

Introduction à la cryogénie

Ecole des Accélérateurs – BENODET - 2016

Présentation préparée avec Patxi Duthil (IPNO)

Patricia Duchesne
IPNO – Division Accélérateurs
Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

DEFINITION

PROPRIETES PHYSIQUES D'UN CRYOFLUIDE

Etats de la matière

Diagramme de phase

Relation chaleur – température

Principaux cryofluides

REFROIDISSEMENT DES GAZ

Histoire de la liquéfaction d'un gaz

Machine de réfrigération

Réfrigération, Liquéfaction

La détente d'un gaz

Exemple d'installation

APPLICATIONS DE LA CRYOGENIE

Cryogénie : (*Kruos (grec) = Froid, Genesis (grec) = Engendrer, produire*)

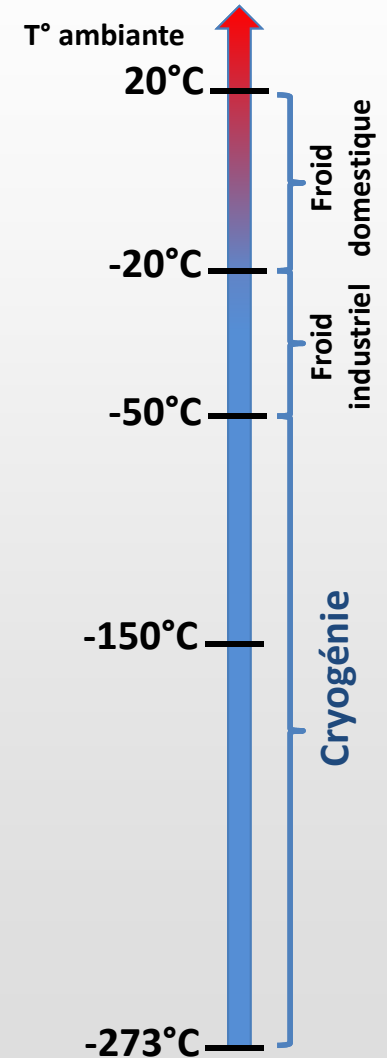
Cette discipline s'intéresse à l'étude des très basses températures : comment les produire, les maintenir et les utiliser.

0K (-273°C) < Températures cryogéniques < 120K (-150°C)

Rappel : $T [Kelvin] = T [°C] + 273.15$

La limite supérieure est fixée à 120K :
En dessous de cette température, le méthane (constituant du gaz naturel) et la plupart des gaz atmosphériques passent en phase liquide.

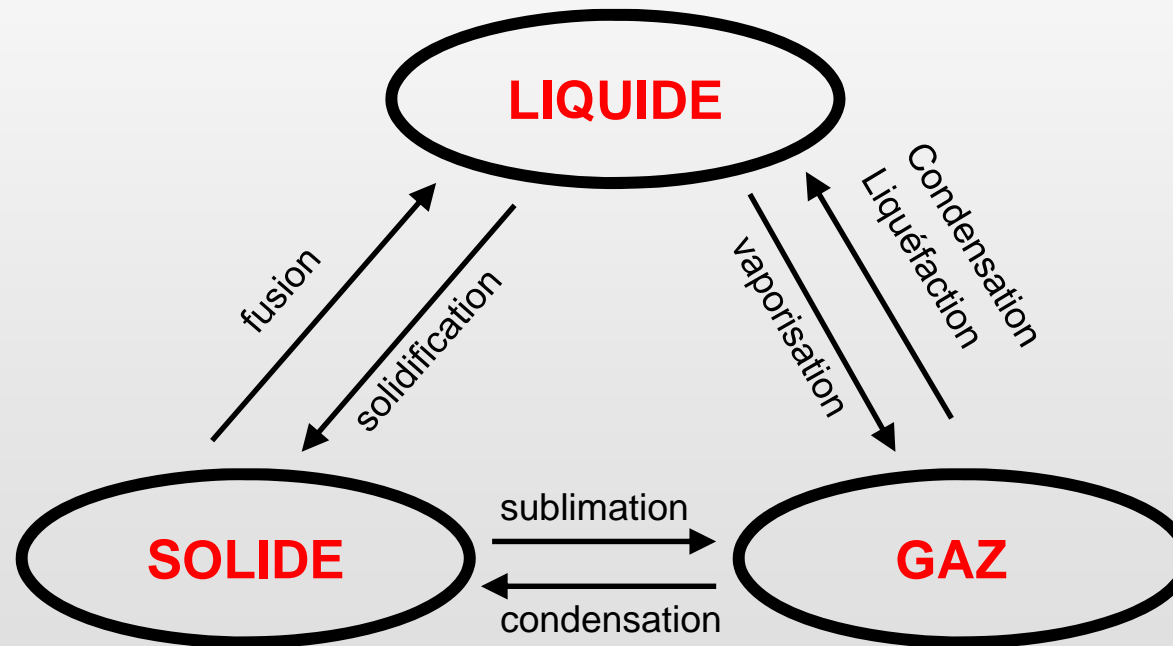
Fluides cryogéniques	T° Ebullition [K] à 1atm
Méthane	111.6
Oxygène	90.2
Argon	87.3
Azote	77.3
Hydrogène	20.4
Helium	4.2



Sources de froid : Fluides cryogéniques (cryofluides) ou machines (cryogénérateurs)

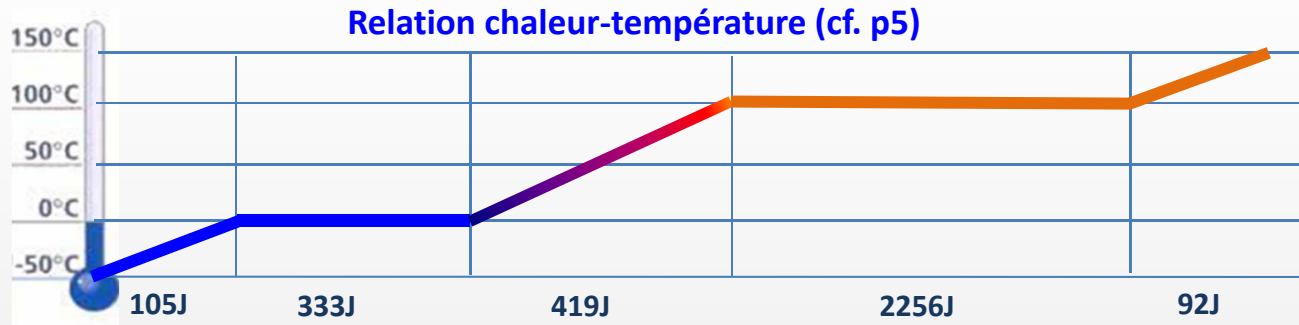
Comportement d'un fluide cryogénique ?
Rappel de thermodynamique ...

Trois états de la matière

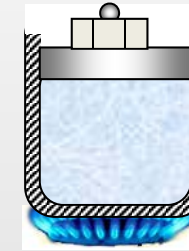
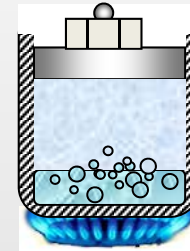
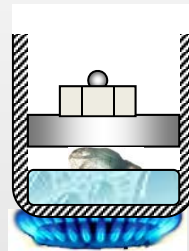


Exemple phénoménologique : casserole remplie de glace et que l'on chauffe

PROPRIETES PHYSIQUES D'UN CRYOFLUIDE



Apport de chaleur Q

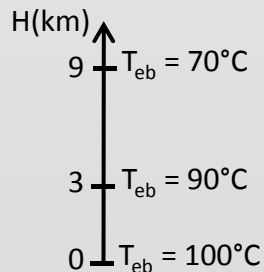


Fusion du solide

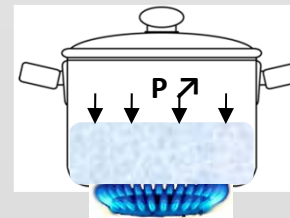
Vaporisation du liquide

Si l'on change la pression, on trouve d'autres valeurs de température (cf. Diagramme des phases p4) :

P_{ext} diminue avec l'altitude :



Contenant sous pression :



↗ la pression jusqu' à 1.8bar (soupape)
↗ T_{eb} à 115°C

Diagramme de phase P, T

• Différentes phases d'un corps pur en fonction des variables : pression et température

• **3 courbes d'équilibre** correspondant à un changement d'état :

Solide-gaz : courbe de sublimation

Solide-liquide : courbe de fusion

Liquide-gaz : courbe de vaporisation

• **Point triple** (p_t, T_t) : coexistence des trois phases en équilibre (sol/liq/gaz)

• **Point critique** (p_c, T_c) au delà duquel il n'y a plus de différence entre le liquide et le gaz : état supercritique monophasique

• **Tension de vapeur** : pression du gaz en équilibre avec le liquide ou le solide

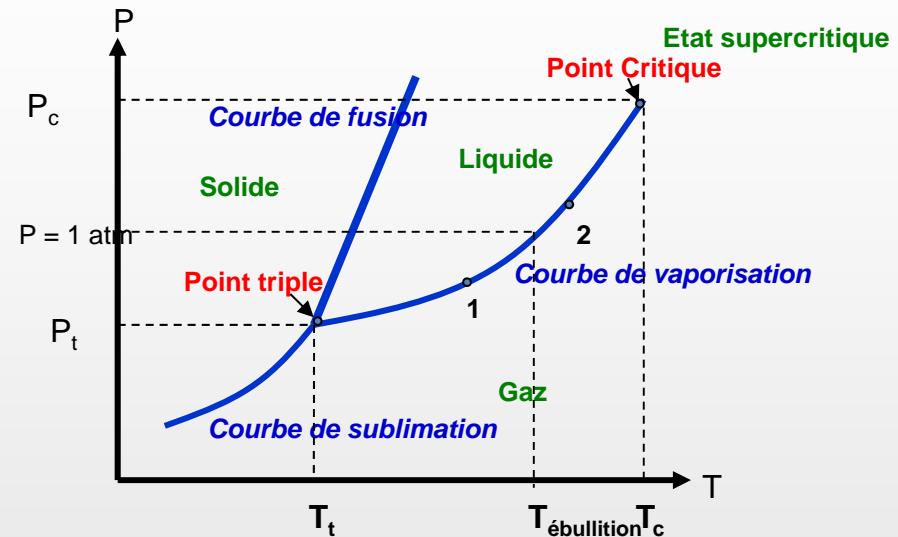
Cette tension de vapeur suit une loi du type : $\log(p) \approx -\frac{A}{T} + B$

A et B constantes spécifiques du corps

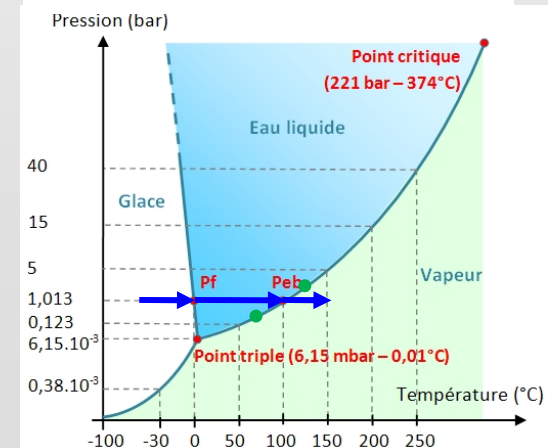
En diminuant la pression sur le bain par pompage du gaz, la température du bain diminue.

Remarque : L'hélium n'a pas de point triple solide-liquide-vapeur mais une phase liquide supplémentaire dit Superfluide (conductivité thermique quasi infinie, viscosité quasi nulle)

Diagramme typique d'équilibre des phases

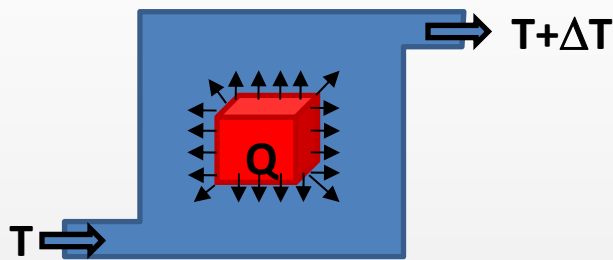


Exemple de la casserole remplie de glace et que l'on chauffe :



☐ Chaleur sensible

Quantité de chaleur échangée sans transition de phase mais avec un changement de T°



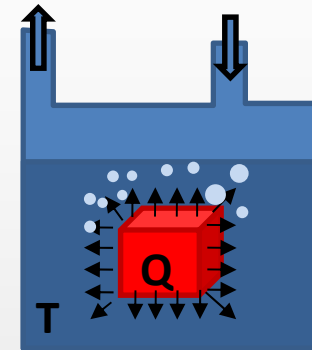
ΔT est proportionnelle à Q :

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Q : Apport de chaleur (J)
 m : masse (kg)
 c_p : chaleur spécifique ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
 ΔT : écart de température (K)

☐ Chaleur latente

Quantité de chaleur échangée lors d'une transition de phase sans changement de T°



$T = \text{constante}$

$$Q = m \cdot L_v$$

Q : Apport de chaleur (J)
 m : masse de liquide transformé (kg)
 L_v : chaleur latente de vaporisation ($J \cdot kg^{-1}$)

➔ Refroidir avec un fluide cryogénique :

➤ Utilisation d'un gaz amené à basse température qui se réchauffe au contact de l'objet à refroidir (température variable) :

- Utilisation de la **chaleur sensible seule**

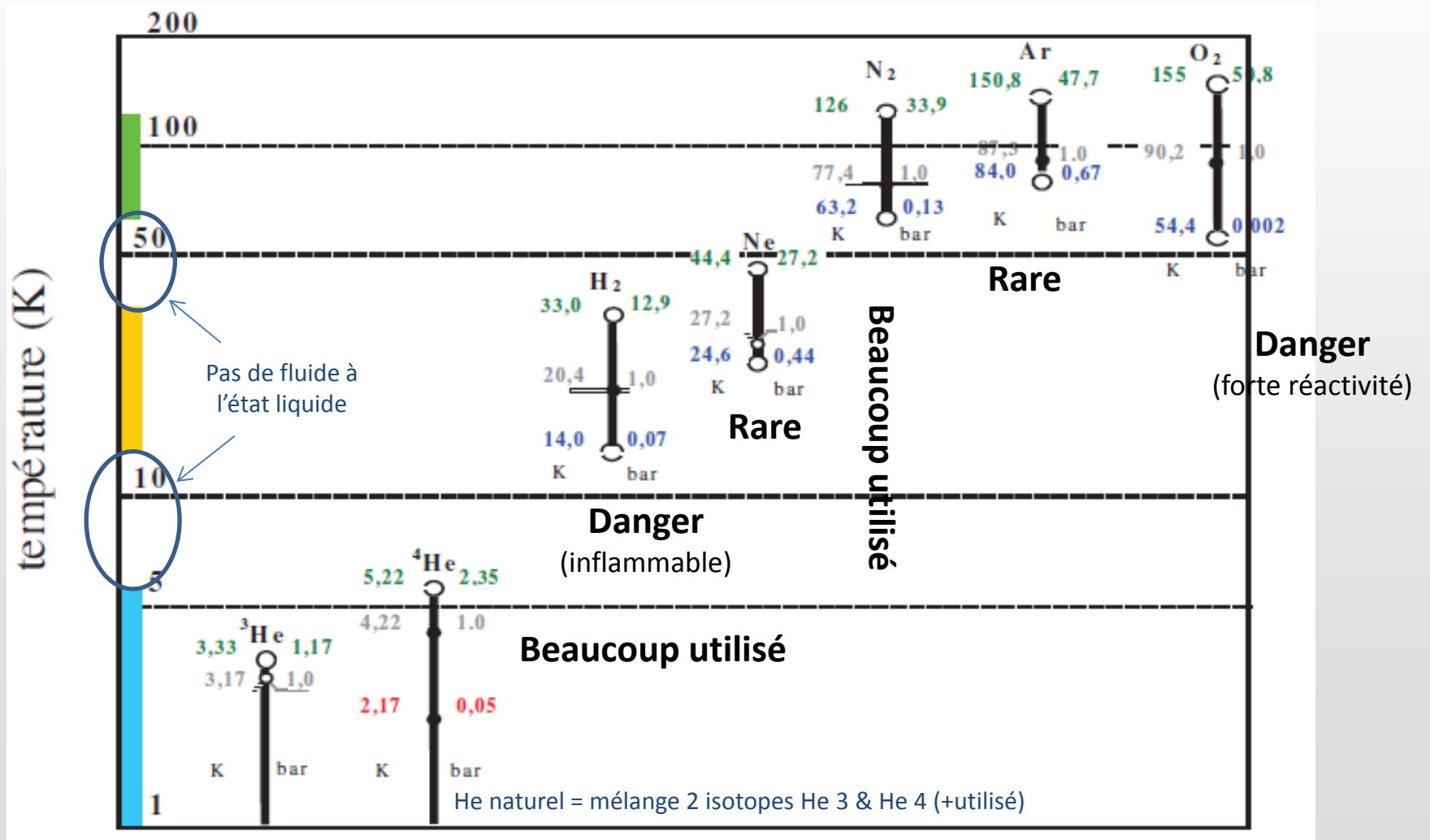
➔ Réfrigération d'un gaz

➤ Utilisation d'un liquide saturé comme réfrigérant d'objets à maintenir à basse température (composants supraconducteurs, expérience de physique ...) :

- Utilisation de la **chaleur latente de vaporisation**
- Utilisation possible de la chaleur sensible des vapeurs froides

➔ Liquéfaction d'un gaz

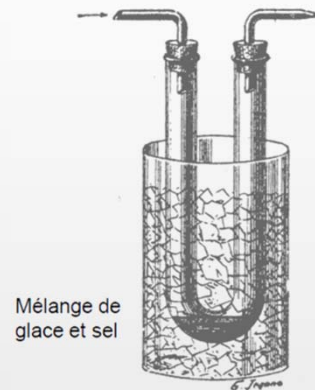
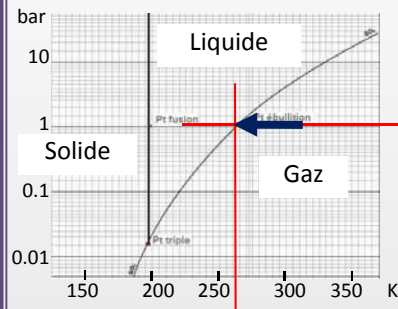
PROPRIETES PHYSIQUES D'UN CRYOFLUIDE



Premières tentatives de liquéfaction de gaz (XVIII^{ème} et XIX^{ème} s.) :

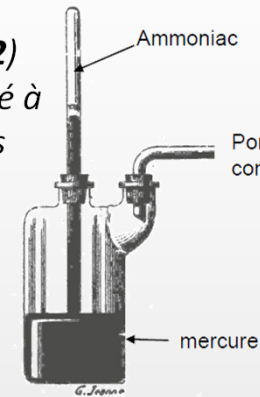
Par refroidissement :

Monge (1784)
Dioxyde de soufre à -8°C

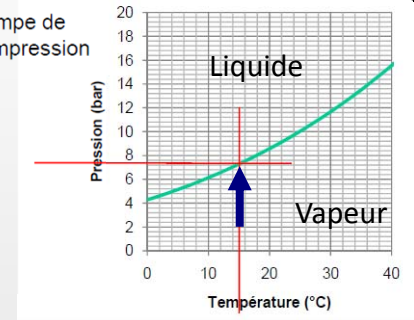


Par compression :

Van Marum (1792)
Ammoniac liquéfié à 15°C à $P = 7.3\text{bars}$



Transformation isotherme (échange de chaleur avec le milieu ambiant à T° constante)



REFROIDISSEMENT DES GAZ

- **1852** : Joule et Thomson (Lord Kelvin) montrent que la **détente d'un gaz** à travers une vanne provoque un refroidissement brusque (détente Joule-Thomson).
- **1863** : Thomas ANDREWS montre qu'il existe une **température dite critique** au dessus de laquelle il est impossible de liquéfier un gaz même en augmentant la pression de façon infinie.



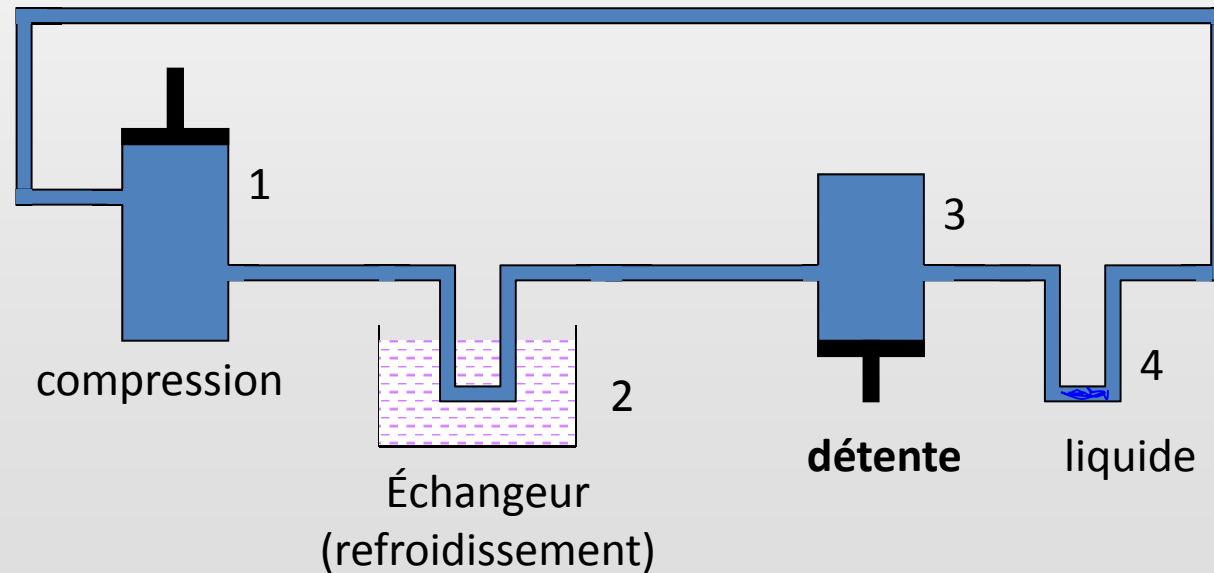
Il est donc nécessaire de combiner la détente d'un gaz et un refroidissement préalable de ce gaz (en dessous de sa température critique) pour le liquéfier.

- **1877** : Cailletet et Pictet réussissent à liquéfier l'oxygène, première liquéfaction d'un gaz dit "permanent".

Détente d'un gaz combiné par son refroidissement préalable

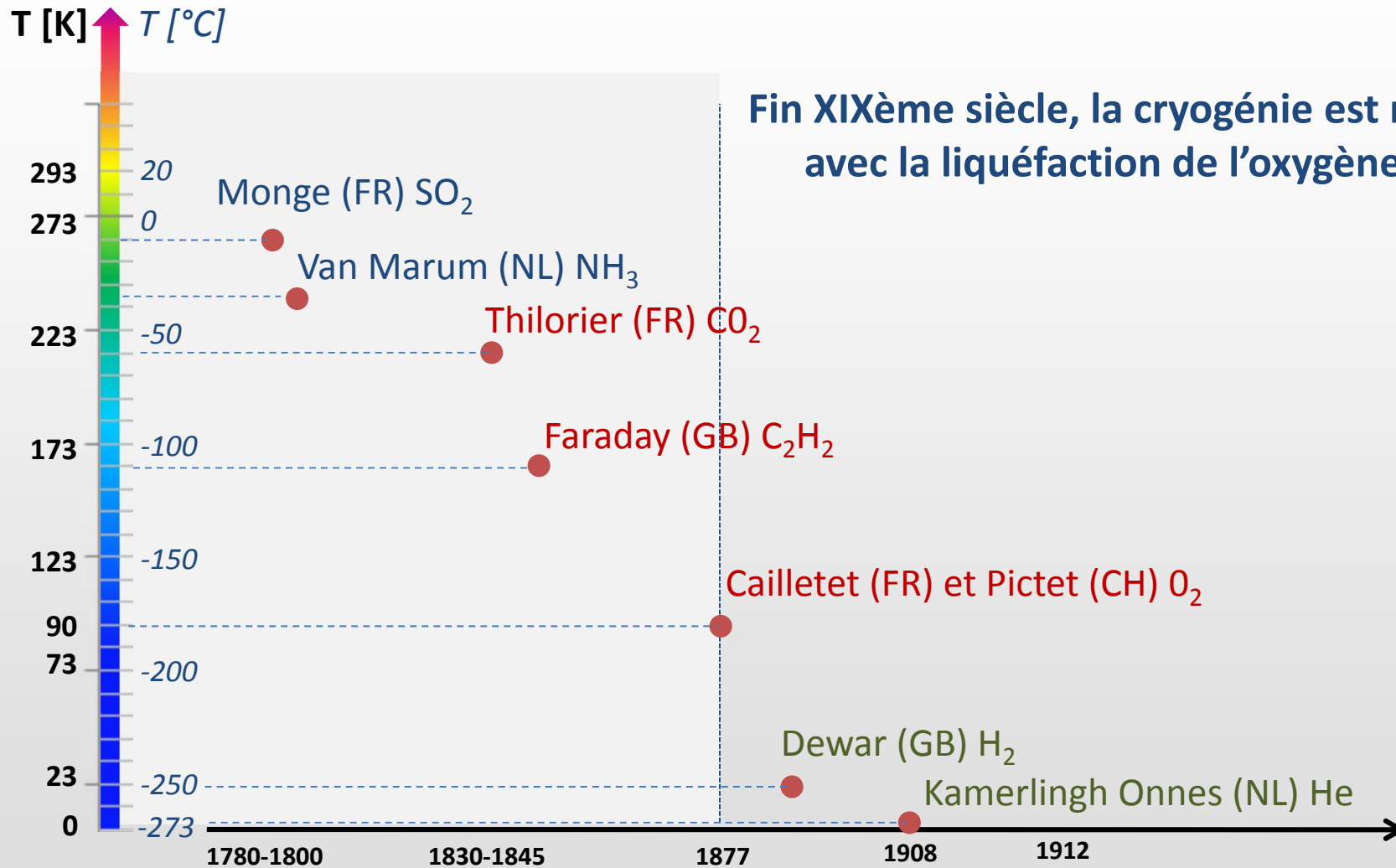
- Le gaz est comprimé (1)
- Le gaz est refroidi dans un échangeur (2)
- Le gaz subit une détente (3)

Schéma de principe :



La détente provoque une diminution de la pression et donc une diminution importante de la température, produisant ainsi du liquide.

REFROIDISSEMENT DES GAZ

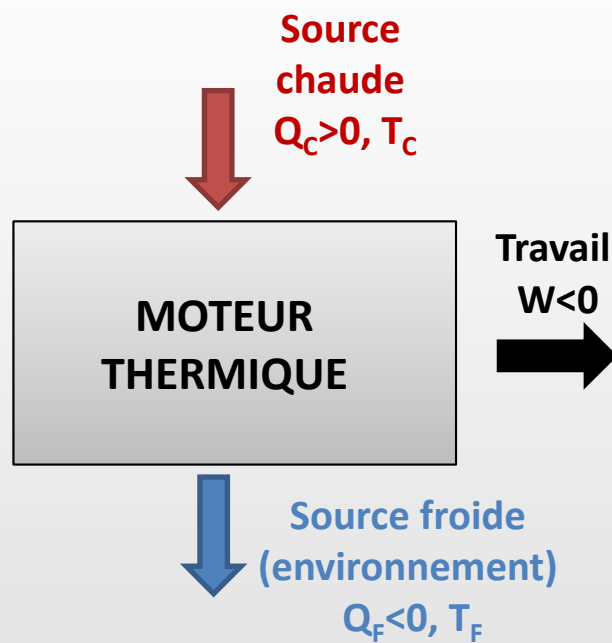


Fin XIXème siècle, la cryogénie est née avec la liquéfaction de l'oxygène

Découverte de la supraconductivité
Théorie de la relativité générale (Einstein)

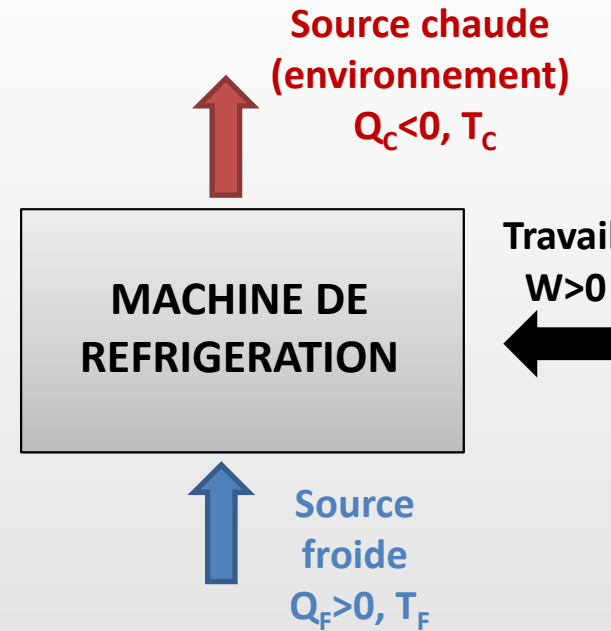
Machine thermique idéale : cycle de Carnot

Efficacité du cycle de Carnot (machine idéale) : $\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie fournie}}$



Rendement théorique **maximal** des systèmes de conversion de la chaleur en travail : **rendement de Carnot**

$$\eta = \frac{W}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C} < 1$$



Rendement théorique **maximal** des systèmes de production du froid :

Rendement de Carnot ou COP (Coefficient de performance)

$$COP = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Performance d'une machine thermique

MOTEUR

T_c	400K (127°C)	1000K (727°C)
η	25%	70%

$T_F = 300K$ (ambient)

MACHINE DE REFRIGERATION

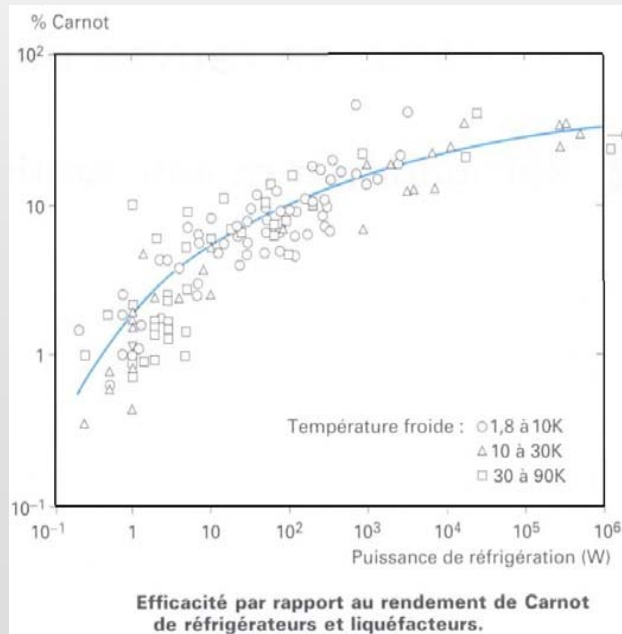
On utilise plutôt la puissance spécifique de réfrigération :

$$\frac{1}{COP} = \frac{\text{Energie fournie}}{\text{Energie utile}}$$

$T_c = 300K$ (ambient)

T_F	80K	4K
COP	36%	1.3%
1/COP	2.3	75

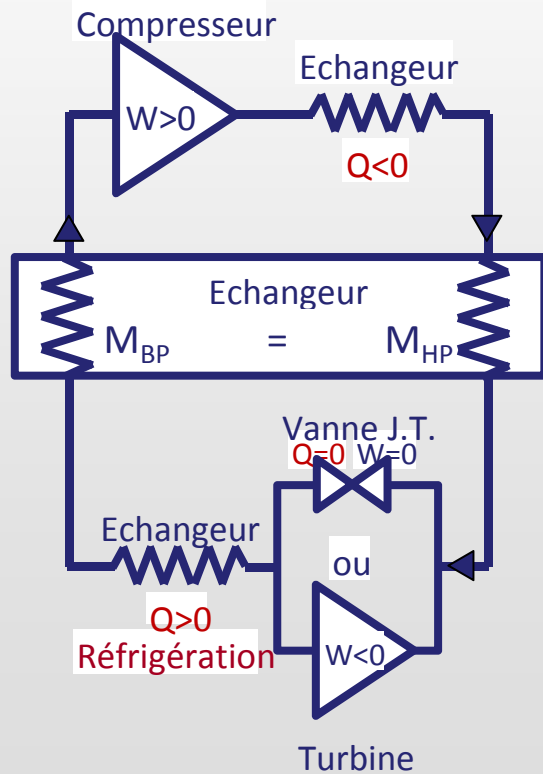
Il faut fournir 75W pour extraire 1W à 4K



- ➔ En pratique, les performances d'une machine de réfrigération sont bien inférieures à la machine idéale
- ➔ Le rendement est essentiellement lié à la taille de la machine indépendamment de la température.
- ➔ Nécessité de limiter les transferts de chaleur vers la source froide.

Cycle de réfrigération

- Extraction de l'énergie du système à niveau constant
- Utilisation d'un fluide en cycle fermé



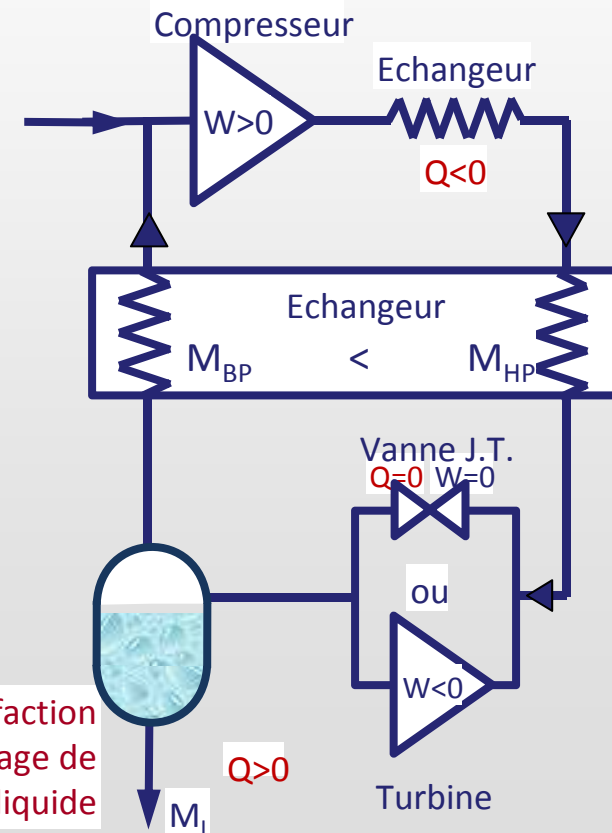
Cycle de liquéfaction

- Extraction de l'énergie à un gaz pour le liquéfier
- Une petite partie du débit HP se transforme en liquide, l'autre partie est utilisée à la réfrigération
- Un débit d'appoint compense le débit de liquide produit

Compression

Echange

Détente

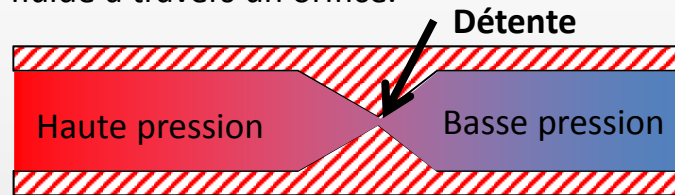


La détente

❑ Détente Joule-Thomson

Détente à travers une vanne

La détente de Joule Thomson est une brusque chute de pression lors du passage du fluide à travers un orifice.



La variation de température dépend des conditions de pression et température à l'entrée de la détente.

❑ Détente par extraction d'énergie

Détente à travers une turbine

Le gaz se détend en fournissant du travail à la turbine et ainsi se refroidit.

Toujours refroidissement lors d'une détente par extraction d'énergie.

Turbines de détente



Plateforme SUPRATECH à l'IPNO

Pour la R&D sur les cavités RF supraconductrices : préparation, conditionnement, assemblage et test

REFROIDISSEMENT DES GAZ

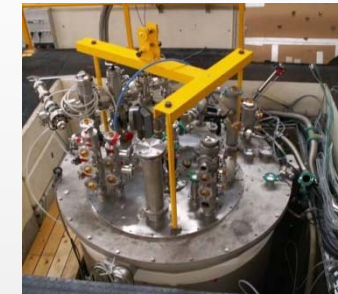
Salle blanche ISO4

Hall de montage

Salle de chimie



Hall d'expériences & Puissance RF



Hall d'expériences (autre bâtiment)



Groupe de pompage sur bain hélium à 1.8K



Stockage de l'hélium gazeux

Liquéfacteur d'Hélium à l'IPNO (depuis 2009)



**Stokage du gaz à 200 bars
équivalent à 3 000 L de liquide**



**Liquéfacteur pouvant produire
70L/h d'hélium liquide**



**Utilisation de l'hélium
dans les halls
d'expériences à 4K ou 2K**



**Stations de pompage
des bains hélium**



**Volumes tampons :
Baudruches (30, 80 & 90 m³)**



Compresseur hélium



- **Réduction de volume** Stockage et transport de combustibles et fluides cryogéniques

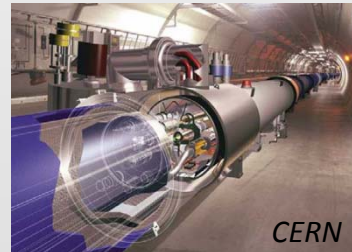


Dewar



Métanier

- **Condensation et adsorption** Séparation des mélanges de gaz (Hélium de l'air), cryopompage (vide poussé)
- **Arrêt des réactions chimiques** Surgélation (industrie alimentaire), Cryoconservation (médical)
- **Supraconductivité** Résistance électrique quasi nulle de certains matériaux à basses T°, effet Meissner



CERN



IRM



Train à lévitation magnétique (Maglev)

- **Réduction des bruits thermiques** instruments de détection ne peuvent fournir la sensibilité désirée que lorsqu'ils sont refroidis à des températures cryogéniques.
- **Propriétés des matériaux** Traitement des pièces mécaniques afin d'améliorer leurs performances (résistance à l'usure)