

Quelques notions en cryogénie

Cours ANF TBD de JP Thermeau 2024 (Laboratoire APC)

- **Cryogénie**
 - Applications
 - Réfrigération avec fluides
 - Hélium
- **Production de froid**
 - Cycles de Carnot
 - Exemples de machines
 - Efficacité
- **Refroidissement**
- **Propriétés des matériaux**
 - Electriques
 - Thermiques
 - Mécaniques

La cryogénie

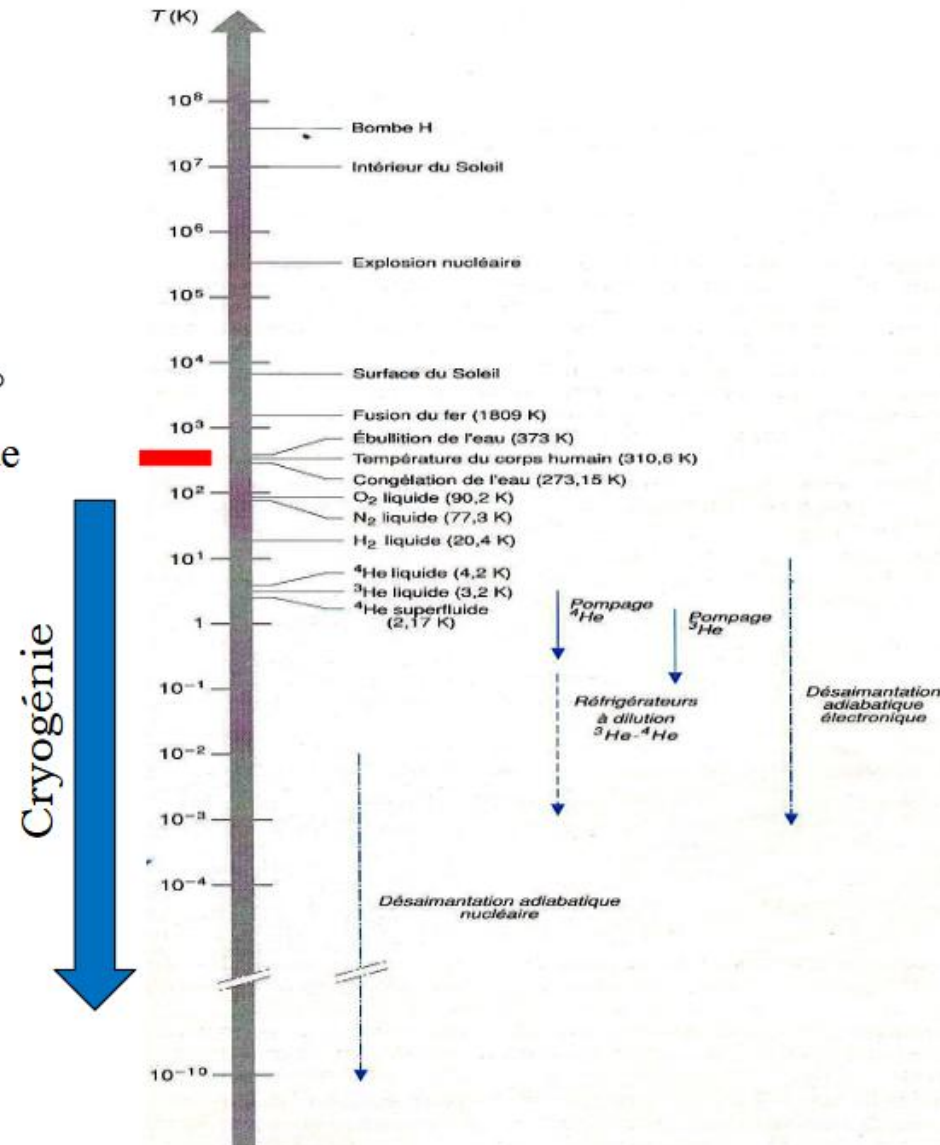
- Produire, maintenir, utiliser les basses T°
- Echelle de température thermodynamique

$$T (\text{Kelvin}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

(définition du zéro absolu)

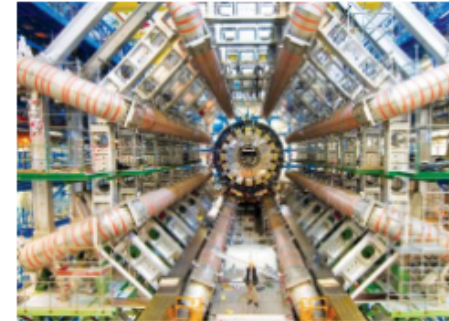
- Domaine cryogénique
 $T < 120 \text{ K}$

- Fluides cryogéniques (cryogènes)
aux températures de :
 - l'azote (domaine autour de 80 K [-193 °C])
 - l'hydrogène (vers 20 K [-253 °C])
 - l'hélium (vers 4 K [- 269 ° C])
- **LHe, LH₂, LNe, LN₂, LAr...**



nécessité de **refroidir des éléments** constitutifs d'un détecteur :

- **éléments actifs** dans la mesure (jonction semi-conductrice, transistor, jonction Josephson pour SQUID, CCD, bolomètre, ...). Propriétés physiques spécifiques , augmentation du rapport signal/bruit par la diminution du bruit "thermique".
- éléments « passifs » dans la mesure :
 - **cavités RF** pour accélérer les particules,
 - **aimants supraconducteurs** pour générer des champs magnétiques intenses déviant, canalisant les particules.



utiliser **un fluide** à basses températures comme **élément sensible** :

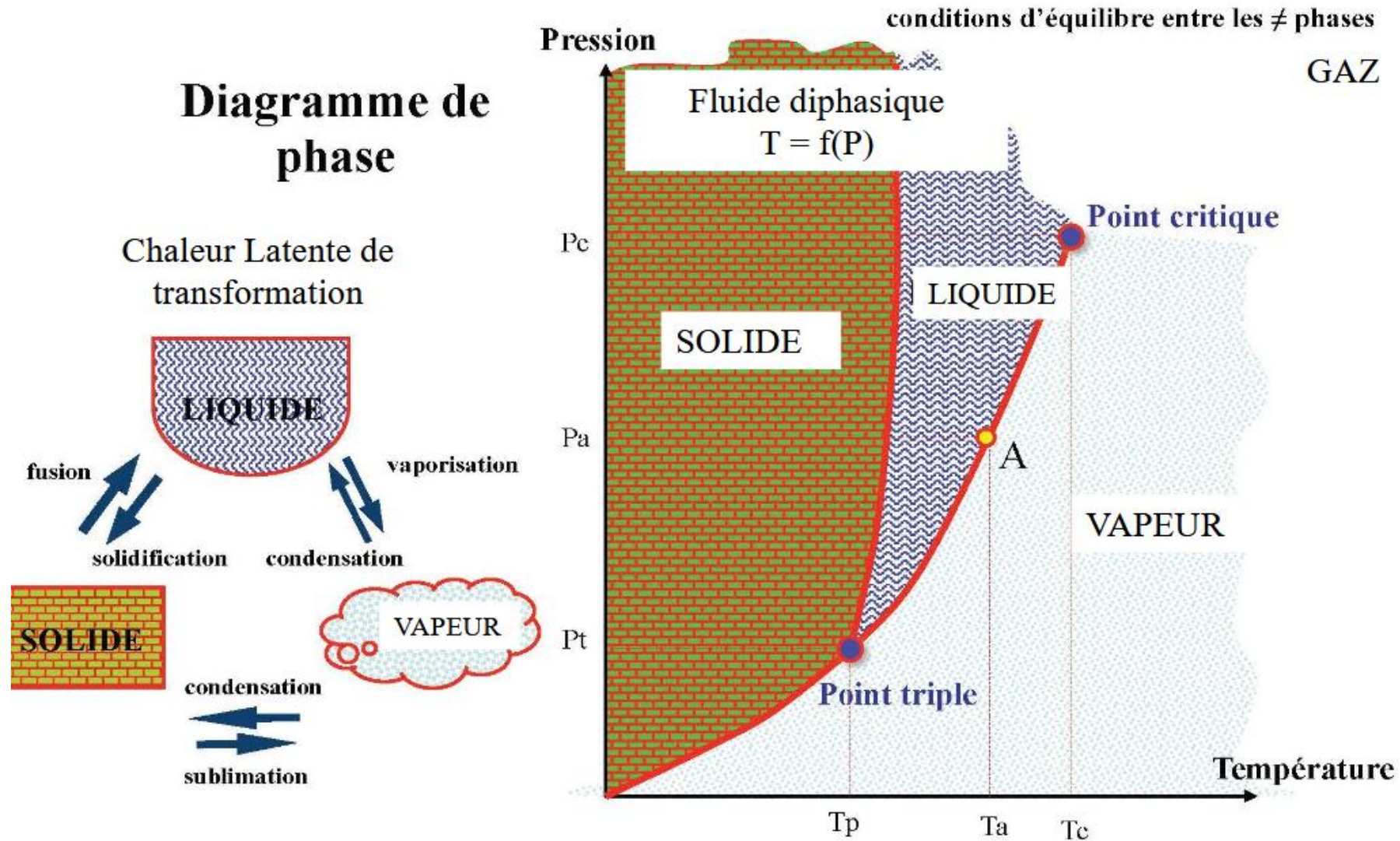
- liquide cryogénique comme cible sur faisceau de particules (**LH₂, LD₂, LHe...**)
- liquide cryogénique comme traceur du passage de particules (**LAr, LKr, LH₂...**)

Forte densité du liquide cryogénique/ même fluide gazeux → plus grand nombre d'interactions entre particules à détecter et le fluide sensible → plus de charges (ou de «bulles») générées → plus de sensibilité

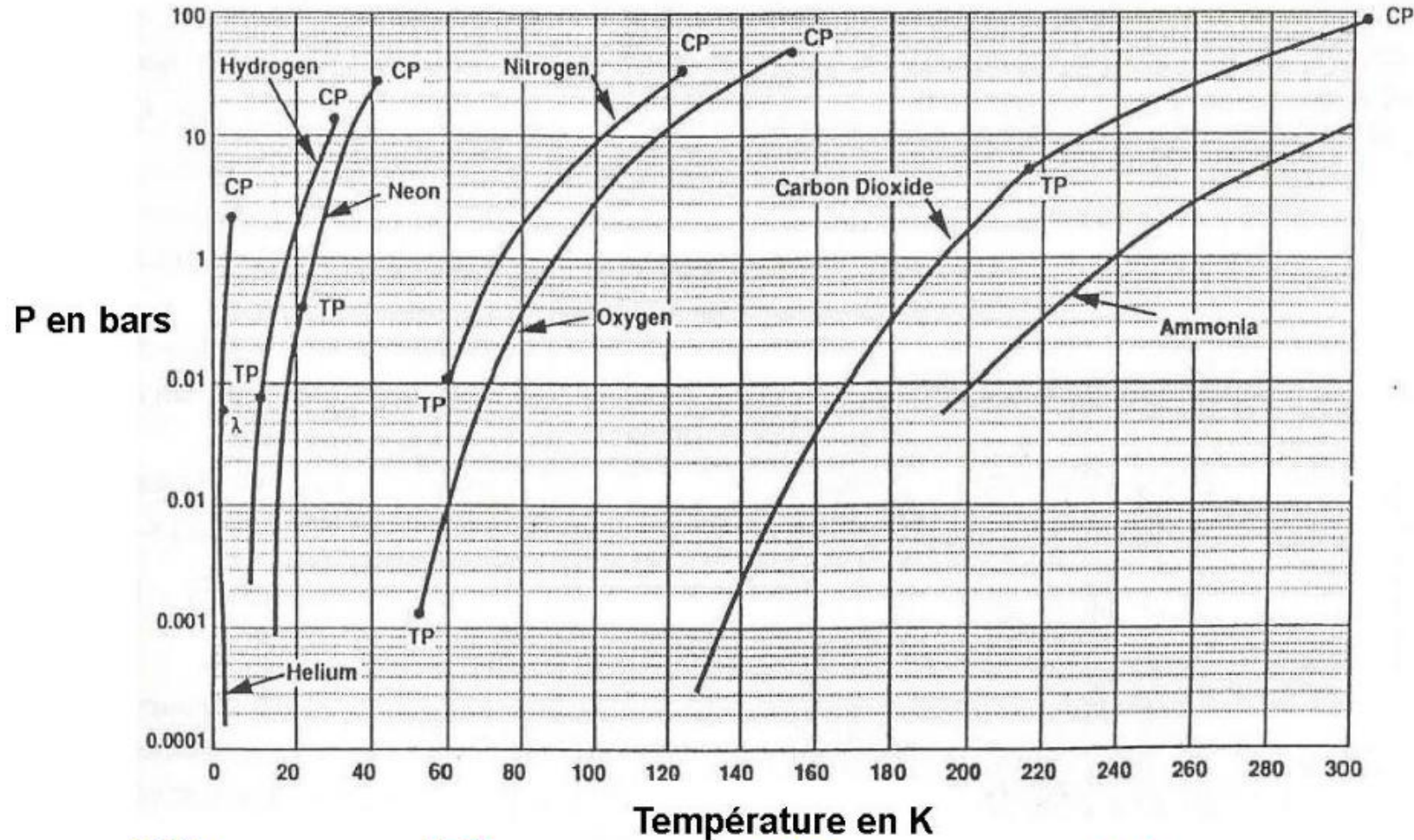
Comment accéder à la puissance froide ?

- Utilisation de fluides cryogéniques comme source froide
 - Xenon, Krypton liquide
 - Argon liquide
 - Azote liquide
 - Néon liquide
 - Hélium liquide
- Utilisation d'un cryogénérateur (quelques W à 4K, centaines W à 77K)
 - Stirling
 - Gifford-MacMahon
 - Tube à Gaz Pulsé
- Utilisation d'un réfrigérateur Hélium de puissance ($P_f > 100W$)
 - associé à un ou de gros équipements
- Utilisation d'un liquéfacteur Hélium
 - distribution hélium liquide
 - récupération hélium gaz





Courbes de tension vapeur



LHe

$\Delta T/\Delta P \approx 1 \text{ mK/mbar}$
@ 4.2 K

LH₂

$\Delta T/\Delta P \approx 2.5 \text{ mK/mbar}$
@ 20.4 K

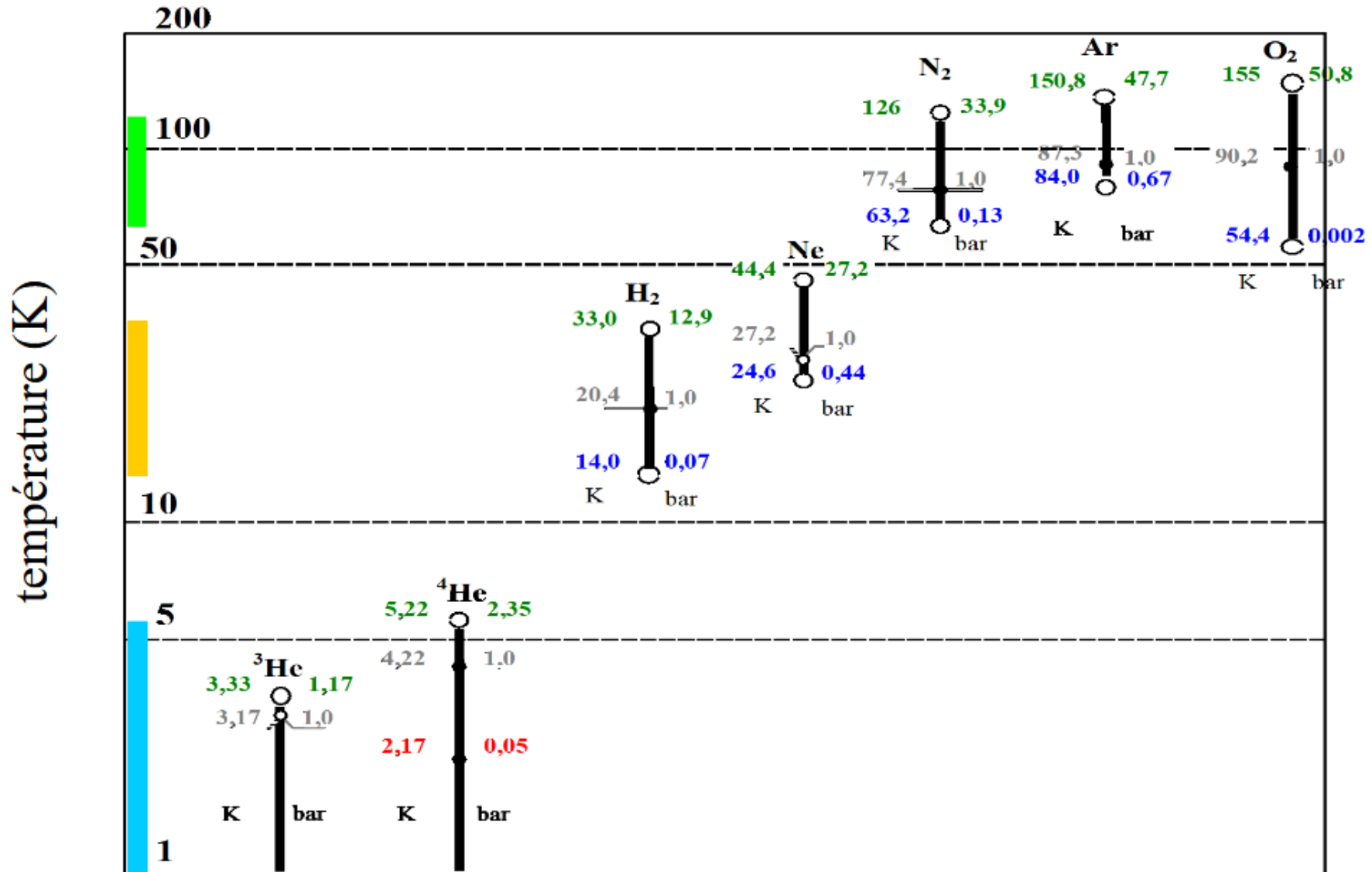
LNe

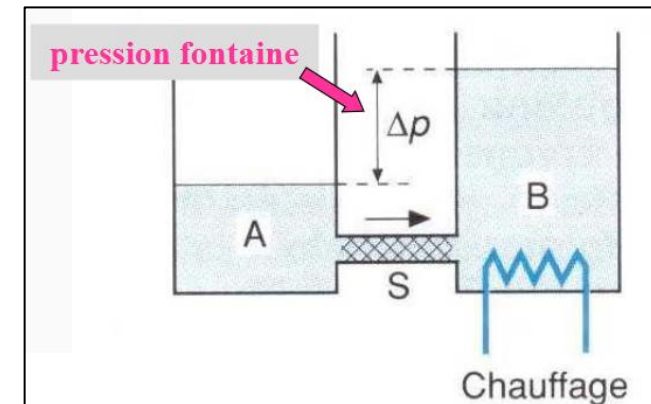
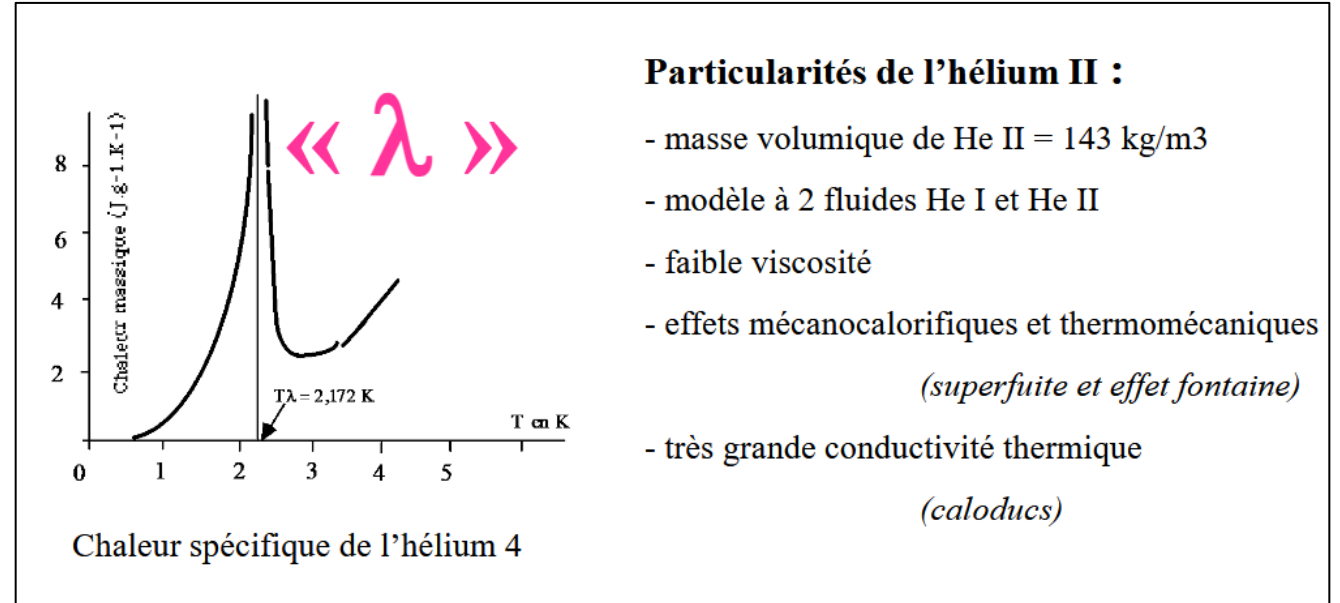
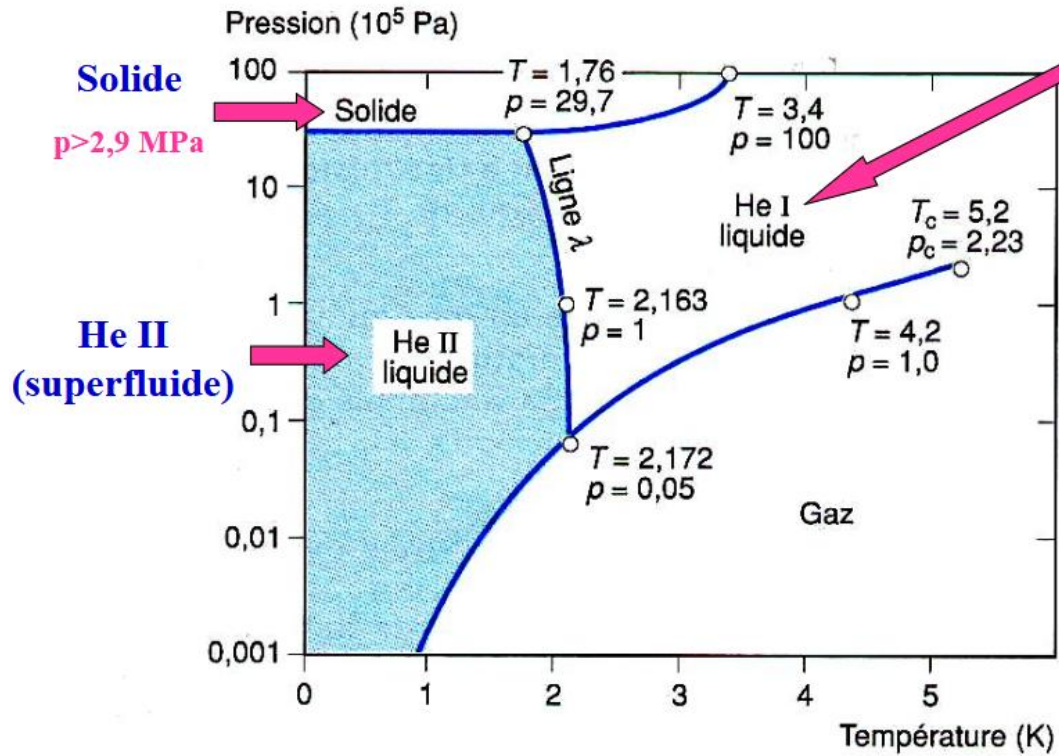
$\Delta T/\Delta P \approx 5.5 \text{ mK/mbar}$
@ 27,1 K

LN₂

$\Delta T/\Delta P \approx 50 \text{ mK/mbar}$
@ 77 K

9





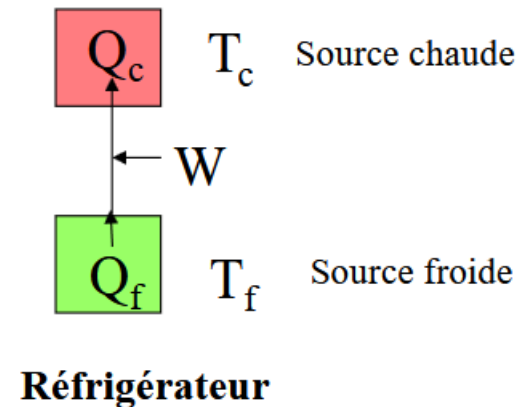
- Machine Idéale $\Rightarrow$ Cycle thermodynamique décrit par Carnot

Limiter les irréversibilités aux frontières $\Rightarrow$ Isotherme

Transformation réversible $\Rightarrow$ Isentropique

- Machine de réfrigération

Produire un gaz froid ou le liquéfier, c'est réaliser un cycle thermodynamique qui va, en absorbant du travail et en rejetant de la chaleur en source chaude, réussir à extraire de l'énergie calorifique en source froide.



La chaleur ne peut pas s'écouler spontanément (sans compensation) d'une source froide vers une source chaude $\Rightarrow$ consomme du travail W

1er principe : $Q_c = W + Q_f$

d'où $W = Q_c - Q_f$

$Q_f = T_f \times \Delta S$

$Q_c = T_c \times \Delta S$

- 1-2 : Transformation isotherme (évacuation de Q_c en source chaude)
- 2-3 : Transformation adiabatique réversible
- 3-4 : Transformation isotherme (absorption de Q_f en source froide)
- 4-1 : Transformation adiabatique réversible

compression
détente
détente
compression

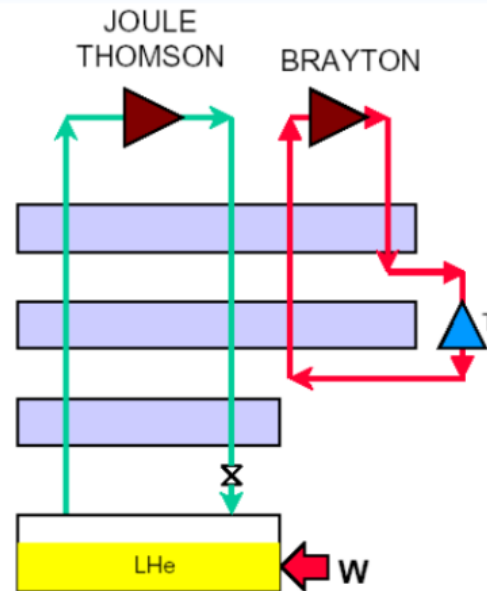
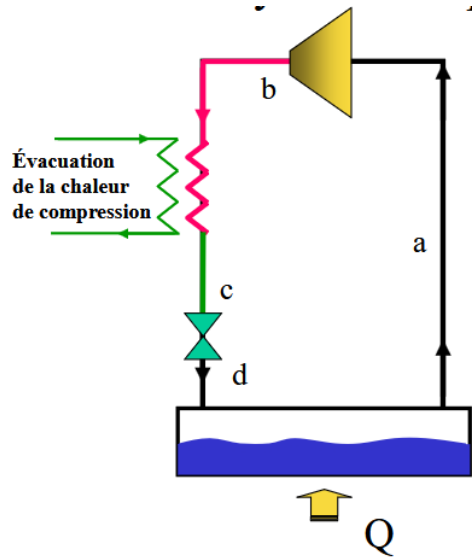
$$Efficacité, coefficient de performance COP(Carnot) = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

Puissance spécifique = $\frac{1}{COP} = \frac{T_f}{T_c - T_f} = \frac{W}{Q_f}$ puissance nécessaire à T° ambiante pour absorber 1W à T_f

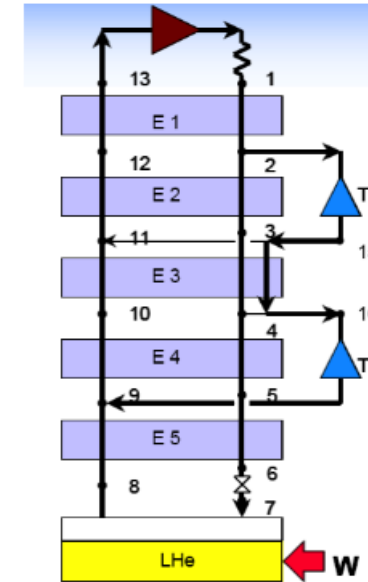
--	--	--	--

A.N : performances idéales

$T_c = 300\text{ K}$	$T_f = 4.2\text{K}$	$T_f = 20\text{K}$	$T_f = 77\text{K}$
1/COP (W/W)	70	14	2.9



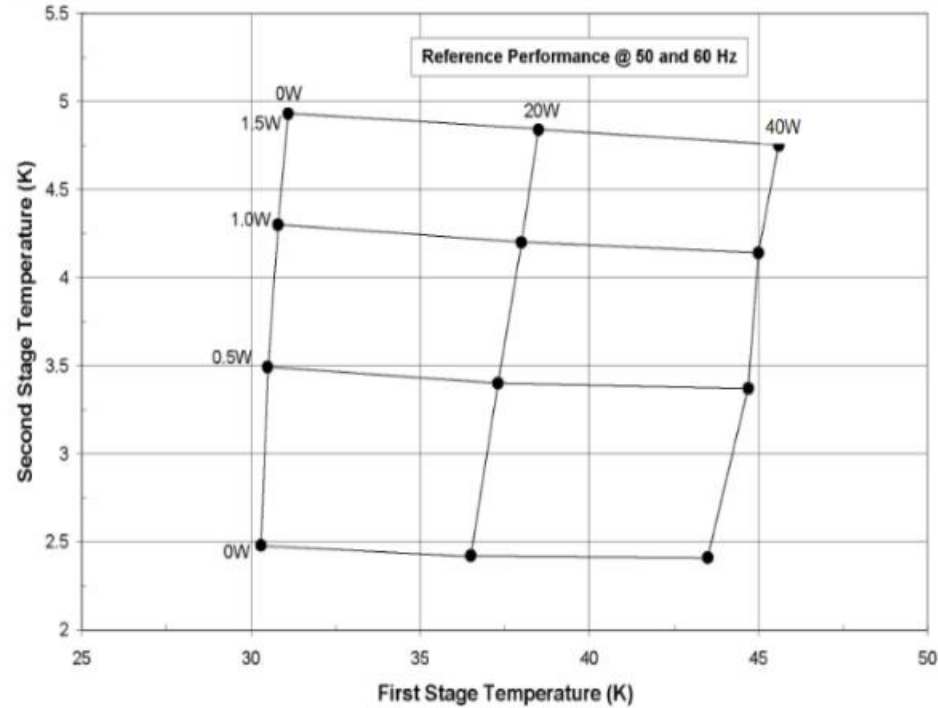
- Couplage d'un cycle de Brayton avec un cycle Joule-Thomson
- Cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air ou de l'hélium



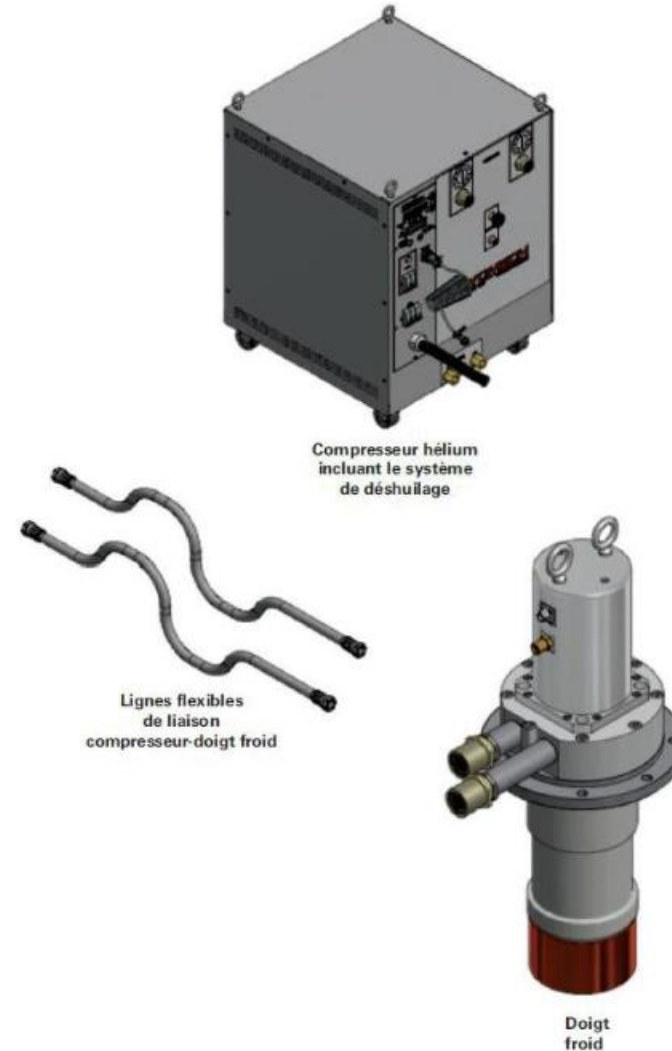
COP
> 500 W/W

Sources commerciales Air Liquide

Liquefaction capacities	HELIAL SL	HELIAL ML	HELIAL LL
Throughput without nitrogen pre-cooling	15 to 25 L/hr	35 to 70 L/hr	110 to 145 L/hr
Throughput with nitrogen pre-cooling	30 to 50 L/hr	75 to 150 L/hr	215 to 330 L/hr
Consumption of liquid nitrogen	< 25 L/hr	< 60 L/hr	< 125 L/hr
Consumption of electricity	45 to 55 kW	75 to 132 kW	160 to 250 kW
Maximum efficiency	1 kWhr/L	0.9 kWhr/L	0.75 kWhr/L



Cryogénérateur à deux étages :
4K et 40K



Cycle de réfrigération continu

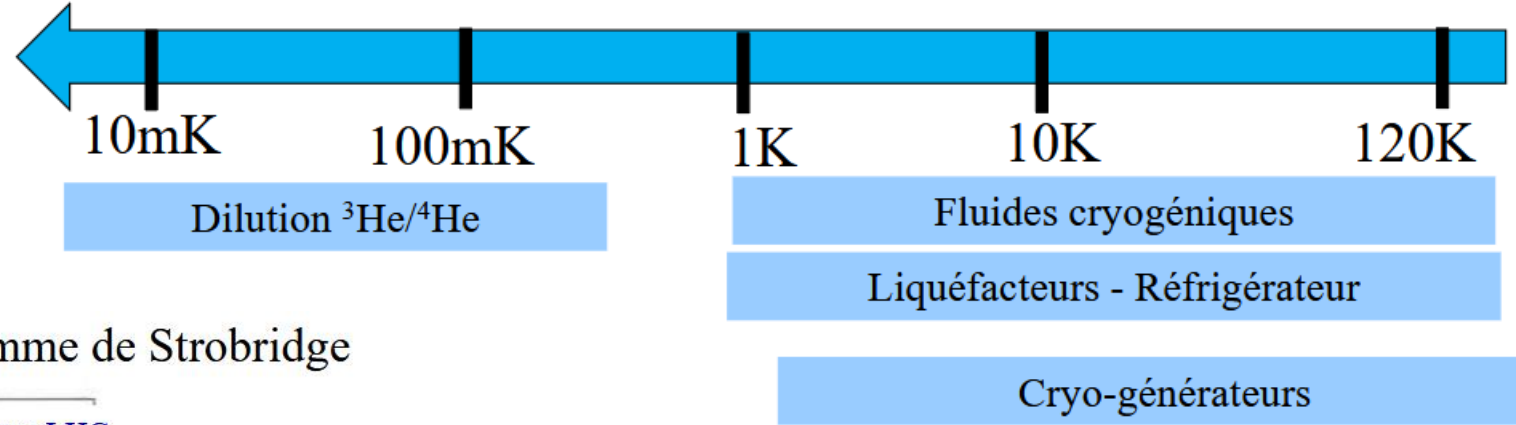
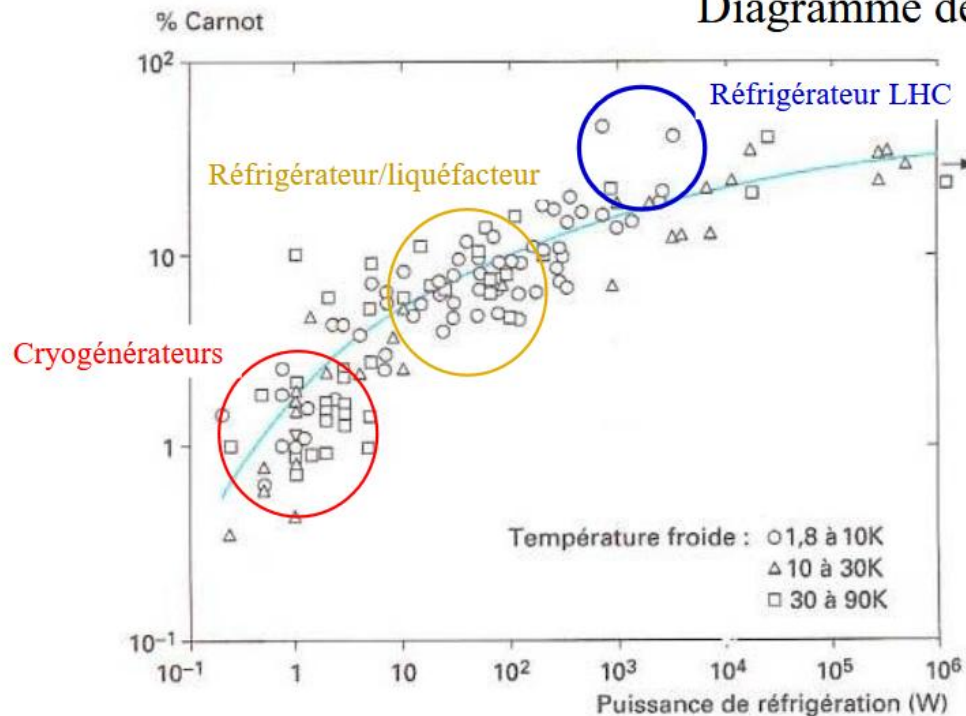


Diagramme de Strohbridge



- le balayer avec un gaz amené à basse température qui se réchauffe au contact de l'objet (chaleur à extraire lors de la mise en froid ou puissance thermique dissipée aux conditions nominales)
- circulation d'un fluide monophasique avec variation de température entre entrée-sortie

- Refroidissement d'un gaz (généralement)**

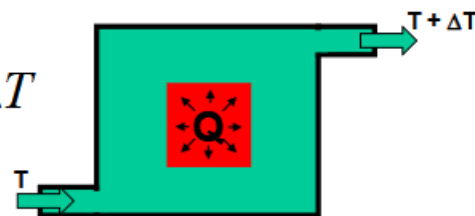
Ex: dans un processus à pression constante,

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$\dot{m}$ débit massique de fluide ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

C_p chaleur spécifique du fluide ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

ΔT différence de température entre entrée et sortie



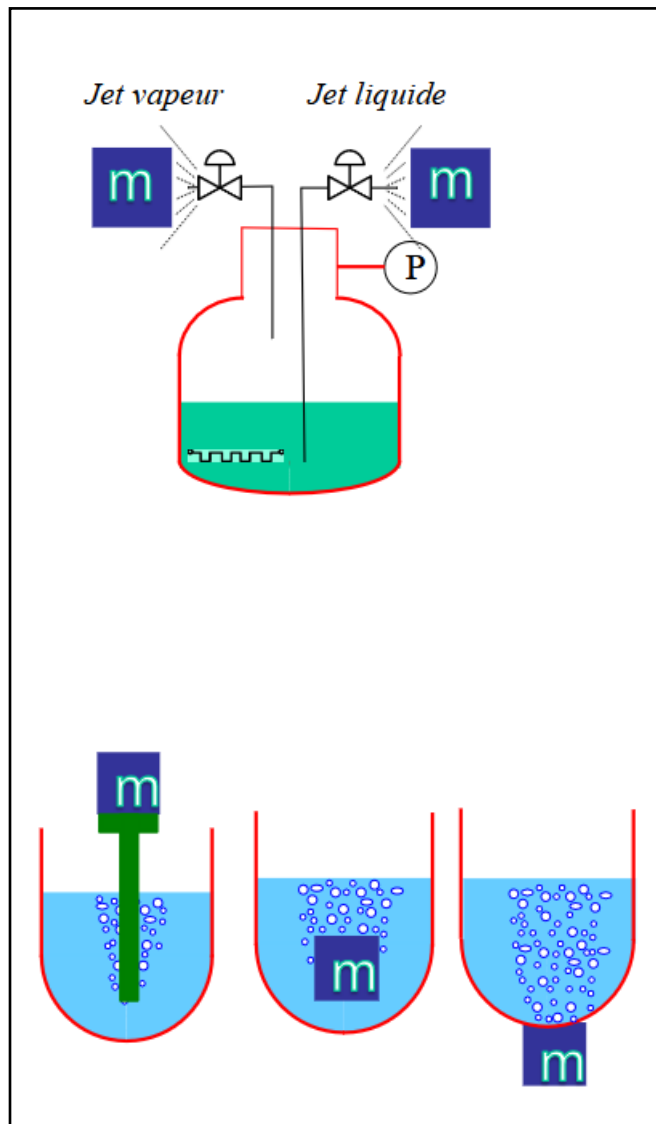
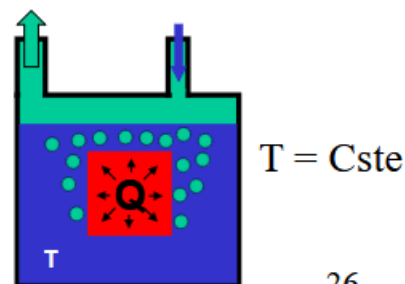
- le « mouiller » (directement ou non) avec un liquide saturé en utilisation la chaleur latente de vaporisation du fluide à sa température d'ébullition
- gestion d'un fluide diphasique mais température constante

- Liquéfaction d'un gaz**

$$Q = \dot{m} \cdot L_v$$

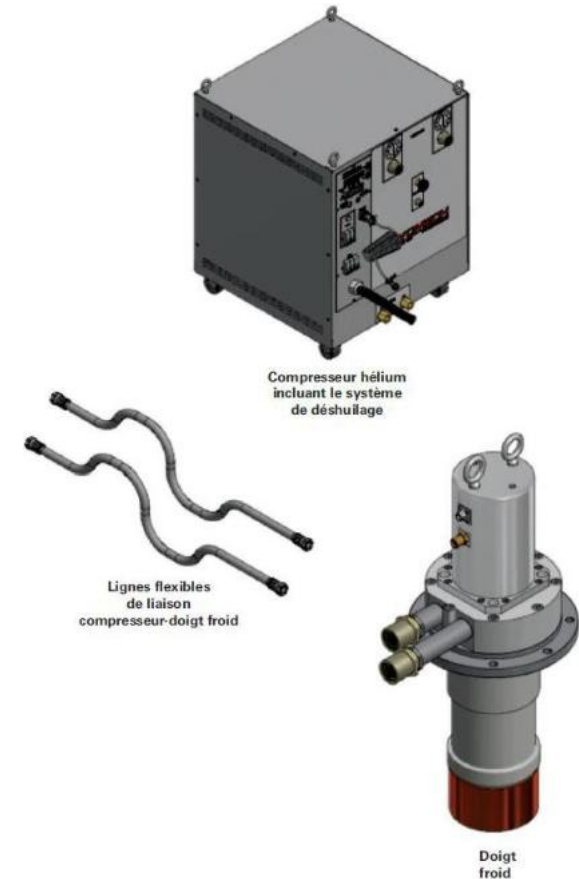
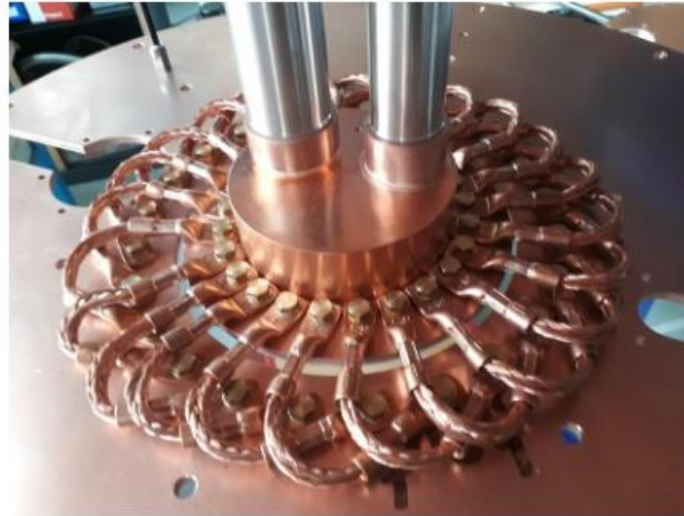
$\dot{m}$ débit massique de liquide vaporisé ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

L_v chaleur latente de vaporisation du liquide ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)



Transfert de chaleur par conduction solide avec métal bon conducteur de la chaleur (cuivre, aluminium, ...)

- Tresses
- Feuillard
- Plaque rigide



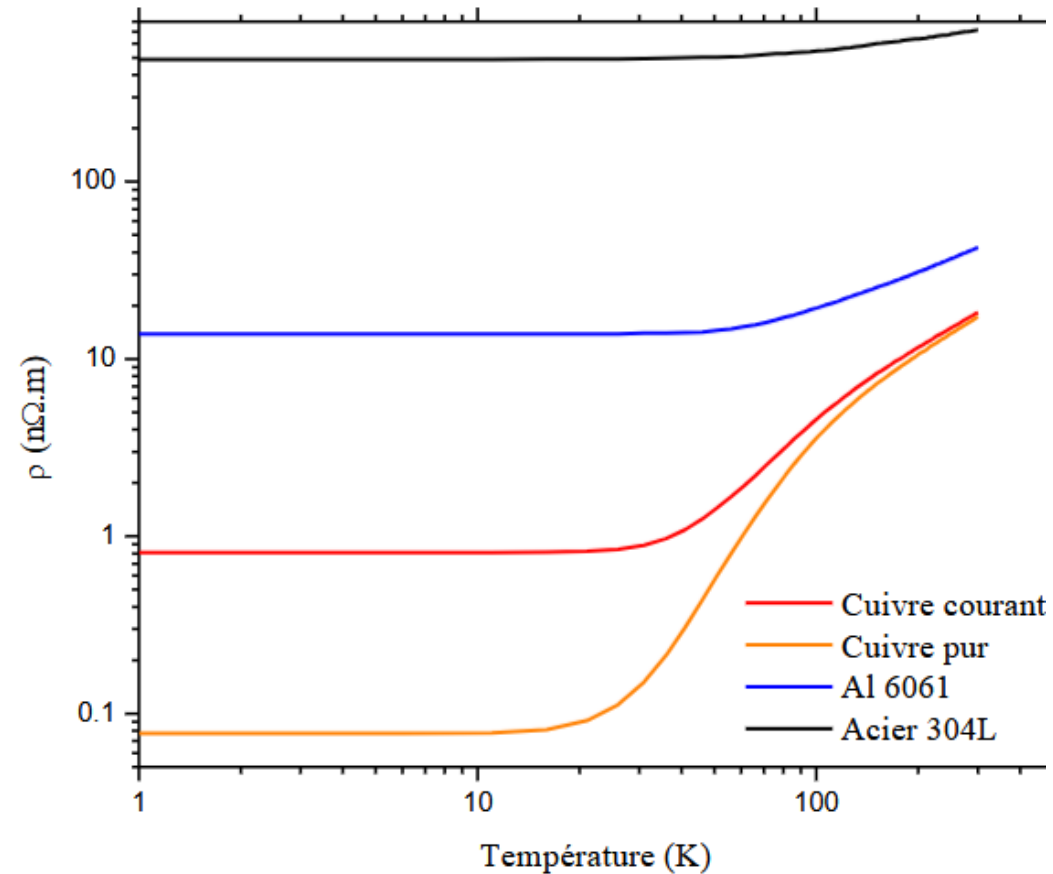
Transfert par caloduc (fluide caloporteur : hélium, azote, ...)

Les propriétés des matériaux évoluent lorsque la température baisse.

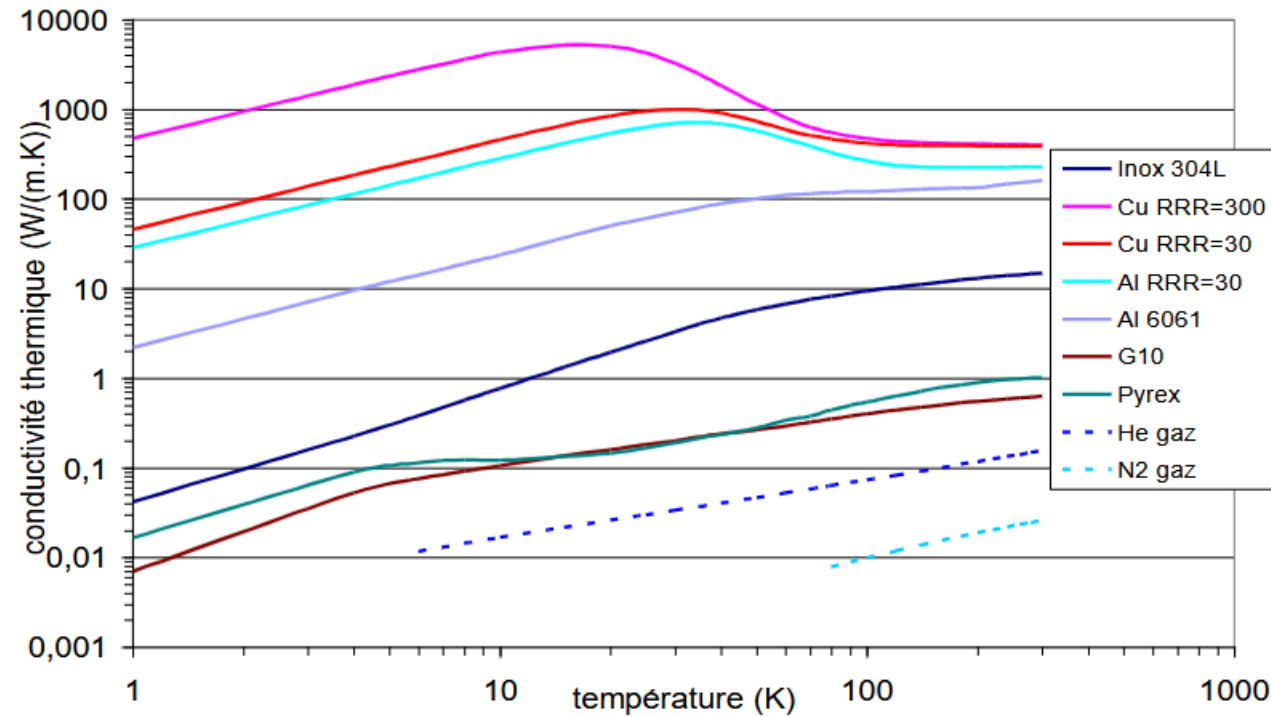
La tendance générale est :

- Résistivité électrique diminue
- Conductivité thermique augmente ou diminue
- Chaleur massique thermique diminue
- La dilatation thermique diminue
- De nombreux matériaux deviennent fragile lorsque la température diminue

- La résistivité à l'ambiante ne dépend que du métal de base
- La résistivité à basse température dépend de la pureté du matériau
- Pour les métaux, le Rapport de Résistivité Résiduelle (RRR) est une indication de pureté souvent utilisée en métallurgie pour caractériser la qualité du métal
- Pour le cuivre et l'aluminium ordinaire, le RRR varie de 5 à 150. Les cuivres OFHC (CuC2) ont un RRR d'environ 100-200
- Dans le cas de métaux très purs, il peut monter à 500 voire 5000



$$RRR = \frac{\rho(273 \text{ K})}{\rho(4,2 \text{ K})} \approx \frac{\rho(273 \text{ K})}{\rho_0}$$

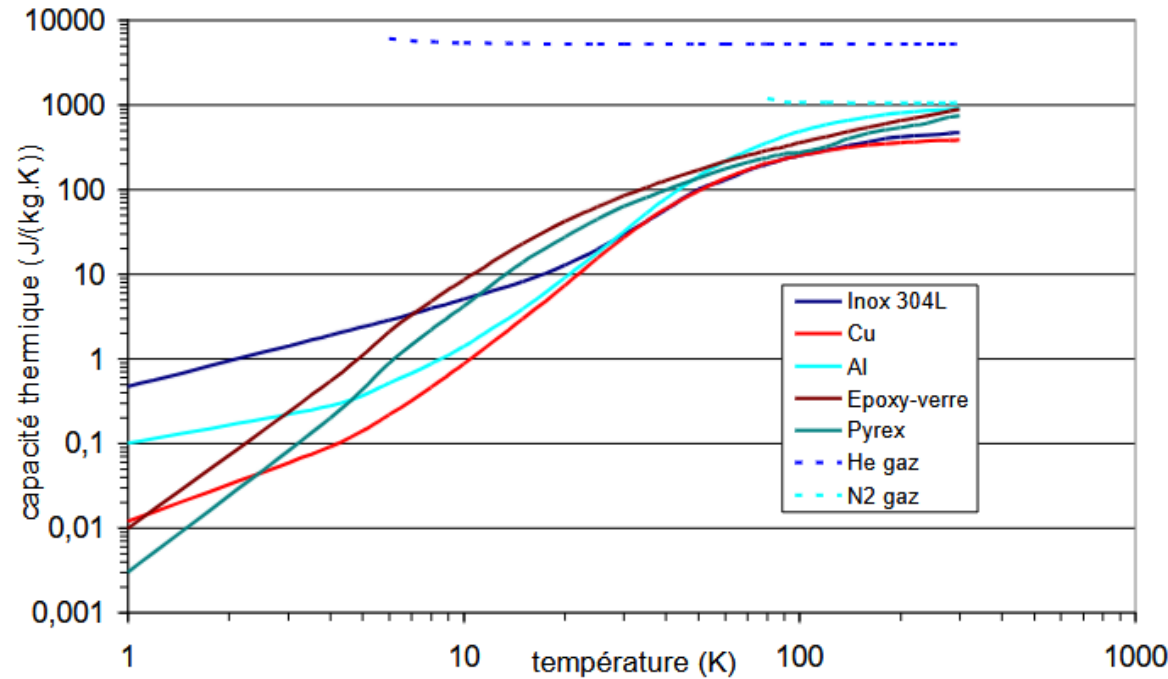


Pour les isolants

- $k \propto T^3$ (Isolants cristallisés)
- k est de plusieurs ordres inférieurs à celle des métaux
- A basse température leur conductivité décroît plus rapidement

Pour les métaux

- $k \propto T$ à très basse T
- Phonons influencent fortement k des alliages

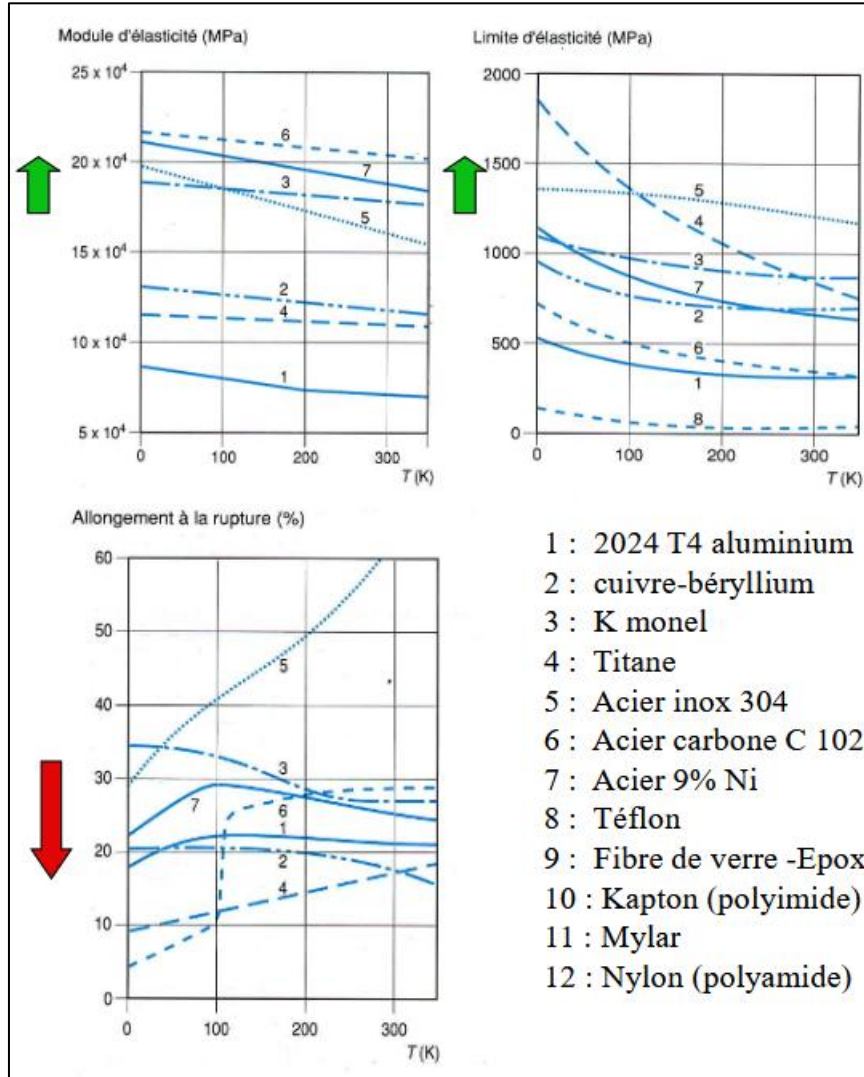
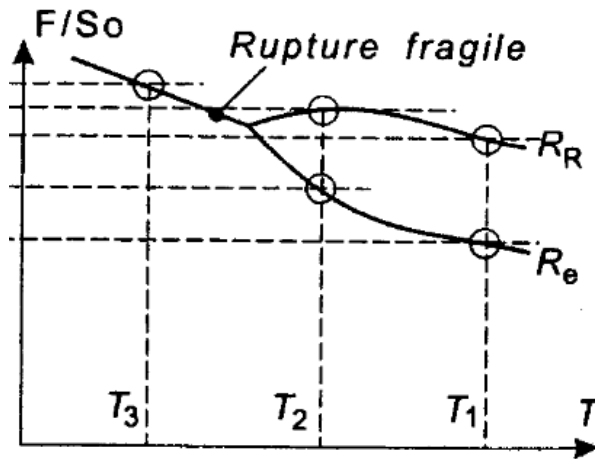
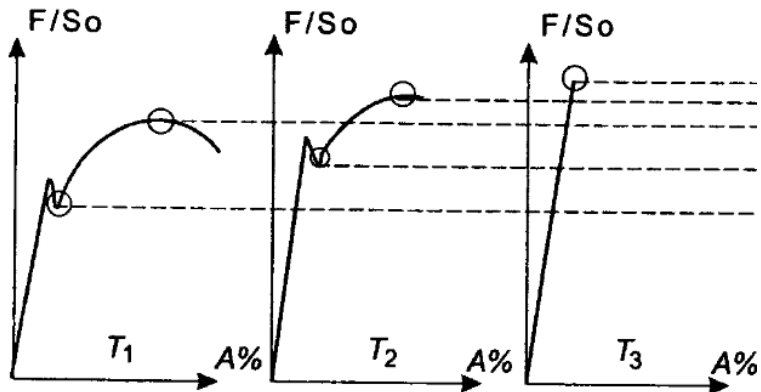


C constant à HT, $C_v = 3R$.

Le comportement de différents matériaux peut se ramener à une fonction unique selon le modèle de DEBYE.

En dessous de 100 K, C chute très rapidement (peu d'énergie à extraire ou à apporter pour descendre ou monter en température). C constant à HT, $C_v = 3R$.

- Pour les métaux $C \propto T$ pour $T < 30$ K
(électrons BT+ phonons HT)
- Pour les isolants $C \propto T^3$ (phonons)



- Les modules d'élasticité varient peu avec la température (meilleur à BT)
- La limite d'élasticité et la limite à la rupture augmentent aux basses températures
- La plasticité devient quasi nulle à froid (allongement très faible avant rupture)
- La fragilité augmente à basse température
- Limite de fatigue augmente à basse température (cycles de fatigue)

ANF IN2P3 : Vide et Cryogénie

CNRS Formation : Cryogénie

Niveau ingénieur

GRENOBLE

du lundi 18/03/2024 au vendredi 22/03/2024

Niveau technicien

GRENOBLE

du lundi 24/06/2024 au vendredi 28/06/2024

SFV/UPC/IJCLab : Cryogénie

Tronc Commun

PARIS

Du mardi 14 mai au jeudi 16 mai 2024

Parcours différencié Technicien et Ingénieur

ORSAY

Du mardi 11 juin au jeudi 13 juin 2024