

**Département de Génie Mécanique et Génie des Procédés
Cours de Cryogénie : 3^{ème} Année Licence**

Chapitre I : INTRODUCTION A LA CRYOGENIE

I.1/ Définition

La cryogénie est l'art et la technologie d'obtention et du maintien des basses températures (jusqu'à -253 °C) et des très basses températures (jusqu'au nano Kévin).

En général, on parle de cryogénie en dessous de la barre de température de 120K (-153.15 °C). Cette température représente la limite à partir de laquelle les principaux gaz atmosphériques (Oxygène, Azote, Argon, Méthane, Néon, ...) se liquéfient.

I.2/ Historique et domaines d'utilisation de la cryogénie

Avoir de très basses températures, c'était l'objectif de grands nombres de chercheurs scientifiques et de physiciens. Commencant par la première liquéfaction de l'air (L.Caillet et et R. Picret 1877) et la première séparation de l'oxygène et de l'azote (K. Olszewski et S. Wroblewski 1883) furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène, rendu possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement (J. Dewar ,1898).Cependant, ce fut la première liquéfaction de l'hélium (H. Kamerlingh Onnes ,1908) qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures, un domaine qui est aujourd'hui encore un aspect majeur de la recherche et qui engendra la découverte de nouveaux phénomènes tels que la supraconductivité (H. Kamerlihg Onnes ,1911) et la superfluidité (W. Hkeesom,1928) qui ne furent expliqués qu'au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, avec l'émergence de la mécanique quantique . Il est intéressant de rappeler qu'à l'époque où la plupart des expériences en physique étaient menées par des chercheurs indépendants travaillant avec de petits appareils , le laboratoire de H.Kamerlingh onnes à Leyde fut le premier exemple de recherche scientifique à « grande échelle » depuis, la cryogénie n'a cessé de progresser vers des températures de plus en plus basses (figures I.1) atteignant aujourd'hui des valeurs d'environ 0.1 nK dans les laboratoires spécialisés grâce à l'association de techniques de dilution de l'hélium et de désaimantation adiabatique.

Enseignant : R. LEKHAL

I.3/ Températures cryogéniques

La cryogénie recouvre l'ensemble des technologies permettant de refroidir un échantillon de matière bien en deçà de la température ambiante.

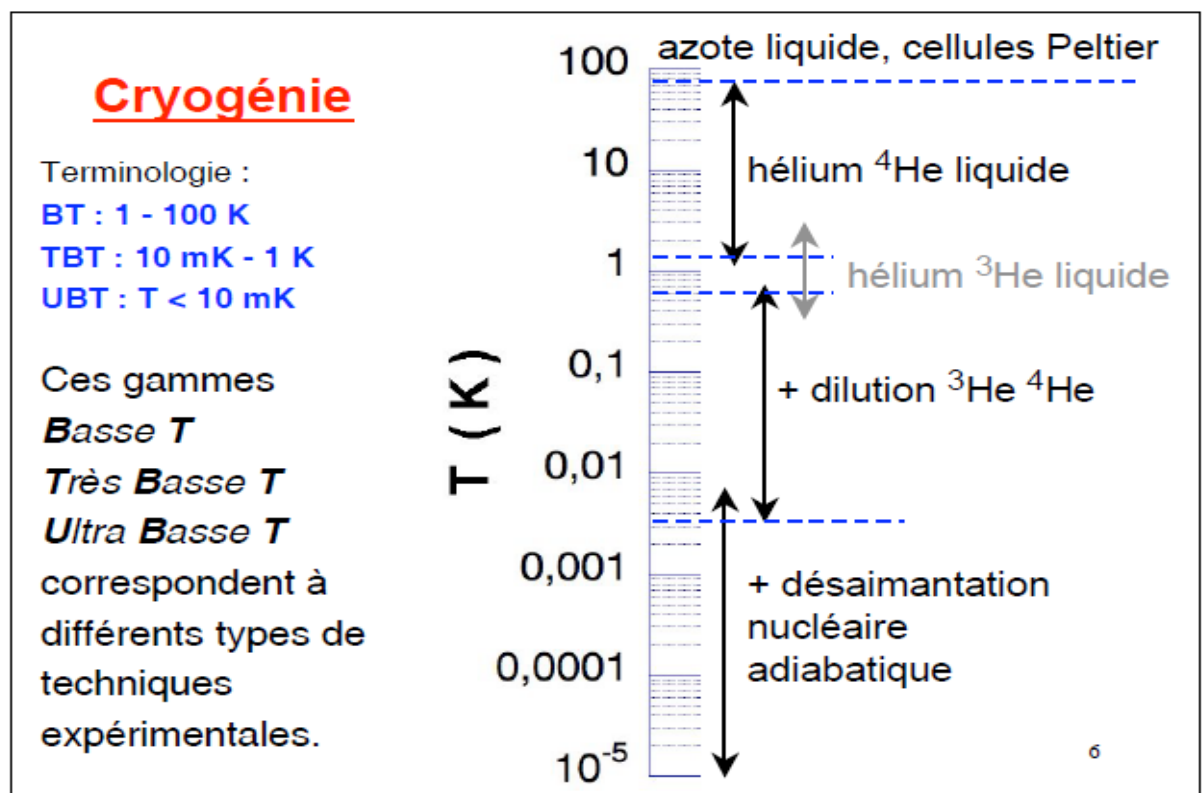
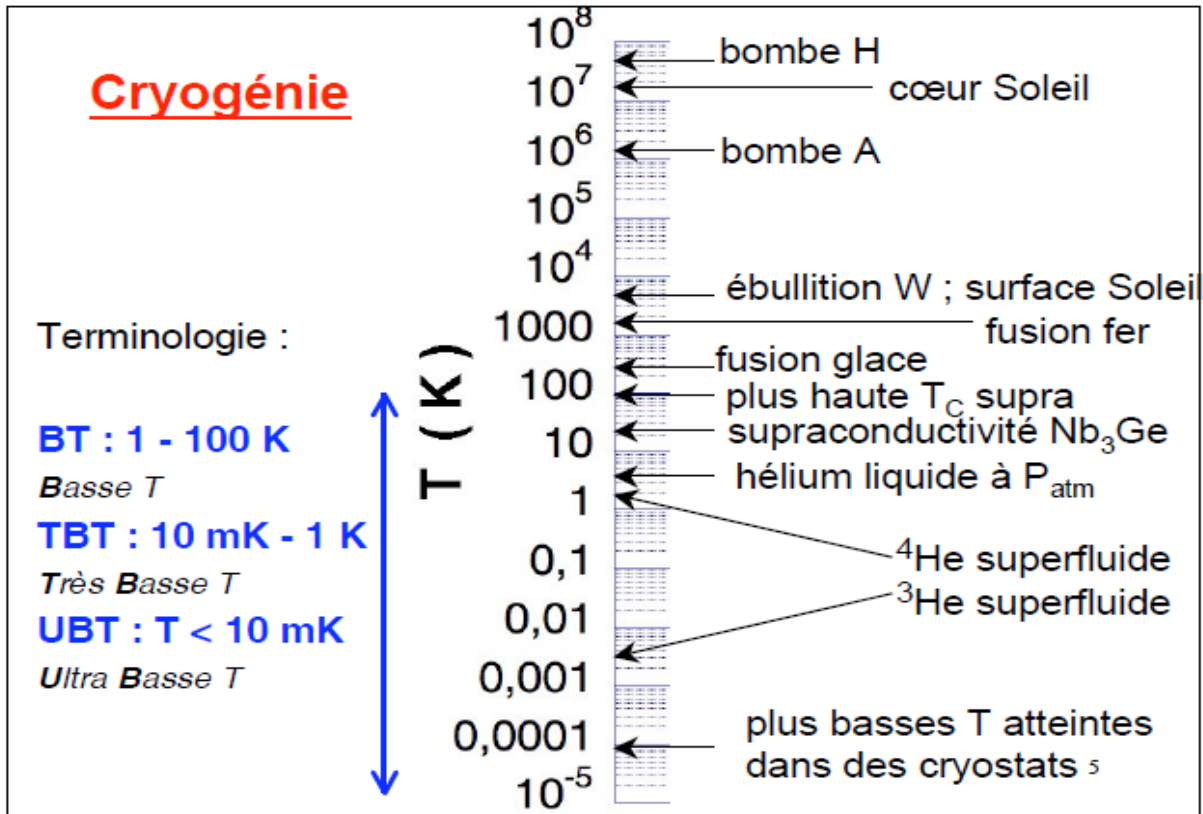
Pour atteindre des températures bien plus froides que le 0°C, on a recours en 1^{ier} lieu aux fluides dits **Cryogéniques** (leurs température d'ébullition est très inférieure à 270K à pression atmosphérique).

En effet, si on met un fluide ayant cette particularité en contact avec une substance à refroidir, le liquide cryogénique étant à sa température d'ébullition s'évapore en prenant la chaleur du milieu qui l'entoure.

L'un des fluides cryogéniques les plus utilisés est l'Azote (LN₂). Il bout à 77K à pression atmosphérique avec une chaleur latente de 200J/g.

Pour atteindre des températures encore plus basses, on a recours à l'hélium liquide (⁴He_l). Sa température d'ébullition est de 4,2K sous une atmosphère avec une chaleur latente de 21J/g.

Pour refroidir en dessous de 4K, on utilise le **cryopompage**. En effet, en mettant He liquide à sa température d'ébullition à pression atmosphérique dans un récipient fermé puis en faisant abaisser d'avantage la pression au-dessus du liquide à l'aide d'une pompe à vide, la température du liquide en équilibre avec sa phase vapeur va diminuer proportionnellement. Pour une pression abaissée jusqu'à 1mbar, on atteint une température du liquide de 1,25K ; l'effet de la dépression entraîne la diminution du nombre d'atomes permettant le transfert de chaleur.



I.4/ Domaines d'application

La cryogénie est utilisée dans diverses disciplines (thermique, mécanique des fluides ou du solide, électrotechnique et électronique...) et notamment dans les domaines de l'industrie et recherche.

Industrie :

- **Liquéfaction, stockage et transport** : gaz liquéfiés, isolation thermique
- **Spatial** : Propulseurs à ergols liquides (H_2L+O_2L), Navettes
- **Electronique et électrotechniques** : Supraconductivité, IRM, magnétométrie,...
- **Médical** : Cryoconservation, cryochirurgie,....

Recherche :

- **Mesures à basse température (instrumentation)** : Matériaux
- **Accélérateurs et physique des particules** : Aimants, cavités
- **Fusion nucléaire contrôlée** : Confinement magnétique
- **Astro-physique** : Capteurs d'observation

1.5/ Quelques exemples

1.5.1/ Stockage de gaz liquéfiés

Pourquoi la cryogénie : stockage de gaz liquéfiés

Réduction de volume et/ou de pression

→ stockage de réfrigérants et fluides cryogéniques (pentane, azote, hélium)

→ stockage de combustibles (méthane, hydrogène, ergol = mélange H_2+O_2 ,...)

Exemple :

$$\left\{ \begin{array}{l} 34 \text{ m}^3 \text{ gaz } H_2 \\ P = 1 \text{ atm} \\ T = 300 \text{ K} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 170 \text{ litres gaz } H_2 \\ P = 200 \text{ atm} \\ T = 300 \text{ K} \end{array} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} 43 \text{ litres } H_2 \text{ liq.} \\ P = 1 \text{ atm} \\ T = 20 \text{ K} \end{array} \right.$$

Pour une application de type moteur + pile à combustible, c'est l'ordre de grandeur de la quantité d'hydrogène équivalente à 30 litres d'essence

Autre ex. :

$$1 \text{ m}^3 \text{ gaz He à } \left\{ \begin{array}{l} P = 1 \text{ atm} \\ T = 300 \text{ K} \end{array} \right. \Leftrightarrow 1,4 \text{ litre liq. He à } \left\{ \begin{array}{l} P = 1 \text{ atm} \\ T = 4,2 \text{ K} \end{array} \right.$$

Limitations (assez sévères, cf suite du cours...) :

- coût énergétique de la liquéfaction
- isolation thermique du liquide cryogénique : coût et encombrement
- consignes de sécurité pour la manipulation des fluides

8

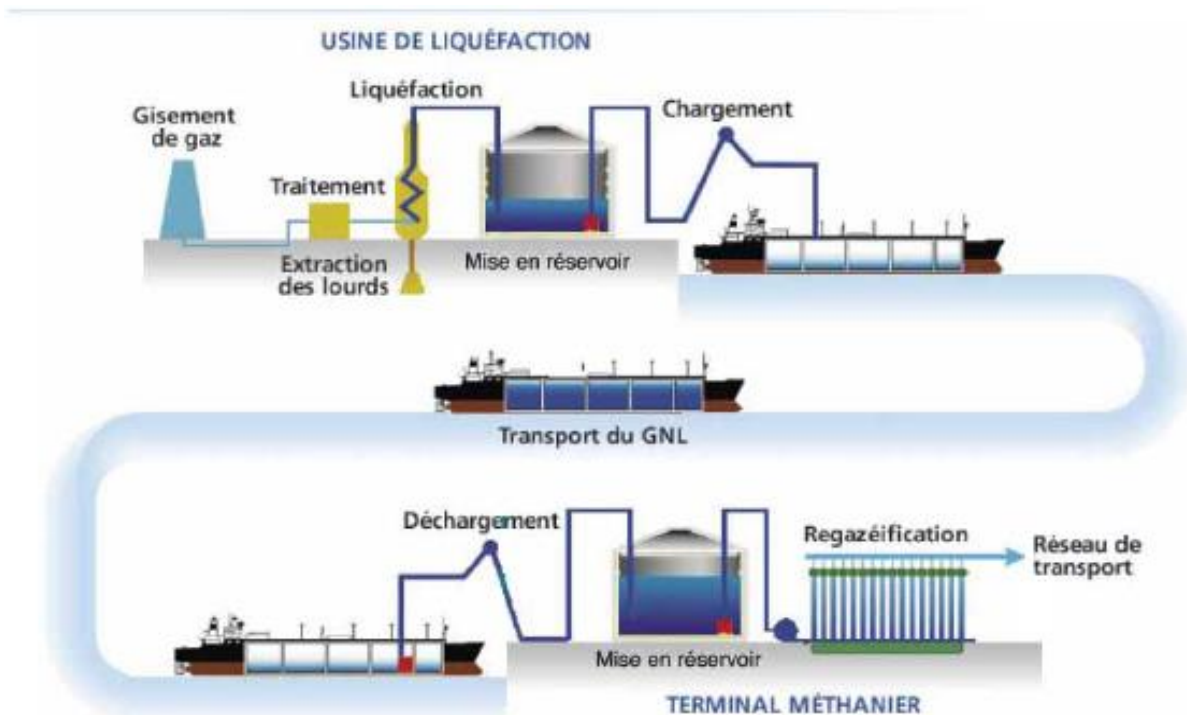
Autres exemples : Industrie de Gaz Naturel Liquéfié

En Algérie, on exporte le Gaz Naturel Liquéfié par deux voies :

- Par gazoducs
- Par navires méthaniers

La deuxième option nécessite, tout d'abord la liquéfaction du GN et ce, par des procédés très élaborés.

En fait, le Gaz Naturel se compose essentiellement de méthane (CH_4) à plus de 90%. Ce dernier est liquide à une température d'environ -162°C (111K) @ Patm. En le liquéfiant, son volume est réduit par un facteur de 600 (600 m³ de GN @ Patm est équivalent à 1 m³ de GNL). Cette particularité permet le stockage à pression atmosphérique de grandes quantités de GNL dans des réservoirs dits cryogéniques jusqu'à 200 000 m³ en toute sécurité mais cela nécessite une isolation thermique très poussée du réservoir. Néanmoins, ce stockage est de courte durée, à cause de l'évaporation permanente du produit et ce malgré les techniques d'isolation thermiques très pointues de ces réservoirs. En effet, les entrées de chaleur depuis l'environnement extérieur vers le liquide stocké sont inévitables étant donné le gradient de température important qui y subsiste (environ 190 K). De ce fait, le liquide précieux est vite transféré vers les navires méthaniers conçus à cet effet pour le transporter jusqu'à destination.



1.5.2/ Condensation, adsorption

Pourquoi la cryogénie : condensation, adsorption

On peut isoler un constituant d'un mélange qui condense après (ou avant) les autres lors du refroidissement (ou du réchauffement)

Applications :

→ purification des gaz ; extraction Ne de l'atmosphère ; séparation ^3He de ^4He

→ pompes cryogéniques : le point froid du cycle permet de "cryopomper" la plupart des gaz résiduels.

Cryopompage = condensation du gaz en solide au contact d'une paroi froide. Exemple: givre sur les vitres en hiver.

Limitation : pompes cryogéniques peu efficaces pour les gaz à bas point de condensation.

fluide	T condensation à P=1 atm
^4He	4,2 K
H_2	20 K
Ne	27 K
N_2	77 K

1.5.3/ Refroidissement par l'utilisation de fluides cryogéniques

Refroidir un système au moyen de fluides cryogéniques

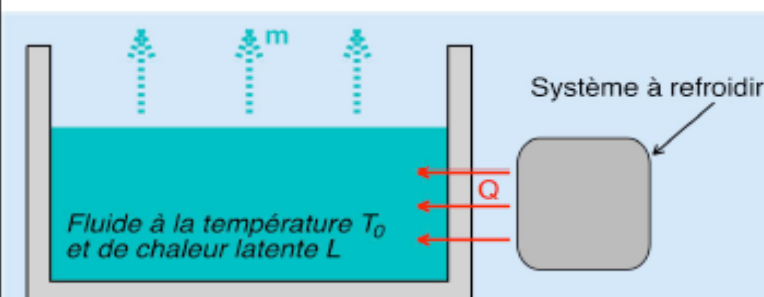
Pour évaporer une masse m de liquide, il faut lui fournir $Q = L.m$.

Réciproquement, si on extrait une masse m par pompage, et qu'on note L la **chaleur latente d'évaporation** en J / unité de masse :

chaleur extraite $Q = L.m \Rightarrow$ puissance frigorifique $\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = L \cdot \frac{dm}{dt}$

On peut aussi exprimer L en J/mol : si on extrait n moles par pompage

chaleur extraite $Q = L.n \Rightarrow$ puissance frigorifique $\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = L \cdot \frac{dn}{dt}$



Avantages :

- processus simple
- découplage liquéfacteur / cryostat

Inconvénients :

- autonomie limitée
- difficultés techniques pour des applications embarquées

I.6/ Propriétés des fluides cryogéniques

I.6.1/ Choix d'un fluide cryogénique

Eléments ayant les plus basses températures d'évaporation :

Élément		Z_A	$T_{\text{ébullition}} \text{ à } P_{\text{atm}}$
³ Hélium	³ He	2	3,2
⁴ Hélium	⁴ He	2	4,2
Hydrogène	H ₂	1	20
Néon	Ne	10	27
Azote	N ₂	7	77
Fluor	F	9	85
Argon	Ar	18	87
Oxygène	O ₂	8	90
Krypton	Kr	36	120
Xénon	Xe	54	165
Radon	Rn	86	211

16

I.6.2/ Quelques considérations d'ordre sécuritaire

Cryogénie $T > 70-77 \text{ K}$:

on n'utilise jamais fluor ni oxygène comme fluides cryogéniques :

- T d'ébullition proche de l'azote
- réactivité chimique --> fluides dangereux
(combustion avec O₂, toxicité du fluor).

Exception : O₂ liquide pour les propulsions à réaction H₂+O₂ (lanceurs en aérospatial : fusée Ariane ou équivalents)

⇒ **azote** quasi systématique, soit pour la cryogénie $T \geq 70 \text{ K}$, soit comme « premier étage » de refroidissement pour les BT

Cryogénie $T < 70-77 \text{ K}$:

- H₂ a été utilisé, mais risques de réaction violente en présence d'air
- Ne : parfois utilisé. Presque aussi rare que He mais T moins basse.

⇒ **hélium** quasi systématique

17

Conclusion : L'azote et l'hélium liquides sont les fluides les plus utilisés en cryogénie en raison de leur non interaction avec les autres (gaz inertes).

I.6.3/ Propriétés physiques de l'Azote (N₂)

Azote : très couramment utilisé en cryogénie

	N₂
T _{ébullition} à P _{atm}	77 K
T _{fusion} à P _{atm}	63,1 K
Point triple T _t	63 K
P _t	125 mb
Point critique T _c	126 K
P _c	33 b
L = chaleur latente d'évaporation à P_{atm}	200 J/g
Evap. pour 1 Watt	0,022 l/h
ρ _{liq} (à P _{atm})	810 g/l

- corps diatomique : N₂
- non toxique, non inflammable
- très **abondant** sur Terre : 78% de notre atmosphère
- coût modéré

▪ chaleur latente *relativement* élevée (*) :
L ≈ 200 J/g

puissance frigo. $\dot{Q} = L \cdot \frac{dm}{dt}$

(*) eau à 100°C : L ≈ 2 kJ/g

I.6.4/ Propriétés physiques de l'Hélium 4 (⁴He)

utilisable à plus basse T
que tous les autres éléments chimiques

	⁴He
T _{ébullition} à P _{atm}	4,2 K
T _{fusion} à P _{atm}	-
Point triple T _t	-
P _t	-
Point critique T _c	5,2 K
P _c	2,2 b
L = chaleur latente d'évaporation à P_{atm}	21 J/g
Evap. pour 1 Watt	1,4 l/h
ρ _{liq} (à P _{atm})	125 g/l

- corps monoatomique : ⁴He
- second élément le plus abondant dans l'Univers, **mais** seulement 5 ppm en volume dans notre atmosphère (*pesanteur terrestre insuffisante pour retenir ⁴He et H₂*)
- rare aussi dans dans la croûte terrestre : en moyenne 8.10⁻³ ppm
- inerte chimiquement (gaz rare)
- **chaleur latente << celle de l'azote**

puissance frigo. $\dot{Q} = L \cdot \frac{dm}{dt}$

19

Sources de l'Hélium 4 :

Dans les étoiles : fusion hydrogène --> He

Sur Terre : ^4He est un des produits de la fission de l'Uranium et du Thorium, ou plus généralement, de la **radioactivité α**

Quelques poches à concentration exploitable dans le sous-sol : quelques ppm à quelques pourcents d' ^4He dans **certains gisements de gaz naturel** (USA, Algérie, Pologne, ...)

Prix de production de l' ^4He \approx 4 € par litre liquide

(Re)-liquéfaction de l'Hélium : +1 € par litre liquide

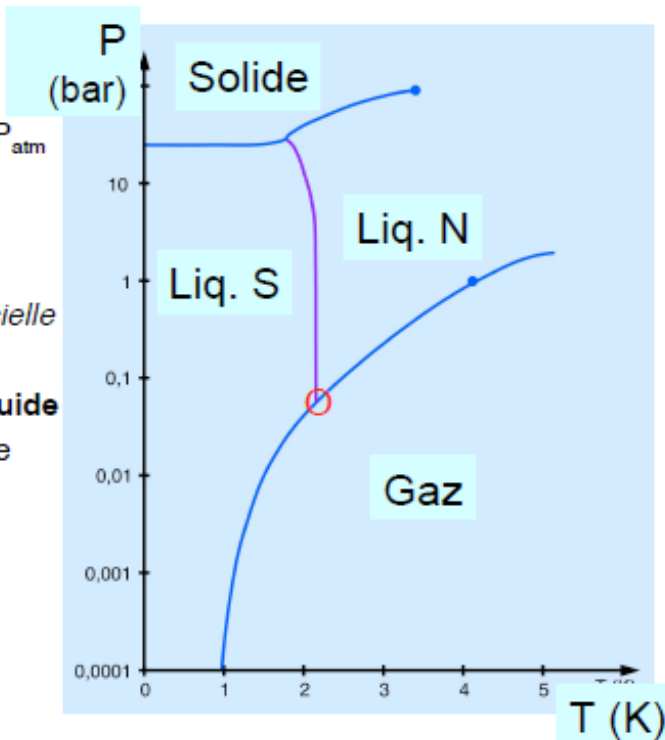
=> on récupère ^4He pour le re-liquéfier (taux de pertes habituellement < 5%)

Utilisation très répandue en cryogénie + certaines industries. 20

Diagramme de phase de ^4He :

He est un "fluide quantique":

- seul élément chimique
- encore liquide à $T=0$ sous P_{atm}**
- Pas de point triple.
- Hélium I = liquide normal, Hélium II = **superfluide** (viscosité et tension superficielle = 0 !)
- Liq. normal / liq. superfluide séparés par une transition de phase à $P_{\lambda} \approx 50$ mbar et **$T_{\lambda} = 2,17$ K** (o = point Lambda)



Cas particulier de l'Hélium 4 :

	³He
T _{ébullition} à P _{atm}	3,2 K
T _{fusion} à P _{atm}	-
Point triple T _t P _t	- -
Point critique T _c P _c	3,3 K 1,2 b
L = chaleur latente d'évaporation à P _{atm}	8,2 J/g
Evap. pour 1 Watt	7,1 l/h
ρ _{liq} (à P _{atm})	59 g/l

- Corps monoatomique : ³He
- **Le plus bas point d'ébullition.**
- isotope 10⁶ fois plus **rare** que l'⁴He
- 300 € par litre gaz TPN soit ≈ 2 M€/kilo
=> à confiner soigneusement !!!
- Produit de fission du tritium ³H. Source: "déchet" des réacteurs nucléaires.
- **Utilisé en cryogénie très basse température :**
évaporateur ³He (T ≈ 0,3 K à 1 K)
ou dilution ³He + ⁴He (T ≈ 3 mK à 1 K)

22

I.6.5/ Résumé des Propriétés physiques des fluides cryogéniques Azote et Hélium

	unité	N₂	⁴He	³He
T _{évap} à P _{atm}	K	77	4,2	3,2
T _{fusion} à P _{atm}	K	63,1	-	-
Point triple T _t P _t	K 10 ⁻³ atm	63 125	- -	- -
Point critique T _c P _c	K atm	126 33	5,2 2,2	3,3 1,2
Chaleur latente évap. à P _{atm}	J / g	200	21	8,2
taux d'évap. pour 1 W	litre / h	0,022	1,4	7,1
ρ _{liq} (à P _{atm})	kg.m ⁻³ = g / l	810	125	59

Puissance frigo.

$$\dot{Q} = L \cdot \frac{dm}{dt}$$

en W

si débit en g/s

et L en J/g

ou

$$\dot{Q} = L \cdot \frac{dn}{dt}$$

en W

si débit en mol/s

et L en J/mol

23