlever d'un gaz à liquéfier pendant sa liquéfaction totale

$$q_x = 0.125(4130-272) = 482.25 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 8864.66 \text{ kJ/kg} \quad \longrightarrow \quad \mathcal{E}_r = \frac{q_x}{W} = \frac{482.25}{8864.66} = 0.0544$$

$$\mathcal{E}_{th} = \frac{q_{xth}}{w_{min}} \text{ Est l'efficacité théorique d'un cycle idéal de liquéfaction.}$$

$$\mathcal{E}_{th} = \frac{h_1 - h_f}{T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\mathcal{E}_{th} = \mathcal{E}_i = \frac{4130 - 270}{293(16.7 - 4.1) * 4.186 - (4130 - 272)} \quad \mathcal{E}_{th} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.0544}{0.332} \quad \longrightarrow \quad \eta_{th} = 16.38\%$$

II.3.2 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=12\text{MPa}$:

On procèdera de la même manière que pour le paragraphe précédent avec tout simplement une pression enfin de compression isothermique plus élevée.

- **Détermination des points figuratifs du cycle :**

Pts	P (MPa)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	12	293	4187
3	12	137	1966
4	12	77	1140
5	12	45	643
6	0.1	20	643
7	0.1	20	712
8	0.1	77	1340
8'	0.1	75	1310
F	0.1	20	272

Tableau II.02 : Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

- **Calcul du coefficient de liquéfaction (X) :**

De l'équation (1) et du tableau (2) on calcule le coefficient de liquéfaction x :

$$\Delta h_{T_{II}} = h_8 - h_4 = 1340 - 1140 = 200 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{II} = q_{in_2} + q_{a_2} = 28.2 + \left(\frac{4 \cdot 200}{100}\right) = 36.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II} = 163.8 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 - h_f - q_{in_2} = 1340 - 272 - 28.2 = 1039.8 \text{ kJ/kg}$$

$$X = \frac{\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II}}{h_8 - h_f - q_{in_2}}$$

$$x=15.75\%$$

- **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P**

La quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P est déterminée par l'équation (2) à l'aide des points relevés sur le tableau (2).

$$q_0 = (\Delta h_{T_{II}} - \Delta h_{T_I}) + (q_{in_1} - q_{in_2}) + q_{a_{1+x}}(h_{1'} - h_{8'})$$

$$q_0 = [(1340-1140)-(4130-4187)] + [(4130-3944)-(1340-1310)] + \frac{-57 \cdot 4}{100} + 0.1575 (3944-1310)$$

$$q_0 = 825.57 \text{ kJ/kg}$$

- **Calcul de la consommation d'énergie lors de processus de liquéfaction de l'hydrogène en utilisant l'azote liquide comme gaz de refroidissement préalable**

Travail de compression iso thermique :

$$W_k = \frac{rT_0}{\eta_k} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_k = \frac{4.157(293)(\ln 120)}{0.65}$$

$$W_k = 8.97 \text{ MJ/kg}$$

Travail supplémentaire

$$W_{sup} = \frac{q_0}{q_{x_{sup}}} = \frac{825.57}{1.04}$$

$$W_{sup} = 793.82 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{sup}$$

$$= 8971 + 793.82$$

$$W = 9764.85 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie spécifique se rapportera au kg de gaz liquéfié (hydrogène)

$$W_0 = \frac{W}{x}$$

$$W_0 = \frac{9764.85}{0.1575}$$

$$W_0 = 61999 \text{ kJ/kg} = 61.99 \text{ MJ/kg}$$

- **Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .**

Température T_3 (sortie E_1) :

A l'aide de l'équation (3) :

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x)(h_8' - h_1')$$

$$h_3 = 4187 + (4130 - 4187) * \frac{4}{100} + (1 - 0.1575)(1310 - 3944)$$

$$h_3 = 1965.57 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_S) on trouve : $T_3 \approx 137 \text{ K}$

- **Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).**

A l'aide de l'équation (4):

$$h_5 = xh_f + (1-x)h_7$$

$$h_5 = 0.1575(272) + (1 - 0.1575)712$$

$$h_5 = 642.7 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_S) on trouve : $T_5 \approx 45 \text{ K}$

- **Calcul du rendement thermodynamique de l'installation cryogénique de LINDE avec refroidissement préalable du gaz de travail (l'hydrogène) par l'Azote liquide saturé.**

$$\eta_{th} = \frac{\mathcal{E}_r}{\mathcal{E}_{th}}$$

$$q_x = x (h_1 - h_f)$$

$$q_x = 0.1575(4130-272) = 607.635 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 9764.85 \text{ kJ/kg} \quad \longrightarrow \quad \epsilon_r = \frac{q_x}{W} = \frac{607.635}{9764.85} = 0.062$$

$$\epsilon_{th} = \frac{h_1 - h_f}{T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\epsilon_{th} = \epsilon_i = \frac{4130 - 270}{293(16.7 - 4.1) * 4.186 - (4130 - 272)} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.062}{0.332} \quad \longrightarrow \quad \eta_{th} = 18.74$$

II.3.3 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=16\text{MPa}$:

La même procédure de calcul précédente est suivie:

- Détermination des points figuratifs du cycle :

Pts	P (MPa)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	16	293	4229
3	16	143	2033
4	16	77	1130
5	16	47	638
6	0.1	20	638
7	0.1	20	712
8	0.1	77	1340
8'	0.1	75	1310
f	0.1	20	272

Tableau II.03 : Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

- **Calcul du coefficient de liquéfaction (X)**

De l'équation (1) et du tableau (3) on calcule le coefficient de liquéfaction x :

$$\Delta h_{T_{II}} = h_8 - h_4 = 1340 - 1130 = 210 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{II} = q_{in_2} + q_{a_2} = 28.2 + \left(\frac{4 \cdot 210}{100}\right) = 36.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II} = 173.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 - h_f - q_{in_2} = 1340 - 272 - 28.2 = 1039.8 \text{ kJ/kg}$$

$$x = \frac{\Delta h_{T_{II}} - \sum q_{II}}{h_8 - h_f - q_{in_2}}$$

$$x = 16.77\%$$

- **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P**

La quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P est déterminée par l'équation (2) à l'aide des points relevés sur le tableau (3).

$$q_0 = (\Delta h_{T_{II}} - \Delta h_{T_I}) + (q_{in_1} - q_{in_2}) + q_{a_1} + x(h_{1'} - h_{8'})$$

$$q_0 = [(1340 - 1130) - (4130 - 4229)] + [(4130 - 3944) - (1340 - 1310)] + \frac{-99 \cdot 4}{100} + 0.1677 (3944 - 1310)$$

$$q_0 = 892.76 \text{ kJ/kg}$$

- **Calcul de la consommation d'énergie lors de processus de liquéfaction de l'hydrogène en utilisant l'azote liquide comme gaz de refroidissement préalable**

Travail de compression iso thermique :

$$W_k = \frac{rT_0}{\eta_k} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$W_k = \frac{4.157(293)(\ln 160)}{0.65}$$

$$W_k = 9.51 \text{ MJ/kg}$$

Travail supplémentaire dépensé au niveau de la cuve P du refroidissement préalable.

$$W_{\text{sup}} = \frac{q_0}{qx_{\text{sup}}}$$

$$W_{\text{sup}} = \frac{q_0}{qx_{\text{sup}}} = \frac{892.76}{1.04}$$

$$W_{\text{sup}} = 858.42 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{\text{sup}}$$

$$= 9510 + 858.42$$

$$W = 10368.42 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie spécifique se rapportera au kg de gaz liquéfié (hydrogène)

$$W_0 = \frac{W}{x}$$

$$W_0 = \frac{10368.42}{0.1677}$$

$$W_0 = 61827.22 \text{ kJ/kg} = 61.82 \text{ MJ/kg}$$

- **Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .**

Température T_3 (sortie E_1) :

A l'aide de l'équation (3) :

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x)(h_8' - h_1')$$

$$h_3 = 4229 + (4130 - 4229) * \frac{4}{100} + (1 - 0.1677)(1310 - 3944)$$

$$h_3 = 2032.76 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_3) on trouve : $T_3 \approx 143 \text{ K}$

- **Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).**

A l'aide de l'équation (4) :

$$h_5 = xh_f + (1-x) h_7$$

$$h_5 = 0.1677(272) + (1-0.1677)712$$

$$h_5 = 638.21 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_5) on trouve : $T_5 \approx 47 \text{ K}$

- **Calcul du rendement thermodynamique de l'installation cryogénique de LINDE avec refroidissement préalable du gaz de travail (l'hydrogène) par l'azote liquide saturé :**

$$\text{saturé : } \eta_{th} = \frac{\mathcal{E}_r}{\mathcal{E}_{th}}$$

$$q_x = x (h_1 - h_f)$$

$$q_x = 0.1677(4130-272) = 646.98 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 10368.42 \text{ kJ/kg} \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E}_r = \frac{q_x}{W} = \frac{646.98}{10368.42} = 0.0624$$

$$\mathcal{E}_r = \mathcal{E}_{th} = \frac{h_1 - h_f}{T_0(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)}$$

$$\mathcal{E}_{th} = \mathcal{E}_i = \frac{4130 - 270}{293(16.7 - 4.1) * 4.186 - (4130 - 272)} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.0624}{0.332} \quad \Rightarrow \quad \eta_{th} = 18.79 \%$$

Les principaux résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique étudiée sont représentés sur le tableau 4.

P_2 (MPa)	Grandeurs thermodynamiques.				
	X (%)	q_0 (kJ/kg)	W (kJ/kg)	W_0 (MJ/kg)	η_{th} (%)
8	12.0	666.14	8852	73.76	15.75
12	15.75	825.42	9764.85	61.99	18.74
16	16.77	892.76	10368.42	61.82	18.79

Tableau II. 04 : Récapitulatif des résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique.

Commentaire :

D'après ces résultats on remarque que quand la pression P_2 augmente :

- le coefficient de liquéfaction (X) augmente,
- la quantité de chaleur extraite q_0 durant le refroidissement préalable croit ;
- la consommation d'énergie spécifique W_0 diminue ;
- le rendement thermodynamique de l'installation cryogénique s'améliore nettement et tend à se stabiliser dans l'intervalle 12 à 16 MPa au niveau duquel se situe la pression d'inversion de l'hydrogène.

II.4 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant avec deux étages de refroidissement préalable.

Le calcul thermodynamique sera effectué pour le cycle utilisant le refroidissement préalable de l'hydrogène par l'azote liquide saturé à 77 K et l'azote sous vide à 65 K (fig3).

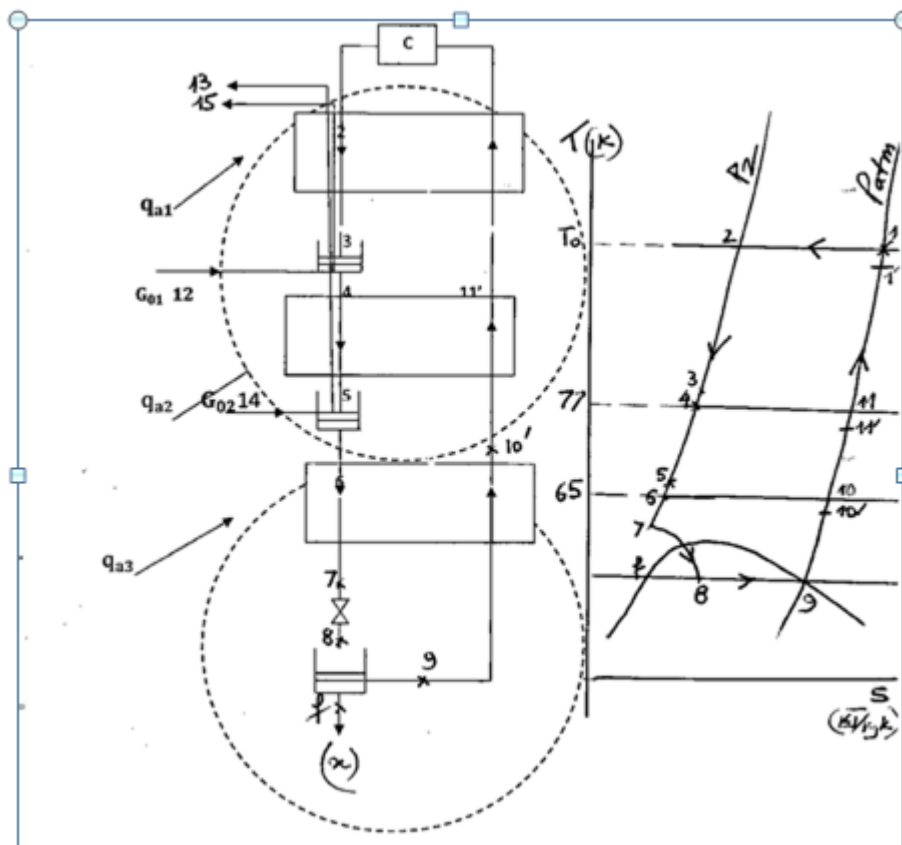


Figure II.3 : processus de liquéfaction de l'hydrogène (ES) par l'azote liquide et l'azote sous vide et diagramme (TS) associé au processus.

- **Détermination de la quantité de gaz hydrogène liquéfié (x) : Coefficient de liquéfaction**

Considérons le contour (C_1) du dernier étage du processus, faisons le bilan énergétique en régime permanent : Sortie – Entrée = 0

$$\text{Sortie} = \text{Entrée}$$

$$h_6 + qa_3 = x h_f + (1-x) h_{10}'$$

$$h_{10} - h_{10}' = c_p \Delta T_{10-10}' = qin_3$$

$$h_6 + qa_3 = x h_f + (1-x) (h_{10} - qin_3)$$

$$h_6 + qa_3 = x h_f + h_{10} - qin_3 - xh_{10} + xqin_3$$

$$x (h_{10} - h_f - qin_3) = h_{10} - h_6 - qin_3 - qa_3$$

$$h_{10} - h_6 = \Delta h_{TIII} : \text{effet isothermique d'étranglement du 3^{ème} étage.}$$

$$qin_3 + qa_3 = \sum q_3 : \text{la somme des pertes du 3^{ème} étage.}$$

$$X = \frac{\Delta h_{TIII} - \sum q_3}{h_{10} - h_f - qin_3} \quad (5)$$

- **Calcul de la quantité de chaleur extraite au niveau des 02 cuves de refroidissement préalable : q_0**

$$q_0 = G_{01}(h_{13} - h_{12}) + G_{02}(h_{15} - h_{14})$$

Considérons le contour C_2 des cuves et de l'échangeur E_2 et faisons le bilan énergétique :

$$h_2 + qa_1 + qa_2 + (1-x) h_{10}' + G_{01}h_{12} + G_{02}h_{14} = h_6 + (1-x) h_{10}' + G_{01}h_{13} + G_{02}h_{15}$$

$$G_{01}h_{13} - G_{01}h_{12} + G_{02}h_{15} - G_{02}h_{14} + h_6 + (1-x)h_{10}' = h_2 + qa_1 + qa_2 + (1-x) h_{10}'$$

$$q_0 = (h_2 - h_6) + (q_{a1} + q_{a2}) + (1-x)(h_{10}' - h_1')$$

$$\mathbf{q_0 = (h_2 - h_6) + (q_{a1} + q_{a2}) + (1-x)(h_{10}' - h_1')} \quad \mathbf{(6)}$$

En prenant en considération les caractéristiques données de l'installation cryogénique on aura les effets isothermiques d'étranglement :

$$\Delta h_{TI} = h_1 - h_2$$

$$\Delta h_{TII} = h_{11} - h_4$$

$$\Delta h_{TIII} = h_{10} - h_6$$

$$q_{in1} = C_p \Delta T_1 = 14.1 * 13 = 183.3 \text{ kJ/kg.}$$

$$q_{in2} = C_p \Delta T_2 = 14.1 * 2 = 28.2 \text{ kJ/kg.}$$

$$q_{in3} = C_p \Delta T_3 = 14.1 * 1 = 14.1 \text{ kJ/kg.}$$

II.4.1. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=8\text{MPa}$:

- **Détermination des points figuratifs du cycle de l'installation cryogénique :**

Pts	P (MP _a)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	8	293	4166
3	8	146	2083
4	8	77	1180
5	8	52	1082
6	8	65	984
7	8	43	624
8	0.1	20	624
9	0.1	20	712
10	0.1	65	1193
10'	0.1	64	1179
11	0.1	77	1340

11'	0.1	75	1310
f	0.1	20	272

Tableau II.05: Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

Caractéristiques données de l'installation cryogénique:

$$\begin{array}{l}
 h_2 = 4166 \text{ kJ/kg} \\
 h_{1'} = 3944 \text{ kJ/kg}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l}
 q_{a1} = -1.44 \\
 q_{a1} = 6.4
 \end{array} \right.$$

$$h_{10} = 1193 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10'} = 1179 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 984 \text{ kJ/kg} \quad \longrightarrow \quad \Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 209 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in3} = h_{10} - h_{10'} = 14 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{a3} = 4\% \Delta h_{T_{III}} = 4\% \cdot 209 = 8.36 \text{ kJ/kg}$$

• **Calcul du coefficient de liquéfaction (X) :**

$$\Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 1193 - 984 = 209 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{III} = q_{in3} + q_{a3} = 14 + \left(\frac{4 \cdot 209}{100}\right) = 22.36 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III} = 186.64 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} - h_f - q_{in3} = 1193 - 272 - 14 = 907 \text{ kJ/kg}$$

$$X = \frac{\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III}}{h_{10} - h_f - q_{in3}}$$

$$X = 20.57 \%$$

• **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau de la cuve P :**

La quantité de la chaleur extraite au niveau des cuves est déterminée par l'équation (6) à l'aide des points relevés sur le tableau (9).

$$q_0 = (h_2 - h_6) + (q_{a1} + q_{a2}) + (1-x)(h_{10}' - h_{1'})$$

$$q_0 = (4166 - 984) + (-1.44 + 6.4) + (1 - 0.2057)(1179 - 3944)$$

$$q_0 = 1002.61 \text{ kJ/kg.}$$

- **Calcul de la consommation d'énergie**

$$W_k = \frac{4.157(293)(\ln 80)}{0.65} \quad W_k = 8.21 \text{ MJ/kg}$$

Travail supplémentaire :

$$W_{\text{sup}} = \frac{q_0}{qx_{\text{sup}}} = \frac{1002.61}{1.04}$$

$$W_{\text{sup}} = 964 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{\text{sup}}$$

$$W = 8211 + 964$$

$$W = 9175 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie spécifique sera :

$$W_0 = \frac{W}{x}$$

$$W_0 = \frac{9175}{0.2057}$$

$$W_0 = 44603.79 \text{ kJ/kg} = 44.60 \text{ MJ/kg}$$

- **Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .**

Considérons le contour C2 de E_1 sans la cuve de refroidissement préalable P.

$$h_2 + qa_1 + (1-x) h_{11}' = h_3 + (1-x) h_1'$$

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x) (h_{11}' - h_1')$$

$$h_3 = 4166 + (4130 - 4166) * \frac{4}{100} + (1 - 0.2057) (1310 - 3944)$$

$$h_3 = 2083.7 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture de l'enthalpie du point 3, on détermine la température T_3 sur le diagramme T_s de l'hydrogène.

$$T_3 \approx 146 \text{ K}$$

- **Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).**

$$h_4 + qa_2 + (1-x) h_{10'} = h_5 + (1-x) h_{11'}$$

$$h_5 = h_4 + qa_2 + (1-x)(h_{10'} - h_{11'})$$

$$h_3 = 1180 + (1340 - 1180) * \frac{4}{100} + (1 - 0.2057)(1179 - 1310)$$

$$h_5 = 1082.91 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_s) on trouve

$$T_5 \approx 53 \text{ K}$$

- **Détermination de la température T_7 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_3 contour (C4).**

$$h_7 = h_8 = xh_f + (1-x) h_9$$

$$h_7 = 0.20(272) + (1 - 0.20)712$$

$$h_7 = 624 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_s) on trouve

$$T_7 \approx 43 \text{ K}$$

- **Calcul du rendement thermodynamique de l'installation**

$q_x = x (h_1 - h_f)$; Quantité de chaleur que l'on doit enlever d'un gaz à liquéfier pendant sa liquéfaction totale

$$q_x = 0.20(4130 - 272) = 771.6 \text{ kJ/kg}$$

$$W=9175 \text{ kJ/kg} \quad \longrightarrow \quad \epsilon_r = \frac{q_x}{w} = \frac{771.6}{9175} = 0.0840$$

$$\epsilon_{th} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.0840}{0.332} \quad \longrightarrow \quad \eta_{th} = 25.30\%$$

II.4.2. Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2=12\text{MPa}$:

- Détermination des points figuratifs du cycle de l'installation cryogénique

Pts	P (MP _a)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	12	293	4187
3	12	156	2209
4	12	77	1140
5	12	51	1048
6	12	65	942
7	12	41	602
8	0.1	20	602
9	0.1	20	712
10	0.1	65	1193
10'	0.1	64	1179
11	0.1	77	1340
11'	0.1	75	1310
f	0.1	20	272

Tableau II.06 : Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

Caractéristiques de l'installation cryogénique:

$$h_2 = 4187 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} = 1193 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10'} = 1179 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 942 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad \Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 251 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in3} = h_{10} - h_{10'} = 14 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{a3} = 4\% \Delta h_{T_{III}} = 4\% \cdot 251 = 10.04 \text{ kJ/kg}$$

• **Calcul du coefficient de liquéfaction (X) :**

$$\Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 1193 - 942 = 251 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{III} = q_{in3} + q_{a3} = 14 + \left(\frac{4 \cdot 251}{100}\right) = 24.04 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III} = 226.96 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} - h_f - q_{in3} = 1193 - 272 - 14 = 907 \text{ kJ/kg}$$

$$X = \frac{\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III}}{h_{10} - h_f - q_{in3}}$$

$$X = 25 \%$$

• **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau des cuves :**

La quantité de la chaleur extraite au niveau des cuves est déterminée par l'équation (6) à l'aide des points relevés sur le tableau (10).

$$q_0 = (h_2 - h_6) + (q_{a1} + q_{a2}) + (1-x)(h_{10}' - h_1')$$

$$q_0 = (4187 - 942) + (-1.44 + 6.4) + (1 - 0.25)(1179 - 3944)$$

$$q_0 = 1176.21 \text{ kJ/kg.}$$

• **Calcul de la consommation d'énergie**

$$W_{sup} = \frac{q_0}{q_{x_{sup}}} = \frac{1176.26}{1.04}$$

$$W_{\text{sup}} = 1131 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{\text{sup}}$$

$$W = 8971 + 1131$$

$$W = 10102 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie spécifique se rapportera au kg de gaz liquéfié (hydrogène)

$$W_0 = \frac{W}{x}$$

$$W_0 = \frac{10102}{0.25}$$

$$W_0 = 40408 \text{ kJ/kg} = 40.40 \text{ MJ/kg}$$

- **Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .**

Considérons le contour C2 de E_1 sans la cuve de refroidissement préalable P.

$$h_2 + qa_1 + (1-x) h_{11}' = h_3 + (1-x) h_1'$$

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x) (h_{11}' - h_1')$$

$$h_3 = 4187 + (4130 - 4187) * \frac{4}{100} + (1 - 0.25) (1310 - 3944)$$

$$h_3 = 2209.22 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture de l'enthalpie du point 3, on détermine la température T_3 sur le diagramme T_s de l'hydrogène.

$$T_3 \approx 156 \text{ K}$$

- **Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).**

$$h_4 + qa_2 + (1-x) h_{10}' = h_5 + (1-x) h_{11}'$$

$$h_5 = h_4 + qa_2 + (1-x) (h_{10}' - h_{11}')$$

$$h_3 = 1140 + (1340 - 1140) * \frac{4}{100} + (1 - 0.25) (1179 - 1310)$$

$$h_5 = 1048.55 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_S) on trouve

$$T_5 \approx 51\text{K}$$

- Détermination de la température T_7 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_3 contour (C4).

$$h_7 = h_8 = x h_f + (1 - x) h_9$$

$$h_7 = 0.25(272) + (1 - 0.25)712$$

$$h_7 = 602 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_S) on trouve

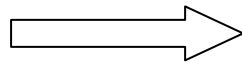
$$T_7 \approx 41\text{K}$$

Calcul du rendement thermodynamique de l'installation cryogénique

$$q_x = x (h_1 - h_f);$$

$$q_x = 0.25(4130 - 272) = 964.5 \text{ kJ/kg}$$

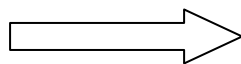
$$W = 10102 \text{ kJ/kg}$$



$$\epsilon_r = \frac{q_x}{W} = \frac{964.5}{10102} = 0.0954$$

$$\epsilon_{th} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.0954}{0.332}$$



$$\eta_{th} = 28.73\%$$

II.4.3 Calcul des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique fonctionnant à $P_2 = 16\text{MPa}$:

- Détermination des points figuratifs du cycle de l'installation cryogénique

Pts	P (MP _a)	T (K)	H (kJ/kg)
1	0.1	293	4130
1'	0.1	280	3944
2	16	293	4229
3	16	163	2302
4	16	77	1130
5	16	50	1042
6	16	65	921
7	16	44	593
8	0.1	20	593
9	0.1	20	712
10	0.1	65	1193
10'	0.1	64	1179
11	0.1	77	1340
11'	0.1	75	1310
f	0.1	20	272

Tableau II.07: Points figuratifs du cycle de liquéfaction de l'hydrogène.

Caractéristiques de l'installation cryogénique:

$$h_2 = 4229 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} = 1193 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10'} = 1179 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = 921 \text{ kJ/kg} \quad \Longrightarrow \quad \Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 272 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{in3} = h_{10} - h_{10'} = 14 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{a3} = 4\% \Delta h_{T_{III}} = 4\% \cdot 272 = 10.88 \text{ kJ/kg}$$

- **Calcul du coefficient de liquéfaction (X) :**

$$\Delta h_{T_{III}} = h_{10} - h_6 = 1193 - 921 = 272 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum q_{III} = q_{in3} + q_{a3} = 14 + \left(\frac{4 \cdot 272}{100} \right) = 24.88 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III} = 247.12 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} - h_f - q_{in3} = 1193 - 272 - 14 = 907 \text{ kJ/kg}$$

$$X = \frac{\Delta h_{T_{III}} - \sum q_{III}}{h_{10} - h_f - q_{in3}}$$

$$X = 27.24 \%$$

- **Calcul de la quantité de la chaleur extraite au niveau des cuves R P :**

La quantité de la chaleur extraite au niveau des cuves P est déterminée par l'équation (6) à l'aide des points relevés sur le tableau (11).

$$q_0 = (h_2 - h_6) + (q_{a1} + q_{a2}) + (1-x)(h_{10}' - h_1')$$

$$q_0 = (4229 - 921) + (-1.44 + 6.4) + (1 - 0.27)(1179 - 3944)$$

$$q_0 = 1294.51 \text{ kJ/kg.}$$

- **Calcul de la consommation d'énergie**

Travail supplémentaire :

$$W_{sup} = \frac{q_0}{q_{x_{sup}}} = \frac{1294.51}{1.04}$$

$$W_{sup} = 1244.72 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie est donc :

$$W = W_k + W_{sup}$$

$$W = 9510 + 1244.72$$

$$W = 10754.72 \text{ kJ/kg}$$

La consommation d'énergie spécifique se rapportera au kg de gaz liquéfié (hydrogène)

$$W_0 = \frac{W}{x}$$

$$W_0 = \frac{10754.72}{0.27}$$

$$W_0 = 39832.29 \text{ kJ/kg} = 39.83 \text{ MJ/kg}$$

- Détermination de la température T_3 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_1 .

Considérons le contour C2 de E_1 sans la cuve de refroidissement préalable P.

$$h_2 + qa_1 + (1-x) h_{11}' = h_3 + (1-x) h_1'$$

$$h_3 = h_2 + qa_1 + (1-x) (h_{11}' - h_1')$$

$$h_3 = 4229 + (4130 - 4229) * \frac{4}{100} + (1 - 0.27) (1310 - 3944)$$

$$h_3 = 2302.22 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture de l'enthalpie du point 3, on détermine la température T_3 sur le diagramme T_s de l'hydrogène.

$$T_3 \approx 163 \text{ K}$$

- Détermination de la température T_5 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_2 contour (C4).

$$h_4 + qa_2 + (1-x) h_{10}' = h_5 + (1-x) h_{11}'$$

$$h_5 = h_4 + qa_2 + (1-x)(h_{10}' - h_{11}')$$

$$h_5 = 1130 + (1340 - 1130) * \frac{4}{100} + (1 - 0.27) (1179 - 1310)$$

$$h_5 = 1042.77 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_s) on trouve

$$T_5 \approx 50 \text{ K}$$

- Détermination de la température T_7 de l'hydrogène à la sortie de l'échangeur E_3 contour (C4).

$$h_7 = h_8 = x h_f + (1-x) h_9$$

$$h_7 = 0.27(272) + (1-0.27)712$$

$$h_7 = 593.2 \text{ kJ/kg}$$

Par lecture (T_S) on trouve $T_7 \approx 44\text{K}$

Calcul du rendement thermodynamique de l'installation cryogénique

$$q_x = x (h_1 - h_f);$$

$$q_x = 0.27(4130-272) = 1041.66 \text{ kJ/kg}$$

$$W = 10754 \text{ kJ/kg} \quad \longrightarrow \quad \epsilon_r = \frac{q_x}{W} = \frac{1041.66}{10754} = 0.0968$$

$$\epsilon_{th} = 0.332$$

$$\eta_{th} = \frac{0.0968}{0.332} \quad \longrightarrow \quad \eta_{th} = 29.15\%$$

Les principaux résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique à 2 étages de refroidissement préalable utilisant l'azote liquide saturé à 77 K et l'azote sous vide à 65 K sont représentés sur le tableau 12.

P_2 (MPa)	Grandeurs thermodynamiques.				
	X (%)	q_0 (kJ/kg)	W (kJ/kg)	W_0 (MJ/kg)	η_{th} (%)
8	20.57	1002.61	9175	44.60	25.30
12	25	1176.21	10102	40.40	28.73
16	27.24	1294.51	10754	39.83	29.15

Tableau II.08: Récapitulatif des résultats des calculs des caractéristiques thermodynamiques de l'installation cryogénique

Conclusion :

D'après ces résultats on remarque que :

- le rendement thermodynamique de l'installation cryogénique fonctionnant avec deux étages de refroidissement préalable est bien plus élevé que celui d'une installation cryogénique fonctionnant avec un seul étage.
- Le refroidissement préalable du gaz de travail multi-étagé améliore les performances des installations cryogéniques par la diminution de la consommation d'énergie spécifique et l'accroissement du rendement thermodynamique.

Chapitre III

Dimensionnement des principaux équipements de l'installation cryogénique.

III.1 Introduction :

Afin de maîtriser le processus de liquéfaction de l'hydrogène, il serait intéressant de procéder au dimensionnement des principaux équipements de l'installation de liquéfaction de l'hydrogène, à savoir les compresseurs et les échangeurs cryogéniques utilisés.

III.2. Pré dimensionnement d'un compresseur :

La sélection d'un compresseur isothermique, muni d'un refroidisseur doit obéir aux conditions opératoires de l'installation cryogénique. Il serait utile de définir le débit, le taux de compression et approximativement le diamètre de la machine, sa vitesse de rotation ou encore le nombre d'étages.

III.2.1 Calcul les caractéristiques thermodynamiques du compresseur à $P_2=8\text{MPa}$:

- **Débit massique d'hydrogène :**

Supposons: $Q_V=50000 \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_V= 16.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{p}{\rho} = r T, \quad T_0 = 293 \quad \Longrightarrow \quad \rho_0 = \frac{P}{r T} = \frac{10^5}{4157 \times 293} = \mathbf{0.0821 \text{ kg/m}^3}$$

$$\dot{m} = \rho v$$

$$\dot{m} = 16.67 \times 0.0821 \quad \Longrightarrow \quad \dot{m} = \mathbf{1.37 \text{ kg/s}}$$

- **Puissance du compresseur :**

$$P = m W_k = 1.37 \times 8211 = 11279 \text{ kW}$$

$$\mathbf{P = 11.27 \text{ MW}}$$

- **Taux de compression par étage :**

Pour un compresseur centrifuge à 5 étages :

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{80}{1}$$

$$\tau = (\tau_1) \times (\tau_2) \times (\tau_3) \times (\tau_4) \times (\tau_5) = 80 \text{ bars}$$

$$\tau = 80^{1/5} = 2.40$$

$$\tau = 2.40 \text{ bar}$$

- **Choix du matériau :** on opte pour l'acier inoxydable :

$$R_p = 1244 \text{ MPa} \text{ limite élastique}$$

$$\rho = 7780 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

- **Calcul de la vitesse périphérique limite de la roue :**

$$u = \sqrt{\frac{R_p}{S}} = \sqrt{\frac{1244 \times 10^5}{7780}}$$

$$U = 400 \text{ [m/s]}$$

- **Calcul la vitesse de rotation du compresseur :**

$$U = R \omega$$

$$\text{Supposons : } R = 0.65 \text{ m}$$

La vitesse angulaire sera:

$$\omega = \frac{u}{R} = \frac{400}{0.65}$$

$$\omega = 615.38 \text{ m/s}$$

$$\omega = \frac{2 \pi N}{60} \quad \Rightarrow \quad N = \frac{60 \omega}{2 \pi} = \frac{60 \times 615.38}{6.28} = 5879 \text{ tr/min}$$

$$N = 5879 \text{ tr/min}$$

III.2.2 Calcul les caractéristiques thermodynamiques à $P_2 = 12 \text{ MPa}$:

$$\text{On a: } Q_V = 50000 \text{ [m}^3\text{/h]} \quad \Rightarrow \quad Q_V = 16.67 \text{ m}^3\text{/s}$$

$$\frac{p}{\rho} = r T, \quad T_0 = 293 \quad \Rightarrow \quad \rho_0 = \frac{P}{r T} = \frac{10^5}{4157 \times 293} = 0.0821 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_0 = 0.0821 \text{ Kg/m}^3$$

$$P = \dot{m} W_k = 1.37 \times 8970 = 12288 \text{ [KW]}$$

$$P = 12.28 \text{ MW}$$

- **Choix du compresseur à 5 étages :**

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{120}{1}$$

$$\tau = (\tau_1) \times (\tau_2) \times (\tau_3) \times (\tau_4) \times (\tau_5) = 120 \text{ bars}$$

$$\tau = 120^{1/5} = 2.60$$

$$\tau = 2.60 \text{ bar}$$

III.2.3 Calcul les caractéristiques thermodynamiques à $P_2=16 \text{ MPa}$:

On a: $Q_V=50000 \text{ [m}^3\text{/h]}$ \longrightarrow $Q_V= 16.67 \text{ [m}^3\text{/s]}$

$$\frac{p}{\rho} = r T, \quad T_0 = 293 \quad \longrightarrow \quad \rho_0 = \frac{P}{r T} = \frac{10^5}{4157 \times 293} = 0.0821 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$P = \dot{m} W_k = 1.37 \times 9510 = 13028 \text{ [KW]}$$

$$P = 13 \text{ [MW]}$$

- **Choix du compresseur à 5 étages :**

$$\tau = \frac{P_2}{P_1} = \frac{160}{1}$$

$$\tau = (\tau_1) \times (\tau_2) \times (\tau_3) \times (\tau_4) \times (\tau_5) = 160 \text{ bars}$$

$$\tau = 160^{1/5} = 2.75$$

$$\tau = 2.75 \text{ bar}$$

Résultats du pré-dimensionnement du compresseur :

P (MPa)	W_k KJ/kg	m kg/s	P MW	τ par étage
8	8211	1.37	11.27	2.40
12	8970	1.37	12.28	2.60
16	9510	1.37	13	2.75

Tableau III.1 : Caractéristiques des compresseurs centrifuges à 5 étages.

III.3. Dimensionnement de l'échangeur à tubes et calandre :

Le dimensionnement et le choix des échangeurs de chaleur est complexe et dépendra de plusieurs facteurs citons entre autres :

- La grande diversité des appareils (échangeurs tubulaires, à plaques, etc.)

- la variété des régimes d'écoulement : simple phase en régime laminaire ou turbulent, avec ou sans effet de convection naturelle, diphasique en évaporation ou en condensation, condensation avec ou sans incondensables, mélanges de fluides, etc.
- Le nombre important des configurations d'écoulement, pouvant aller bien au-delà de deux fluides dans le cas d'un échangeur compact, par exemple.

La conception d'un échangeur de chaleur peut être divisée essentiellement en trois parties :

- l'analyse ou le calcul thermique et géométrique.
- la conception préliminaire mécanique.
- la conception finale aux fins de fabrication.

La première partie est celle qui nous concernera car elle portera sur le calcul de la surface d'échange requise pour chaque échangeur utilisé afin d'assurer le bon déroulement du transfert et les échanges thermiques au sein de l'installation cryogénique étudiée.

III.4. Dimensionnement d'un échangeur type à tubes et calandre :

Dans notre cas on va utiliser la méthode de KERN (DTLM) destinée pour le dimensionnement, en connaissant les quatre températures des deux fluides au niveau des entrées et sorties de l'échangeur, et dont le but est de rechercher la géométrie (conception) de l'échangeur. [6], [7]

On se limitera au dimensionnement d'un seul échangeur de chaleur, celui d'entrée (1^{er} étage) à différents niveaux de pression. Le reste du dimensionnement est similaire.

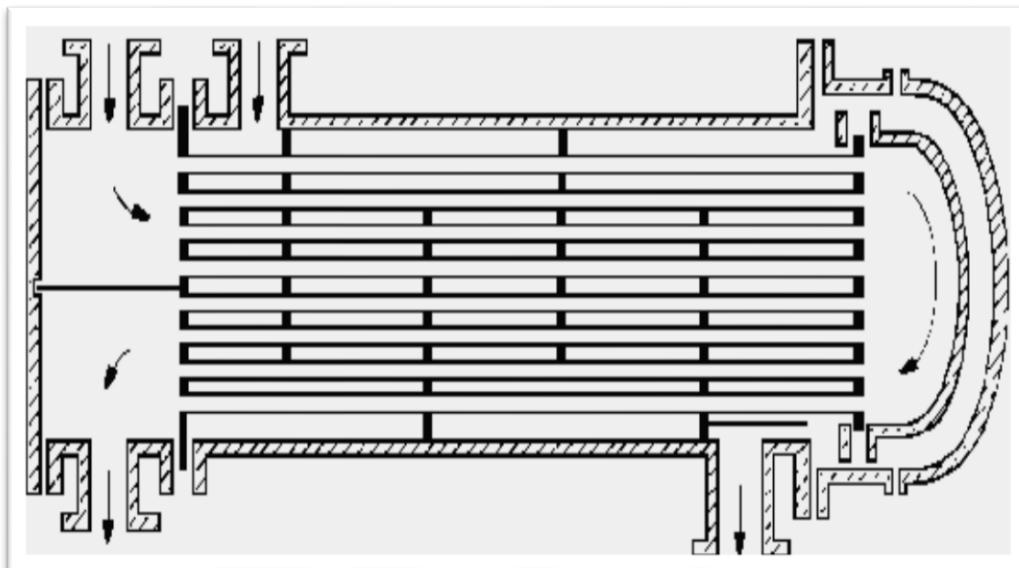


Figure III.1 : Echangeur à tube et calandre.

➤ III.4.1 Dimensionnement au niveau P=8MPa :

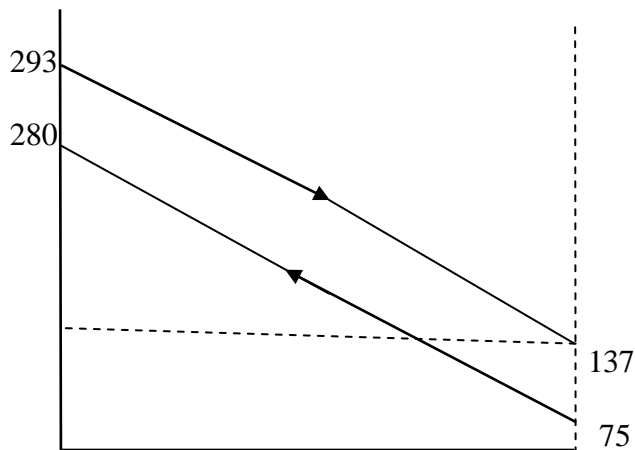


Figure III.2 : évolutions des températures dans un échangeur à contre –courant.

➤ Calcul thermique:

	Fluide chaud	Fluide froid
Débit	1.37	1.37
T_e (C°)	-198	20
T_s (C°)	7	-136
Cp	14.1	14.1

Tableau III.2 : Paramètres de fonctionnement de l'échangeur E1 de l'installation

▪ Choix d'écoulement des fluides (côté tubes ou calandre) :

- ✓ Côté tubes : fluide froid.
- ✓ Côté calandre : fluide chaud.

Bilan thermique :

On a la relation suivante : $Q = mC_p \Delta T$

à $P_2=8MPa$: $X=12\%$:

$$Q_C = (1-x) \times 14.1 \times (280-75)$$

$$Q_C = mC_p \Delta T \implies Q_C = 1.37 \times 0.88 \times 14.1 \times (280-75)$$

$$Q_c = 3484.78 \text{ kW} = 3.48 \text{ MW}$$

$$Q_f = mC_p \Delta T \longrightarrow 1.37 \times 14.1 \times (128 - 293)$$

$$Q_f = 3187.305 \text{ kW} = 3.19 \text{ MW}$$

La différence entre les deux quantités de chaleur est constitué par l'apport de chaleur du à l'environnement externe, à l'extraction de la chaleur par refroidissement préalable et aux pertes thermiques

Soit, k est le coefficient des pertes thermiques de l'échangeur :

$$k = \frac{Q_f}{Q_c} = 0.91$$

- **Calcul de la différence logarithmique moyenne de température:**

$$DTLM = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)}$$

$$DTLM = \frac{(-198 + 145) - (7 - 20)}{\ln\left(\frac{-198 + 145}{7 - 20}\right)}$$

$$DTLM = 28.57 \text{ }^\circ\text{C}$$

- **Détermination du coefficient correctif et le nombre des passes:**

On détermine le coefficient correctif d'après le graphe de dépendance des paramètres auxiliaires (R, E), voir [annexe N° 5].

R : Ratio thermique.

E : l'efficacité de transfert de l'échangeur.

$$R = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{sf} - T_{ef}}$$

$$R = \frac{75 - 280}{128 - 293} =$$

$$R = 1,24$$

$$E = \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}}$$

$$E = \frac{128 - 293}{75 - 293} =$$

$$E = 0,75$$

Les valeurs E, R se croisent dans l'abaque de l'échangeur tubulaire 4 passes côté calandre et 8 passes côté tube. On obtient le facteur de correction **F = 0,25**

$$\mathbf{DTLM_{Corrigé} = (DTLM).f = 7.14 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Avec : U_s' coefficient de transfert sale.

$$U_s' = 1835 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Q = 3484780 \text{ W}$$

$$A = \frac{Q}{U_s' \cdot f \cdot \text{DTLM}} = \frac{3484780}{1835 \times 7.14} = 266 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{A = 266 \text{ m}^2}$$

Selon le standard TEMA et les échangeurs commerciaux, on propose un échangeur de chaleur dont les caractéristiques des tubes sont [Annexe 10]:

- Matériau de construction : acier au carbone
- Diamètre extérieur : $\frac{3}{4}$ '' $d_e = 19,05 \text{ mm}$
- Diamètre intérieur : $d_i = 15,70 \text{ mm}$
- Epaisseur : $1,65 \text{ mm}$
- Longueur utile : $l = 20 \text{ ft} = 6,10 \text{ mm}$
- Disposition : Pas triangulaire
- Le pas : $P = 23,8 \text{ mm}$

- **Calcul de la surface d'échange d'un tube :**

$$a = \pi \cdot d_o \cdot l$$

Avec :

$$d_e = 19,05 \text{ mm}$$

$$l = 6,10 \text{ mm}$$

$$\mathbf{AN : a = 0,37 \text{ m}^2}$$

- **Nombre des tubes par calandre :**

$$N_t' = \frac{A}{a \cdot n_c} = \frac{266}{0,37 \times 4} = 179,72$$

Avec : n_c est le nombre des passes côté calandre

$$N_t' = 180 \text{ tubes}$$

➤ **III.4.2 Dimensionnement au niveau P=12MPa :**

à P₂=12MPa : **X=15.75%**:

$$Q_c = (1-x) \times 14.1 \times (280-75)$$

$$Q_c = mC_p \Delta T \implies Q_c = 1.37 \times 0.8425 \times 14.1 \times (280-75)$$

$$Q_c = 3336.28 \text{ kW} = 3.33 \text{ MW}$$

$$Q_f = mC_p \Delta T \implies 1.37 \times 14.1 \times (137-293)$$

$$Q_f = 3013.452 \text{ KW} = 3.01 \text{ MW}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)}$$

$$DTLM = \frac{(-198+136)-(7-20)}{\ln\left(\frac{-198+136}{7-20}\right)}$$

$$DTLM = 31 \text{ °C}$$

$$k = \frac{Q_f}{Q_c} = 0.90$$

- **Calcul de la différence logarithmique moyenne de température :**

$$R = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{sf} - T_{ef}}$$

$$R = \frac{75 - 280}{137 - 293} =$$

$$R = 1,31$$

$$E = \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}}$$

$$E = \frac{137 - 293}{75 - 293} =$$

$$E = 0,71$$

Les valeurs E, R se croisent dans l'abaque de l'échangeur tubulaire 4 passes côté calandre et 8 passes côté tube. On obtient le facteur de correction **F = 0,2**

$$\mathbf{DTLM_{Corrigé} = (DTLM).f = 6.2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- **Calcul de la surface d'échange d'un tube :**

$$A = \frac{Q}{U_s' \cdot f \cdot DTLM} = \frac{3336280}{1835 \times 0.2} = 293.24 \text{ m}^2$$

$$\mathbf{A = 293 \text{ m}^2}$$

- **Nombre des tubes par calandre :**

$$N_t' = \frac{A}{a_{nc}} = \frac{293}{0,37 \times 4} = 197,97$$

Avec : n_c est le nombre des passes côté calandre

$$\mathbf{N_t' = 198 \text{ tubes}}$$

➤ **III.4.3 Dimensionnement au niveau P=16MPa :**

à $P_2=16\text{MPa}$: **x=16.77%**:

$$Q_c = (1-x) \times 14.1 \times (280-75)$$

$$Q_c = mC_p \Delta T \longrightarrow Q_c = 1.37 \times 0.8323 \times 14.1 \times (280-75)$$

$$\mathbf{Q_c = 3295.89 \text{ kW} = 3.29 \text{ MW}}$$

$$Q_f = mC_p \Delta T \longrightarrow 1.37 \times 14.1 \times (143-293)$$

$$\mathbf{Q_f = 2897.55 \text{ KW} = 2.89 \text{ MW}}$$

$$k = \frac{Q_f}{Q_c} = 1.13$$

- **Calcul de la différence logarithmique moyenne de température :**

$$\mathbf{DTLM} = \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}}\right)}$$

$$\text{DTLM} = \frac{(-198+130)-(7-20)}{\ln\left(\frac{-198+130}{7-20}\right)}$$

$$\text{DTLM} = 33.33 \text{ °C}$$

$$R = \frac{T_{ec} - T_{sc}}{T_{sf} - T_{ef}}$$

$$R = \frac{75 - 280}{143 - 293} =$$

$$R = 1,36$$

$$E = \frac{T_{sf} - T_{ef}}{T_{ec} - T_{ef}}$$

$$E = \frac{143 - 293}{75 - 293} =$$

$$E = 0,68$$

Les valeurs E, R se croisent dans l'abaque de l'échangeur tubulaire 4 passes côté calandre et 8 passes côté tube. On obtient le facteur de correction **F = 0,2**

$$\text{DTLM}_{\text{Corrigé}} = (\text{DTLM}) \cdot f = 6.6 \text{ °C}$$

- **Calcul la surface d'échange d'un tube :**

$$Q = A \cdot U_s' \cdot f \cdot \text{DTLM}$$

$$A = \frac{Q}{U_s' \cdot f \cdot \text{DTLM}} = \frac{3295890}{1835 \times 6.6} = 272.14 \text{ m}^2$$

$$A = 272 \text{ m}^2$$

- **Nombre des tubes par calandre :**

$$N_t' = \frac{A}{a \cdot n_c} = \frac{272}{0,37 \times 4} = 183,78$$

Avec : n_c est le nombre des passes côté calandre

$$N_t' = 184 \text{ tubes}$$

CONCLUSION GENERALE

Le présent mémoire ayant pour thème : « Calcul thermique d'une installation cryogénique destinée à la liquéfaction de l'hydrogène » m'a permis :

- Une maîtrise du déroulement des processus industriels de liquéfaction des gaz ;
- Une compréhension des cycles thermodynamiques associés à ces processus ;
- Le calcul thermique des performances énergétiques des installations cryogéniques (coefficient de liquéfaction, puissance frigorifique spécifique, consommation d'énergie et rendement thermodynamique) ;
- Le dimensionnement des principaux équipements de l'installation cryogénique (compresseurs et échangeurs de chaleur) ;

Les principaux résultats du calcul thermodynamique de l'installation cryogénique montrent que le refroidissement préalable du gaz à liquéfier : l'hydrogène, par un agent cryogénique externe : l'azote est très bénéfique pour l'installation.

- Plus on extrait de la chaleur du gaz durant le parcours de l'hydrogène après sa compression isothermique, plus on améliore les caractéristiques thermodynamiques du cycle.
- Le refroidissement préalable utilisant à la fois l'azote liquide saturé à 77 K à la pression atmosphérique et l'azote sous vide à 65 K est très efficace comme procédé pour minimiser la consommation d'énergie et obtenir de bons rendements thermodynamiques.
- Plus la pression à la sortie du compresseur est élevée, plus l'installation est rentable.

Enfin, le dimensionnement thermique des principaux équipements à savoir compresseurs centrifuges et échangeurs à tubes et calandre est un complément essentiel à ce projet. Il m'a été très utile du fait qu'il constitue une approche de l'installation cryogénique réelle.

Références bibliographiques

- [1]. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-traitement-des-gaz-42485210/liquefaction-de-l-hydrogene-j3603/>
- [2]. <https://www.lenntech.fr/data-perio/h.htm>.
- [3]. Hommage à Jean Baptiste Meunier, EDF, GDF, tours 14-23 Aout 1986.
« Nouvelle vie, croissance et rôle du réseau gazier parisien au XIX^{ème} siècle »
Jean-Pierre Williot, paris et ses réseaux, bibliothèque historique de la ville de paris, 1990.
- [4]. <http://www.airproducts.fr/industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.asp>
- [5]. <http://www.Larousse.Fr/encyclopédie/divers/hydrogène>.
- [6]. Dr Amardjia-Adnani Hania. : Livre d'Algérie énergie solaire et hydrogène.
- [7]. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrogène>.
- [8]. /Applications de l'hydrogène-Air Liquide Energies.html.
- [9]. http://tpe09.free.fr/partie3_2.php La pile à hydrogène.
- [10]. <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Les-sources-d-energie/L-hydrogene>.