



Introduction à la CRYOGENIE

**ACTION NATIONALE DE FORMATION 11 au 15 mars 2024
« Techniques de Base des Détecteurs »**

J.P. Thermeau

APC (CNRS/IN2P3 - Université Paris Cité)

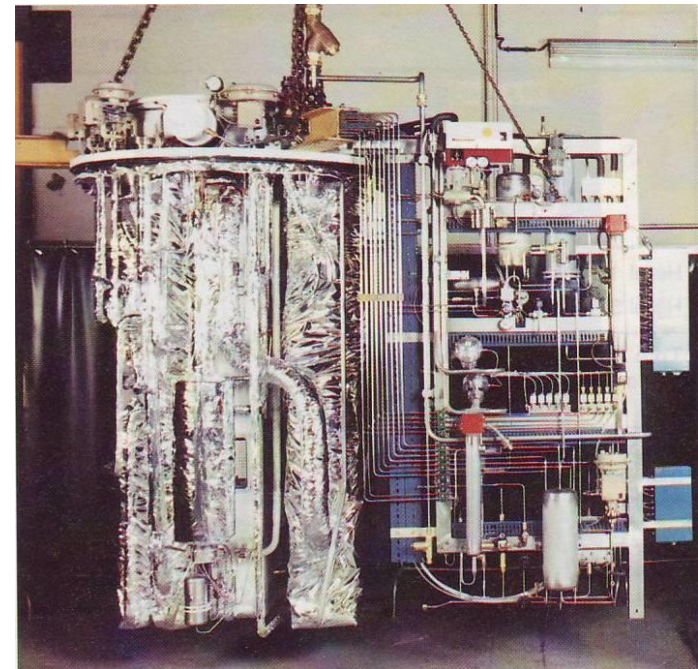
Thermodynamique
Production de froid
Fluides



Thermique
Isolation/
couplage thermique

Cryogénie

Conception mécanique
Hyperstatique/Machine/
Vide



Plan

- **Cryogénie**
 - Applications
 - Réfrigération avec fluides
 - Hélium
- **Production de froid**
 - Cycles de Carnot, Linde, Claude
 - 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

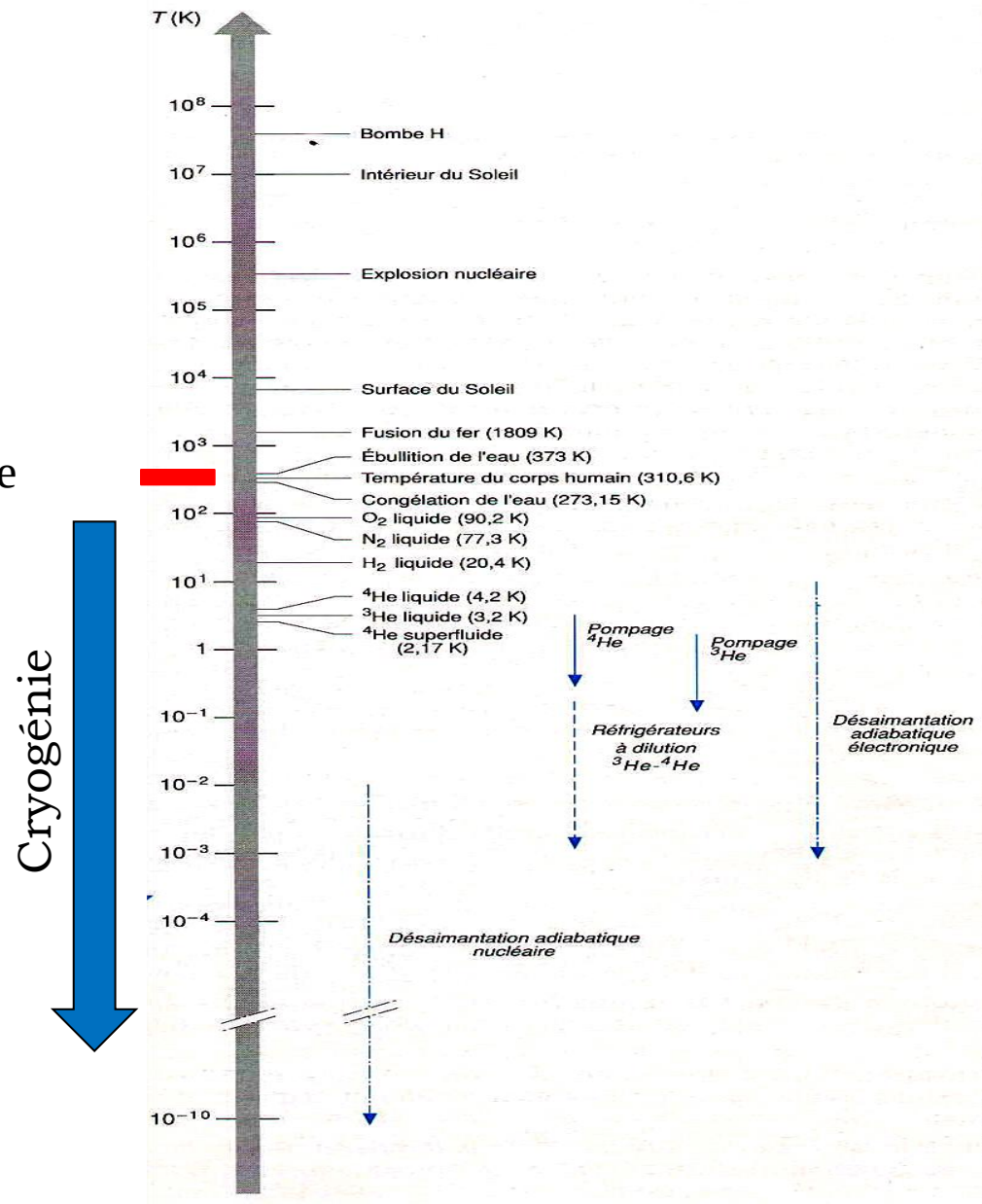
$$T < 120 \text{ K}$$

- 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...**



Les domaines d'applications

Recherche

Mesures à très basse température

Matériau,, physique du solide

Développement instrumentation

SQUID

Accélérateurs et physique des particules

Aimants, cavités, détecteurs

Fusion nucléaire contrôlée

Confinement magnétique du plasma, cible
L3H pour confinement inertiel par laser

Astrophysique

Capteurs refroidis pour observation au sol
ou spatiale...

Militaire

Détection IR...

Industrie

Electronique

Détecteur, composants ...

Electrotechnique

Stockage, transport, alternateurs, limiteur,...

Transport

train Maglev

Liquéfaction et réfrigération

Stockage des fluides
Isolation

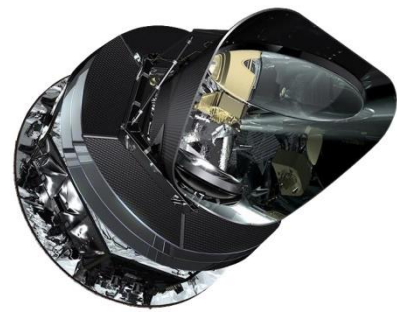
Spatial

Propulseur (carburant et moteur), satellite (tests...),
blindage magnétique

Médical

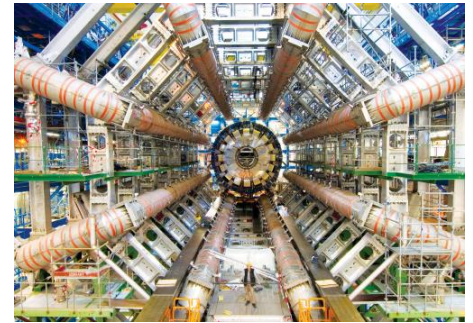
IRM
Cryochirurgie, cryoconservation

La cryogénie et les détecteurs



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 ?

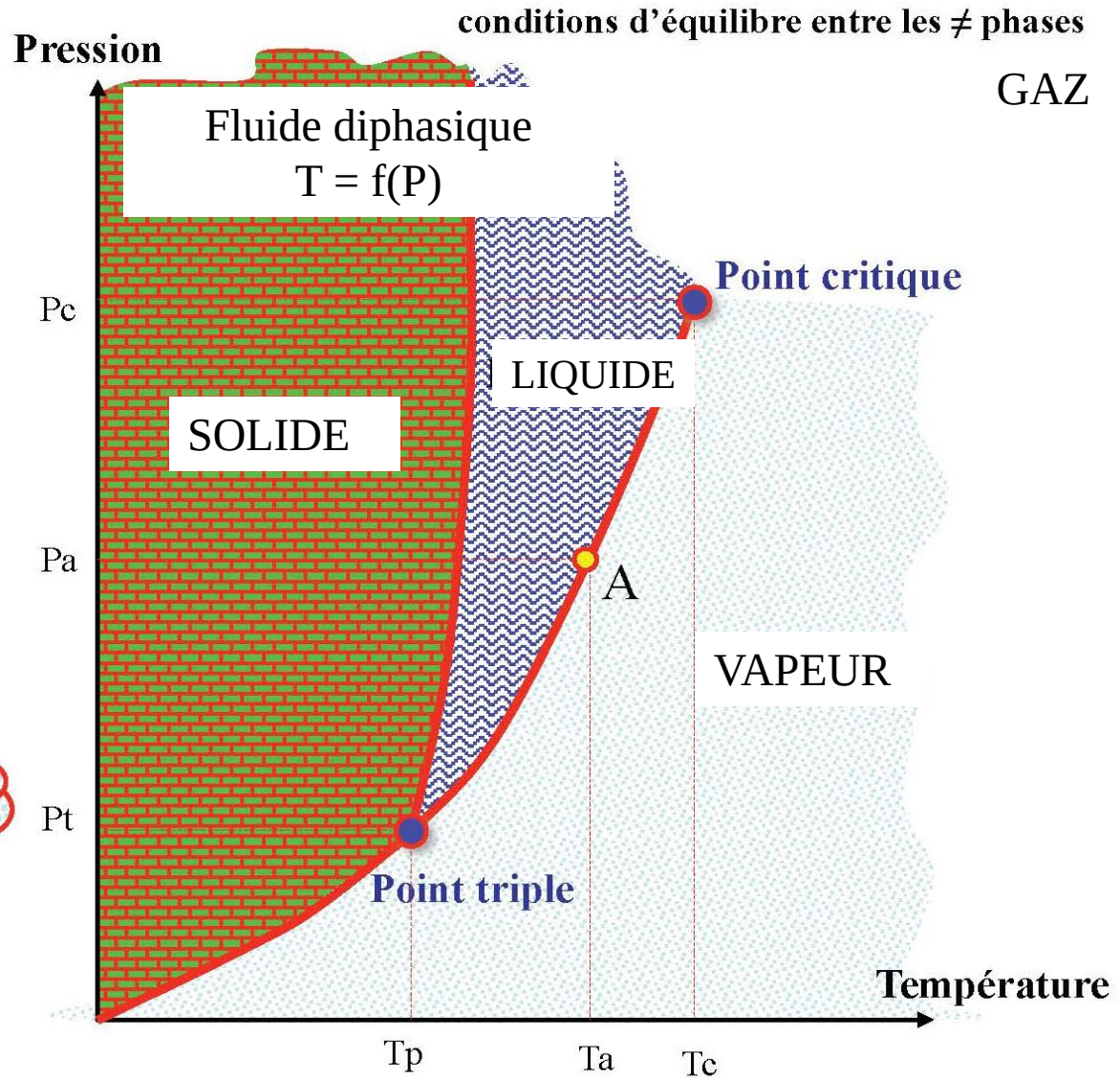
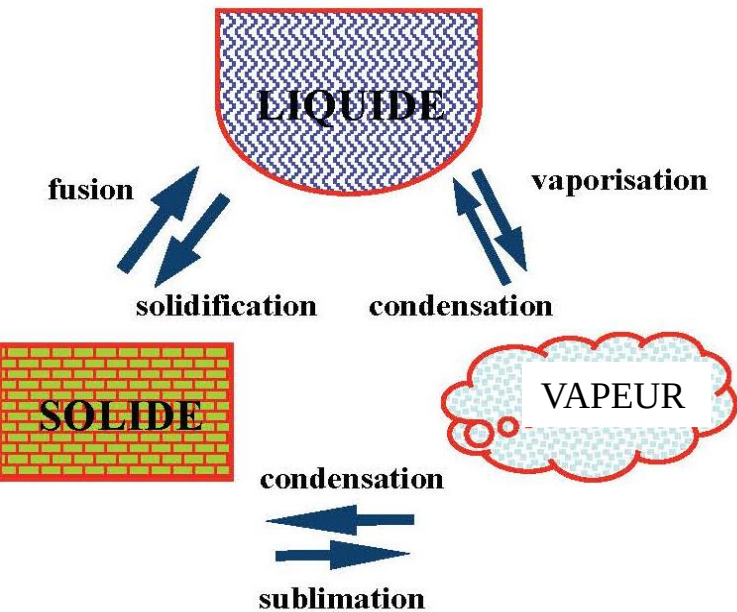
- Utilisation de fluides cryogéniques comme source froide
 - Xenon, Krypton liquide
 - Argon liquide
 - Azote liquide
 - Néon liquide
 - Hélium liquide
- Utilisation d'un cryogénérateur (quelques W à 4K, centaines W à 77K)
 - Stirling
 - Gifford-MacMahon
 - Tube à Gaz Pulsé
- Utilisation d'un réfrigérateur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



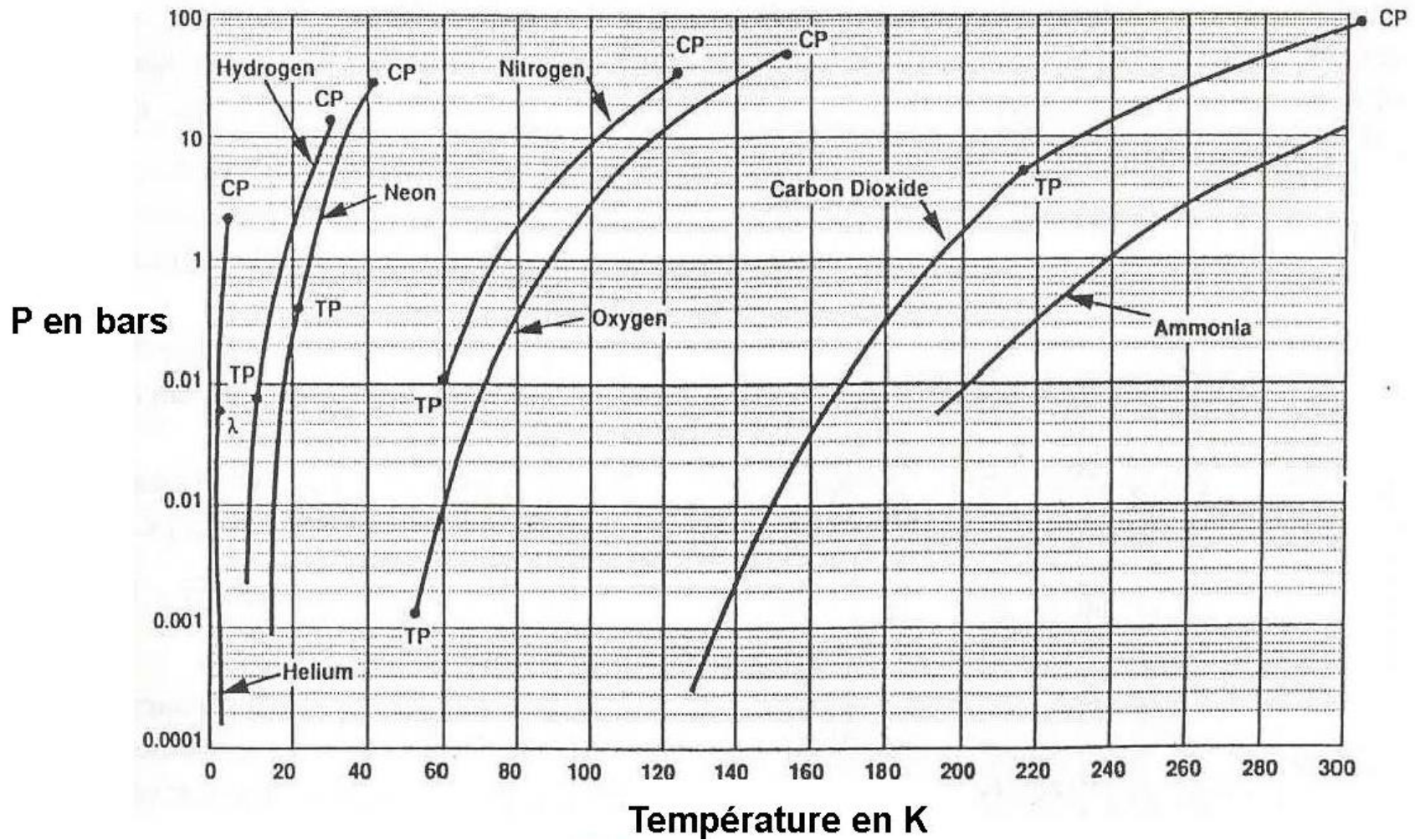
Les trois états de la matière

Diagramme de phase

Chaleur Latente de transformation



Courbes de tension de 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

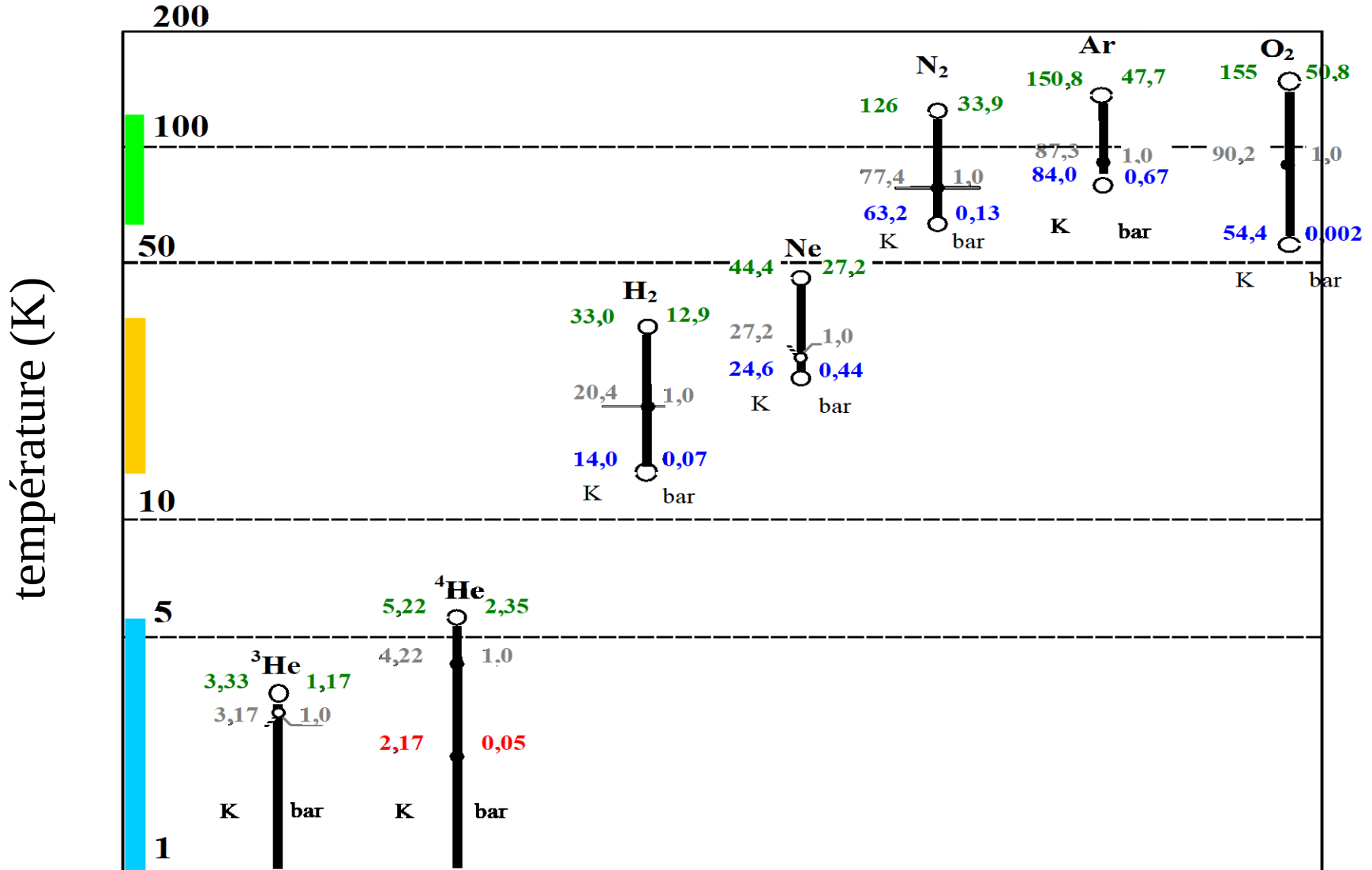
LNe

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

LN₂

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

Domaine d'existence des cryofluides



HELIUM - He⁴

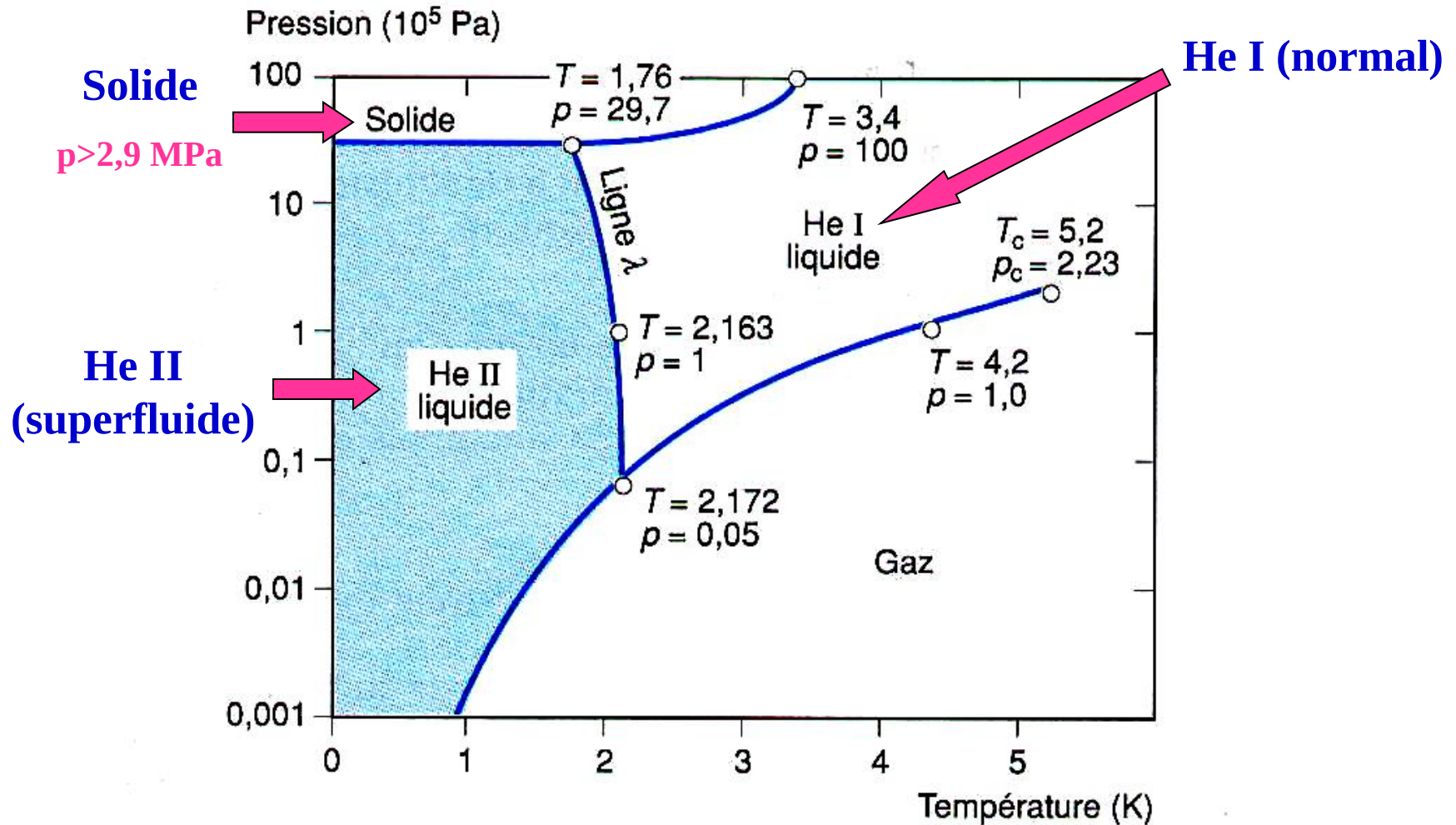


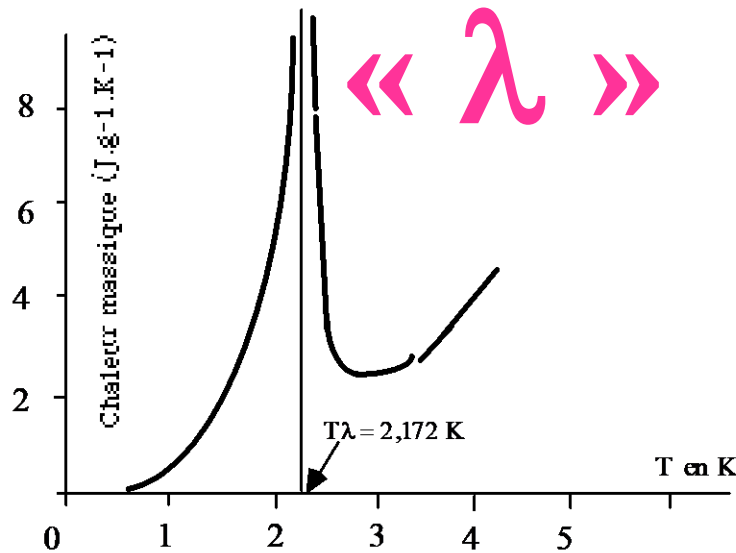
Diagramme d'équilibre de l'hélium

HELIUM - He⁴

superfluide

Particularités de l'hélium II :

- masse volumique de He II = 143 kg/m³
- modèle à 2 fluides He I et He II
- faible viscosité
- effets mécanocalorifiques et thermomécaniques
(*superfuite et effet fontaine*)
- très grande conductivité thermique
(*caloducs*)

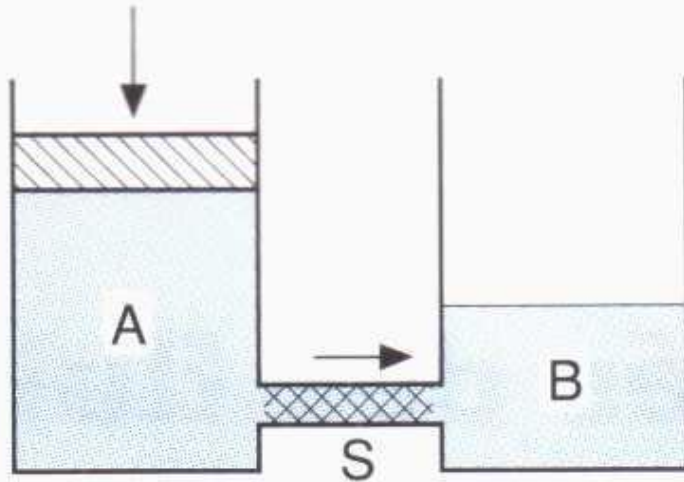


Chaleur spécifique de l'hélium 4

HELIUM - He⁴

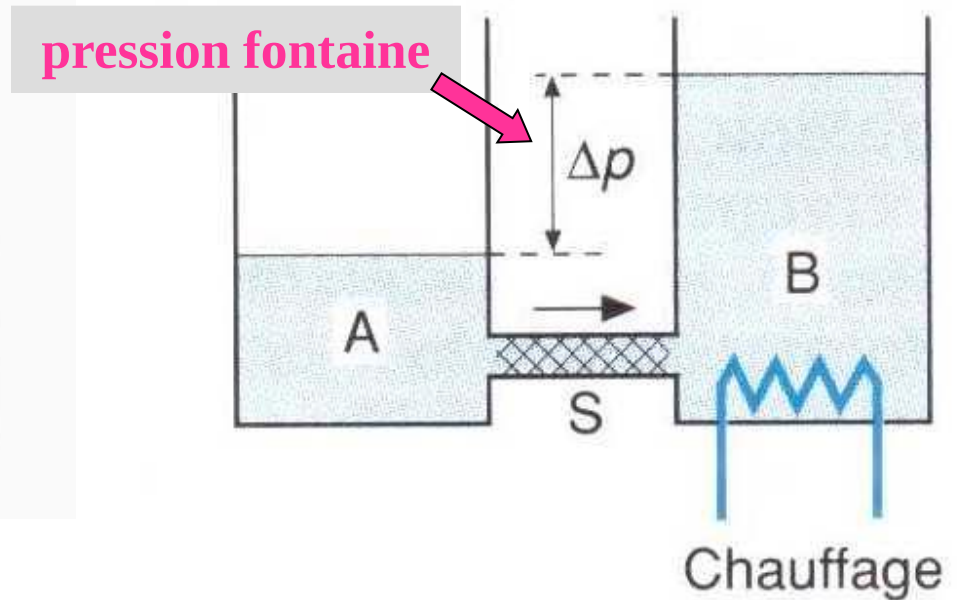
superfluide

Effet mécanocalorifique



déplacement du fluide de A vers B:
 $(\rho_n/\rho_s)_A \uparrow \Rightarrow T_A \uparrow$ et $(\rho_n/\rho_s)_B \downarrow \Rightarrow T_B \downarrow$

Effet thermomécanique



Chauffage en B $\Rightarrow$ déplacement de A vers B
superfluide aspiré en B et $T_A < T_B$

Comment produire la puissance mécanique ou de réfrigération ?

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

 Limiter les irréversibilités aux frontières $\Rightarrow$ Isotherme

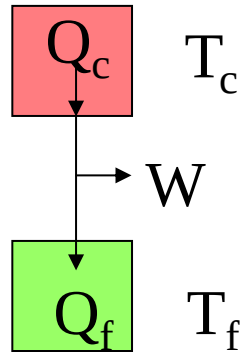
 Transformation réversible $\Rightarrow$ Isentropique

- Machine de réfrigération

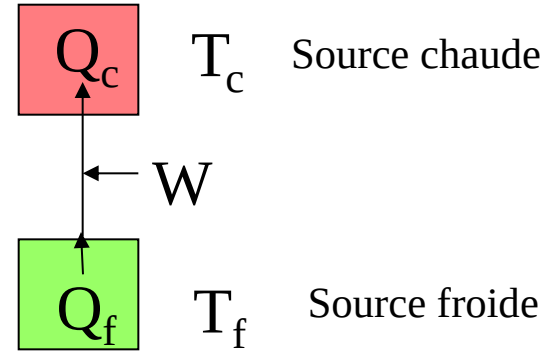
 Produire un gaz froid ou le liquéfier, c'est réaliser un cycle thermodynamique qui va, en absorbant du travail et en rejetant de la chaleur en source chaude, réussir à extraire de l'énergie calorique en source froide.

Machine de Carnot

$$\eta_{\text{moteur}} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$



Moteur thermique

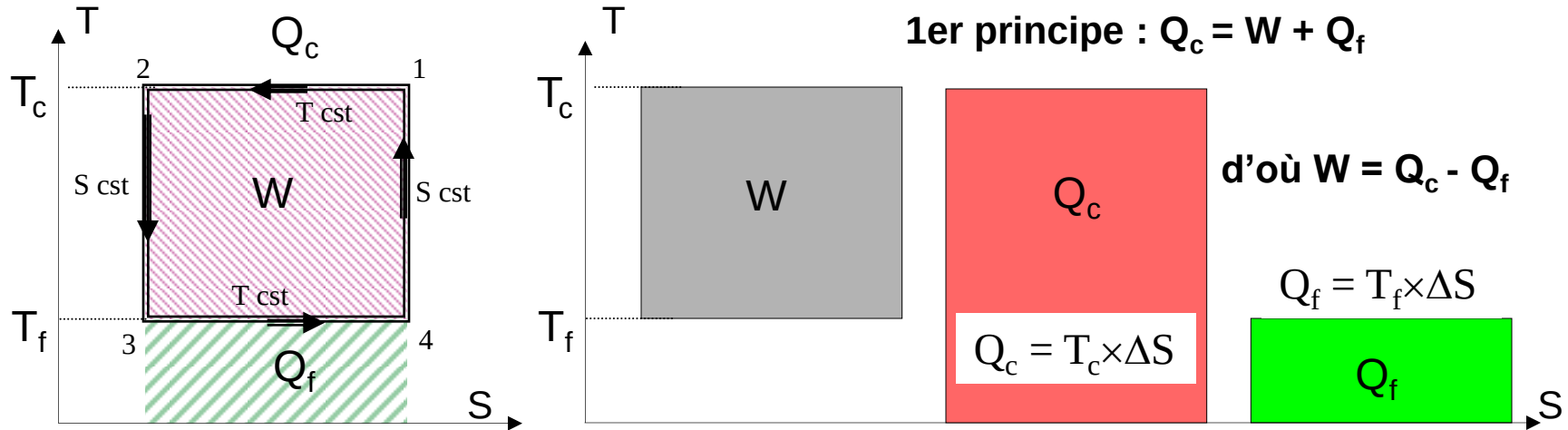


Réfrigérateur

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

Cycle de Carnot réfrigération

Le cycle inverse idéal de Carnot



Cycle à gaz

- 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

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

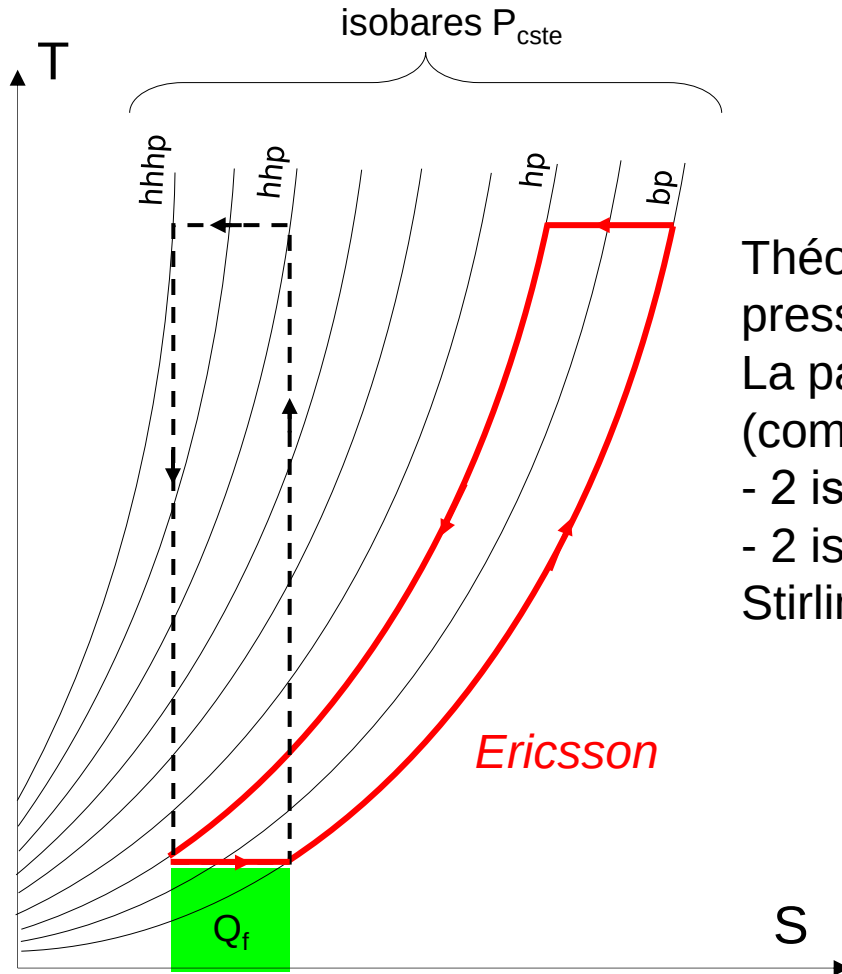
dans le domaine de la cryogénie, le COP est remplacé par la puissance spécifique

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

Cycles Carnot et Cycles réalisables

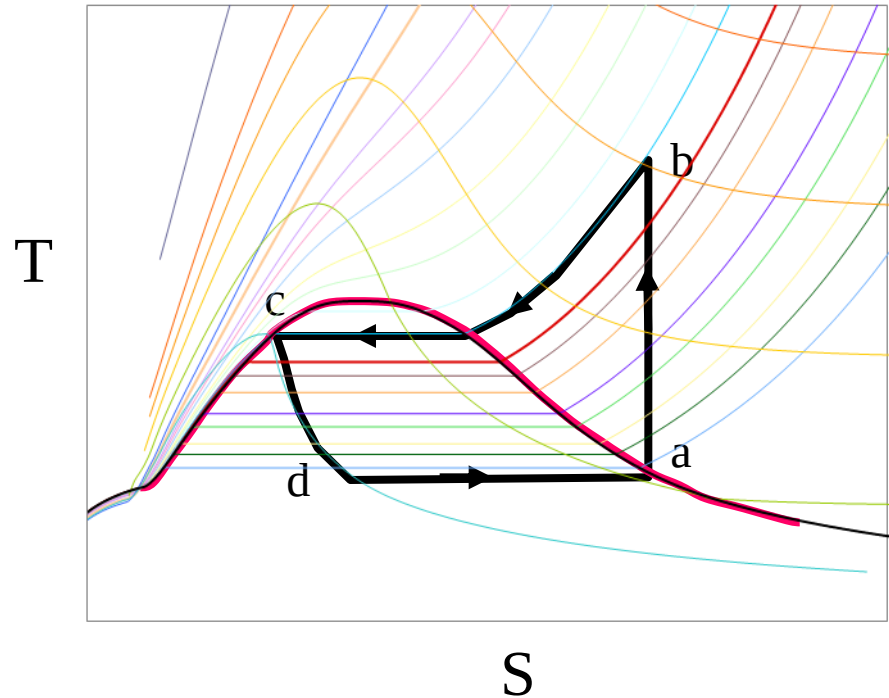
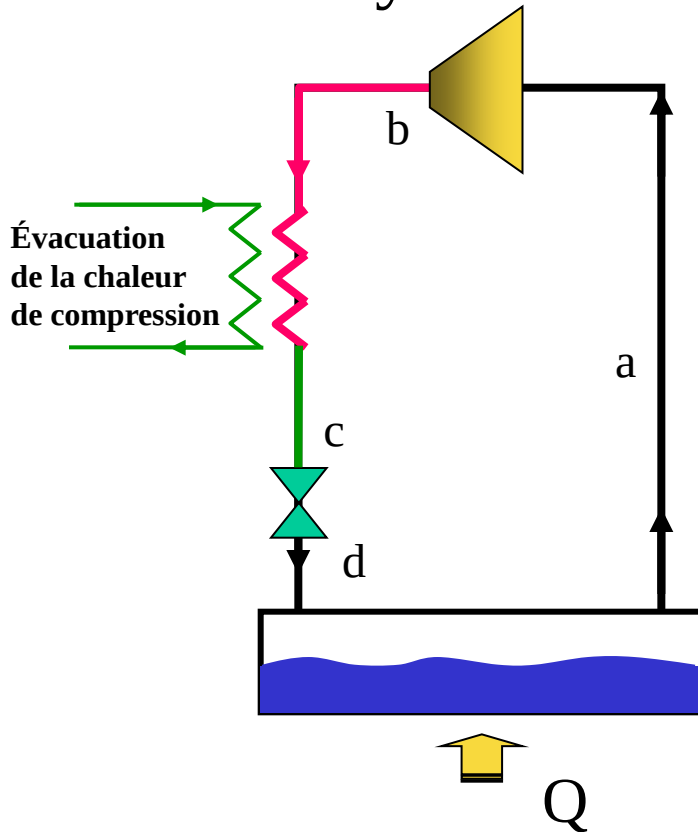


Théoriquement faisable mais très très haute pression nécessaire ! $\Rightarrow$ haute température
La parade : transformer les 2 isentropes (compression et détente adiabatiques) en :

- 2 isobares : cycle d'Ericsson
- 2 isochores avec échange de chaleur : cycle de Stirling

Cycles pratiques

Cycle à compression de vapeur

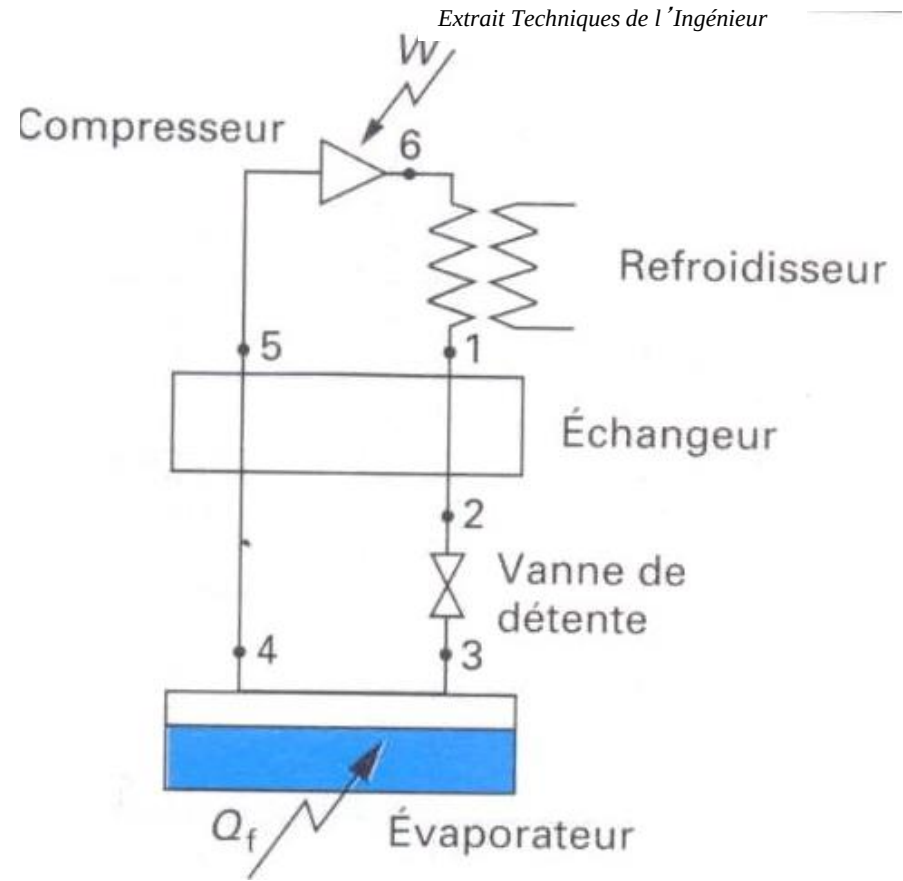
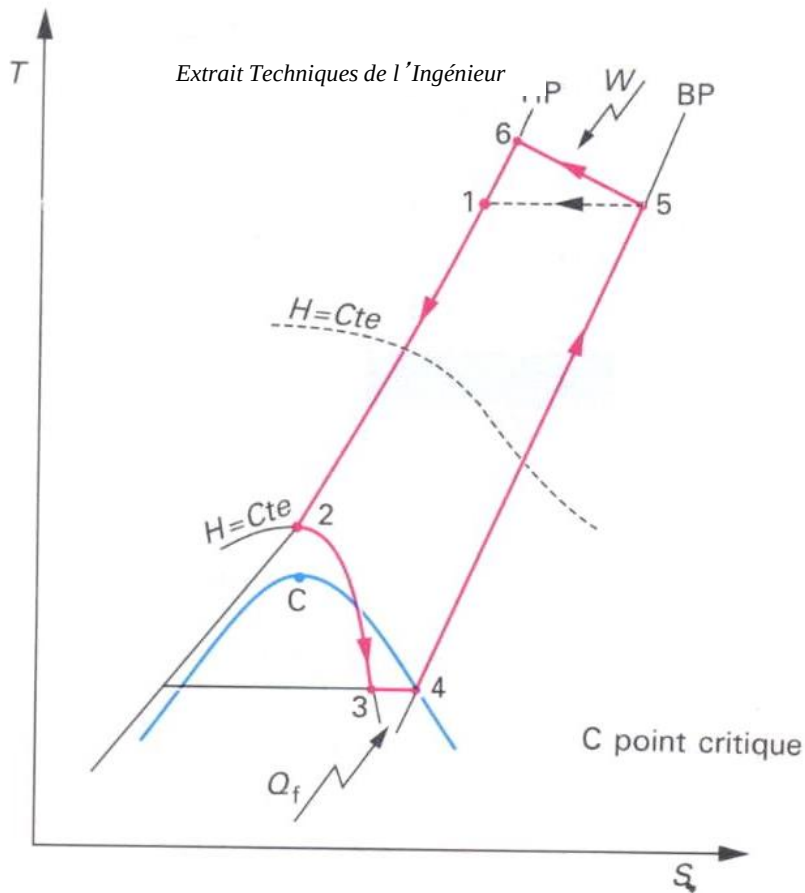


Très utilisé dans les systèmes frigorifiques « industriels et domestiques » mais limité en gamme par :

- le faible écart de température réalisable en vapeur humide compris entre les points triple et critique,
- la nécessité d'un fluide à température de saturation proche de la température 18 ambiante (compresseur).

Cycle de Linde - Hampson

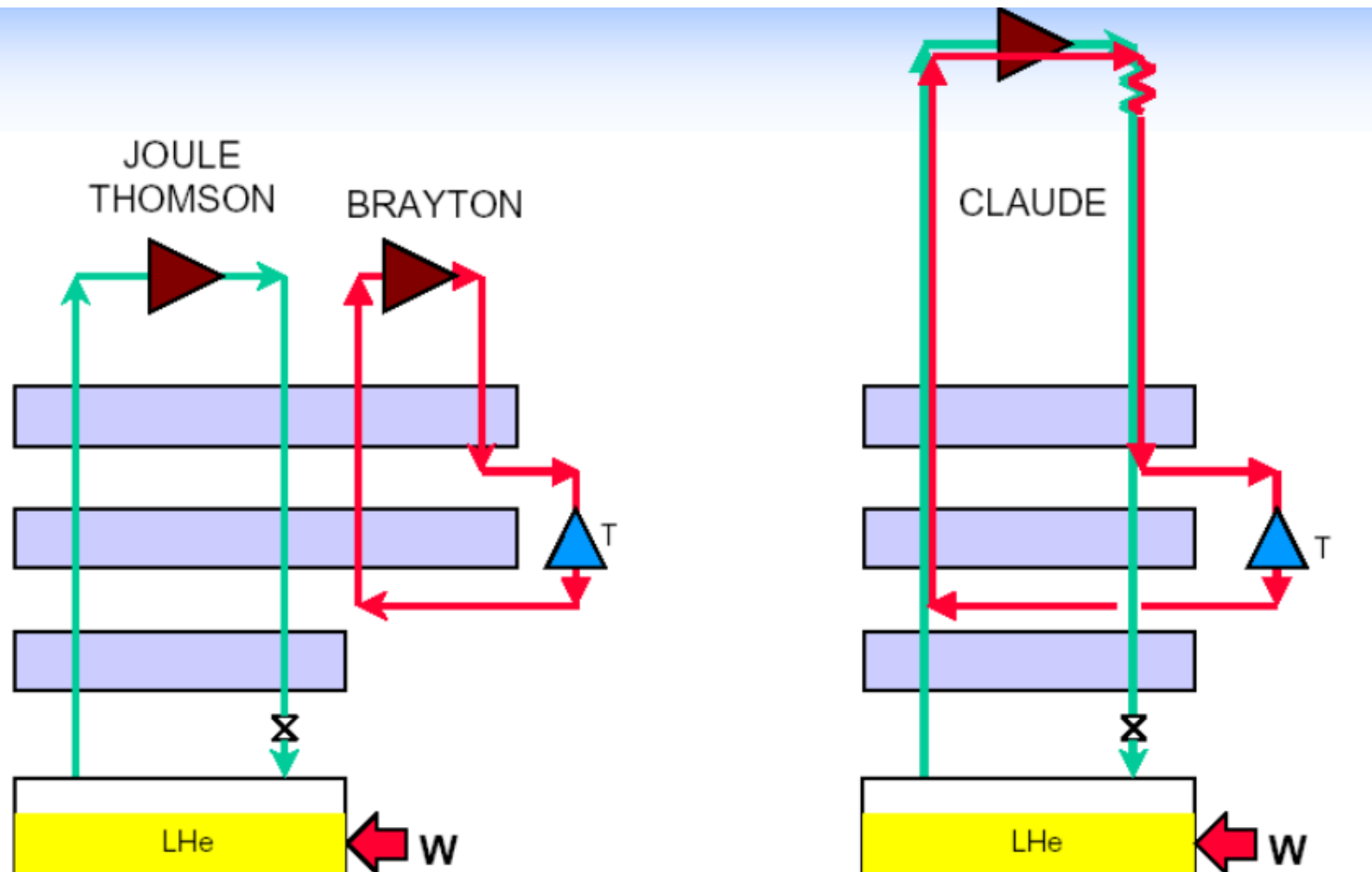
Type de circuit utilisé pour les réfrigérateurs. Il est basé sur le principe de la détente Joule Thomson.



⇒ Températures d'inversion

Cycle Claude

- Couplage d'un cycle de Brayton avec un cycle Joule-Thomson
- Cycle de Claude pour la liquéfaction de l'air ou de l'hélium
- Fonctionnement en liquéfacteur pur (extraction du liquide), en réfrigérateur (cycle fermé) ou mixte



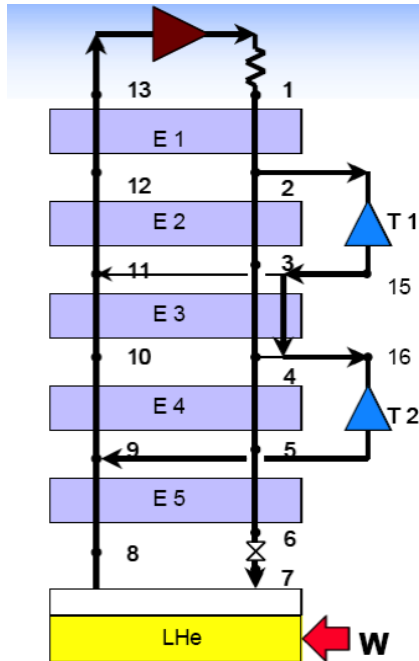
Exemples de machines : petite réfrigération Hélium

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

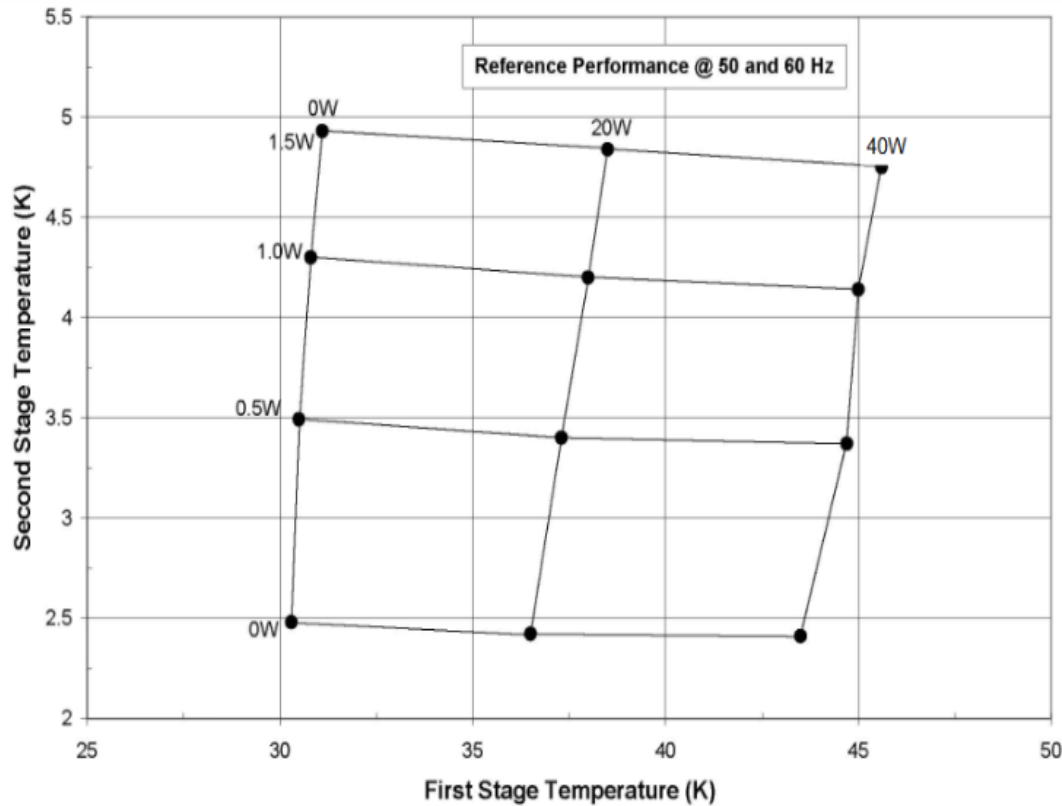
Sources commerciales Linde Kryotechnik

	Without LN ₂ precooling	With LN ₂ precooling
L70	20 – 35 l/h	40 – 70 l/h
L140	45 – 70 l/h	90 – 140 l/h
L280	100 – 145 l/h	200 – 290 l/h
LR70	100 – 145 Watt	130 – 190 Watt
LR140	210 – 290 Watt	255 – 400 Watt
LR280	445 – 640 Watt	560 – 900 Watt

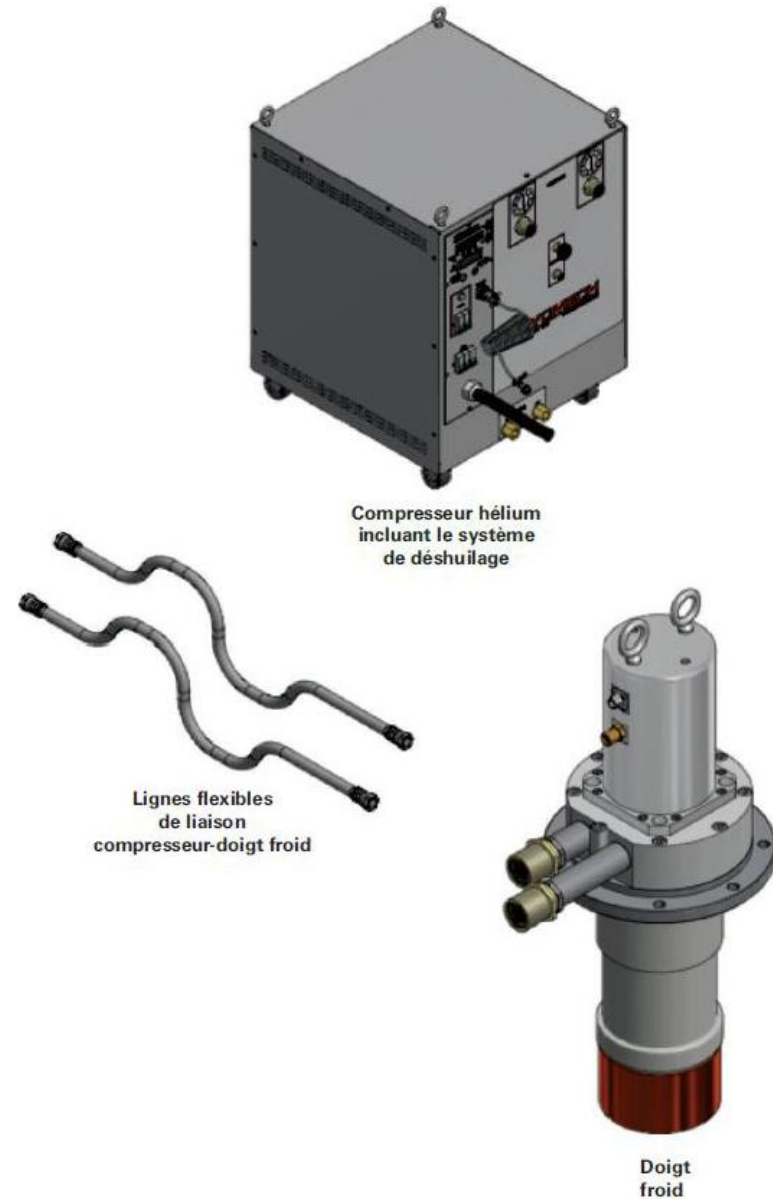


COP
> 500 W/W

Exemples de machines : Cryogénérateur

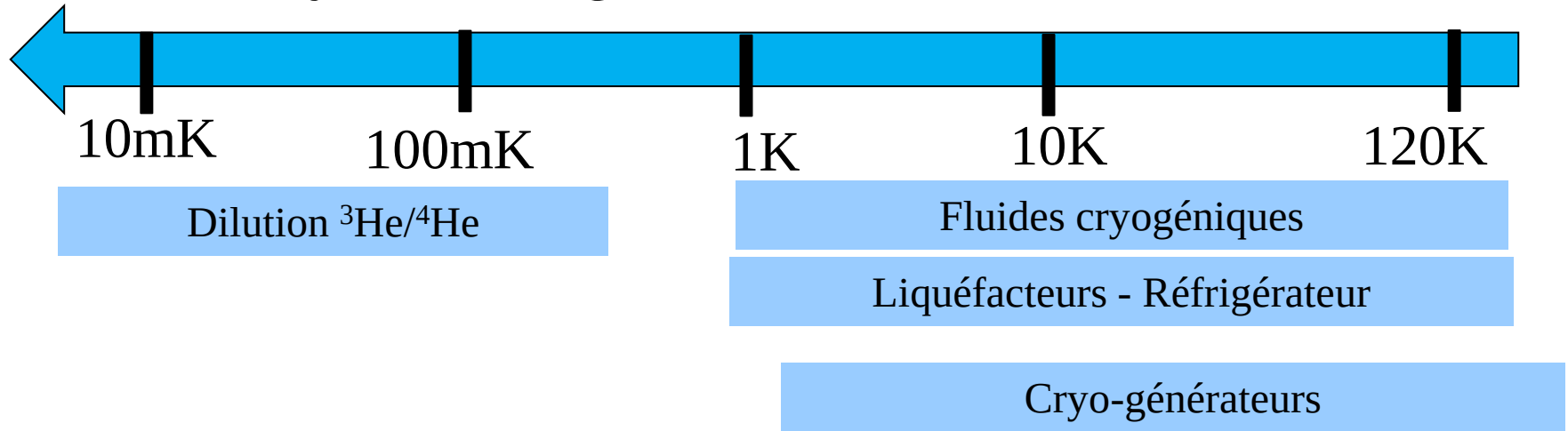


Cryogénérateur à deux étages :
4K et 40K

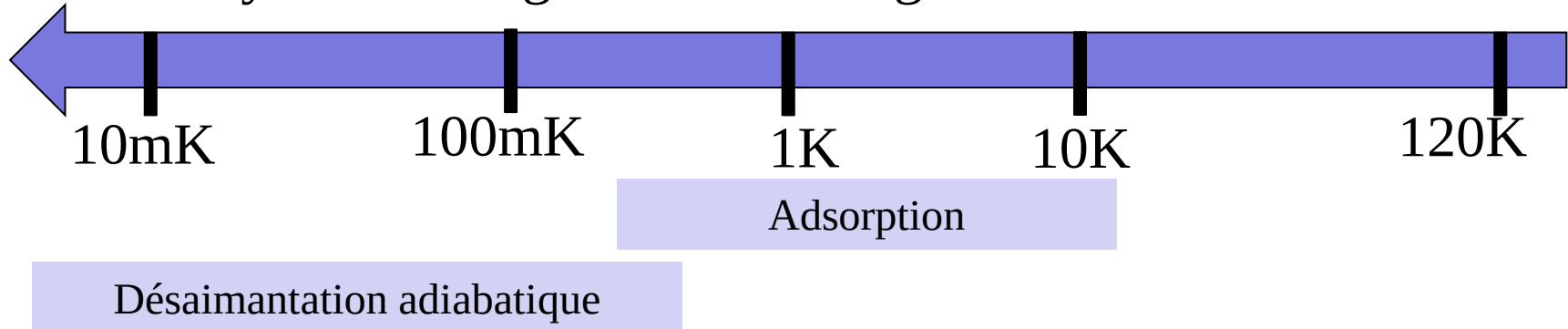


Différents types de réfrigération

Cycle de réfrigération continu

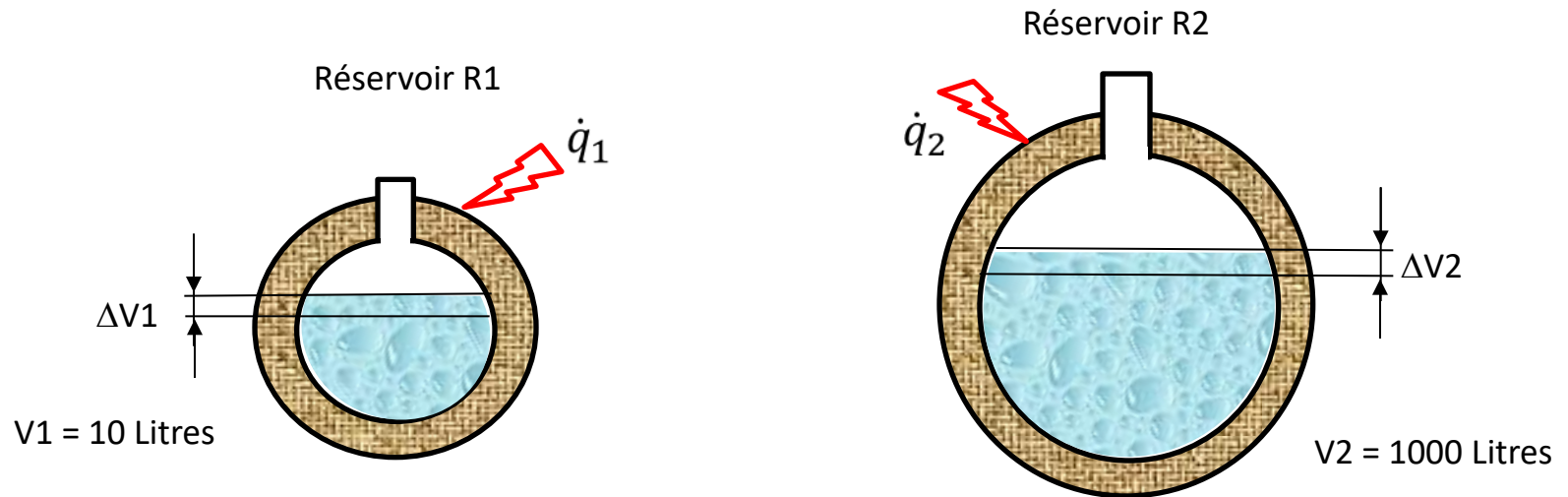


Cycle de réfrigération avec régénération



Efficacité énergétique

La qualité de l'isolation thermique de deux réservoirs est identique $\Rightarrow$ les densités de flux thermiques des pertes sont égales : $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 \left(\frac{W}{m^2} \right)$



Pertes relatives par évaporation par jour : $\Delta V_1/V_1 = 10\%$

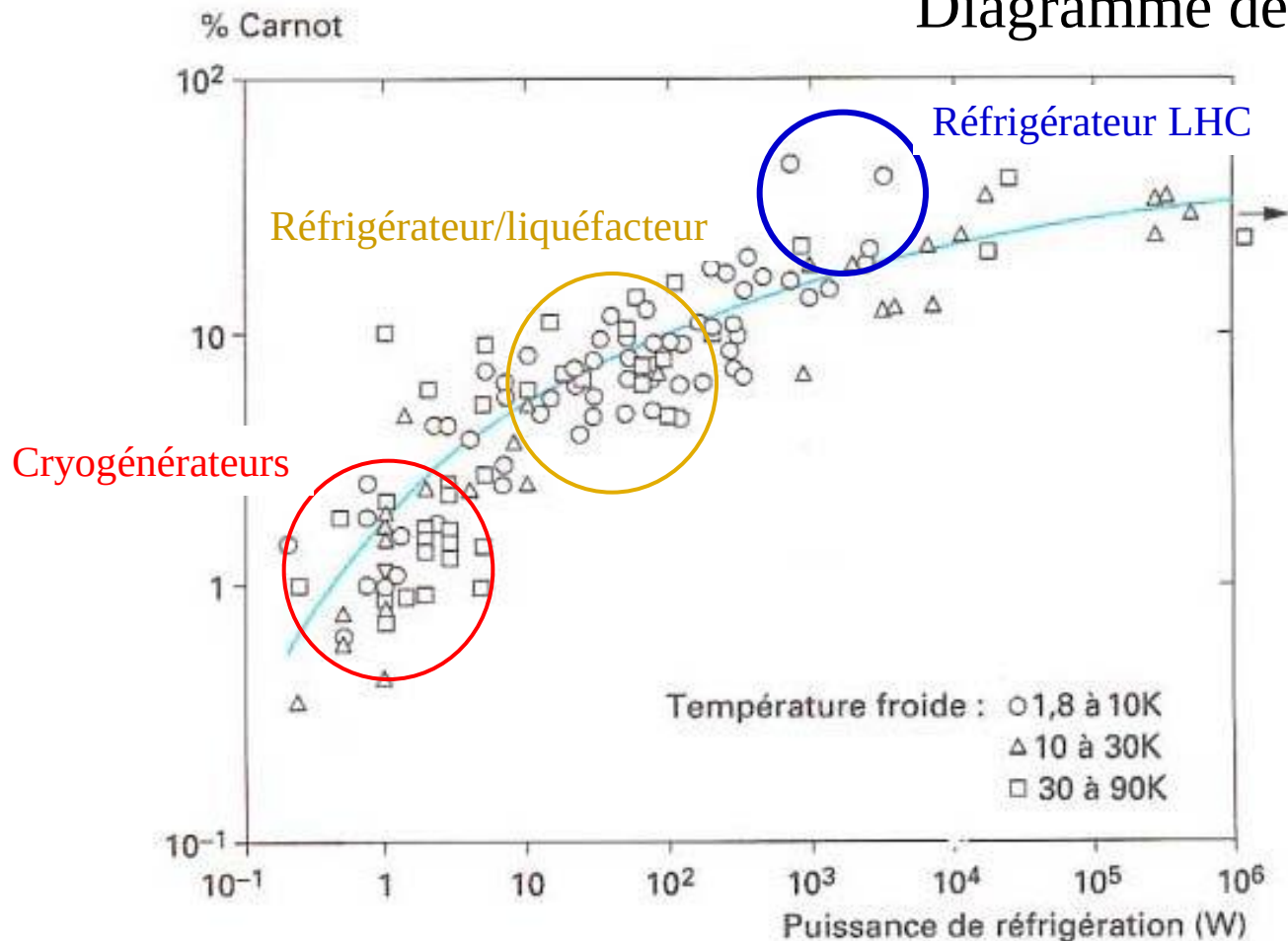
Quelles sont les pertes du réservoir R2 ?

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{\Delta V_1}{V_1} \frac{D_1}{D_2} = \frac{\Delta V_1}{V_1} 3 \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} = 2.1\%$$

Efficacité énergétique

- Efficacité des réfrigérateurs évolue avec leur dimensions, la puissance froide produite
- La température de fonctionnement des réfrigérateurs impacte peu les rendements.

Diagramme de Strohbridge



Refroidir un détecteur

- 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)**

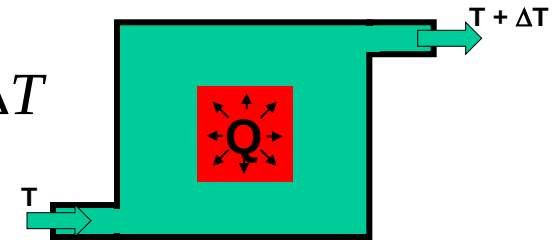
Ex: dans un processus à pression constante,

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

$\dot{m}$ 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



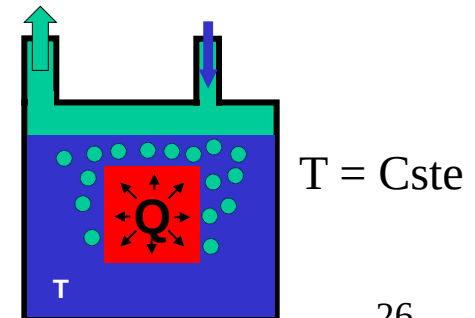
- le « mouiller » (directement ou non) avec un liquide saturé en utilisation la chaleur latente de vaporisation du fluide à sa température d'ébullition
- gestion d'un fluide diphasique mais température constante

- **Liquéfaction d'un gaz**

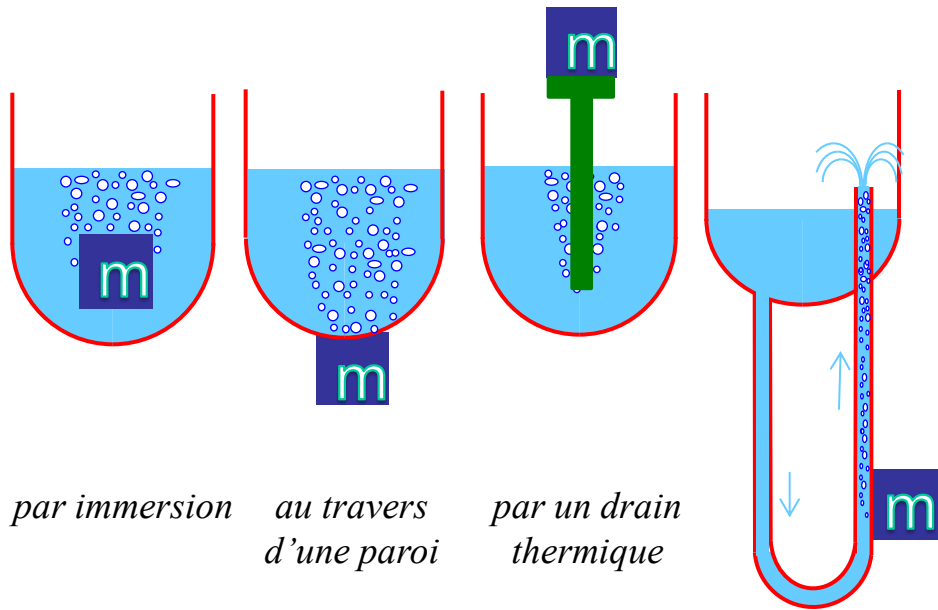
$$Q = \dot{m} \cdot L_v$$

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

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



Refroidissement par un liquide cryogénique

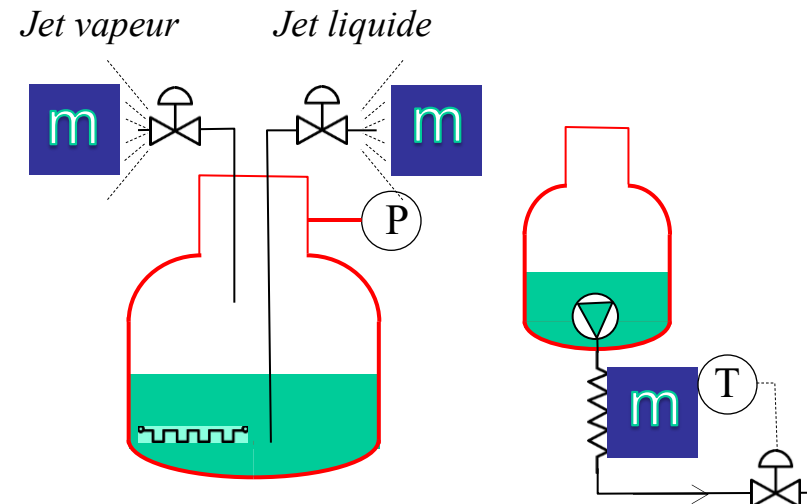


par immersion *au travers d'une paroi* *par un drain thermique*

par contact direct avec un bain par contact indirect (généralement par conduction solide) avec un bain

par une boucle thermosiphon

Par convection naturelle



par aspersion

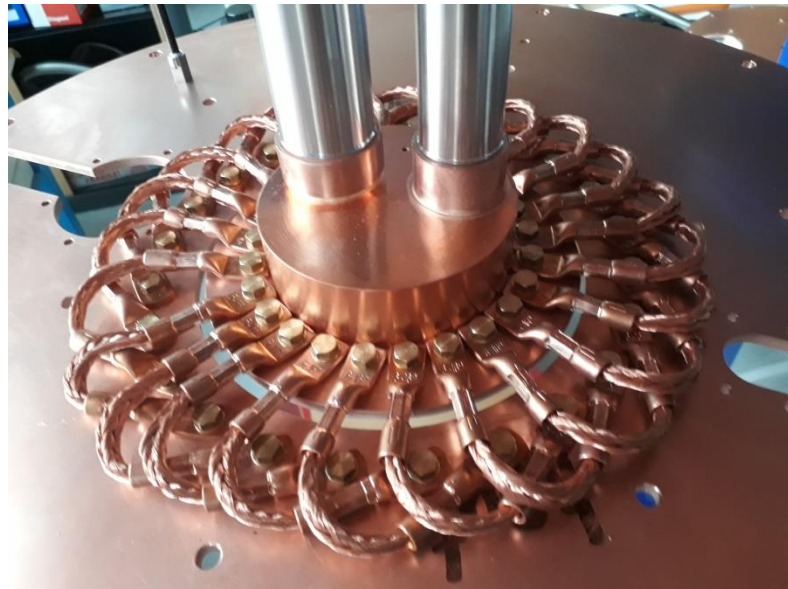
par une circulation régulée du fluide réfrigérant

Par convection forcée

Refroidissement par cryogénérateur

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, ...)

Propriétés des matériaux

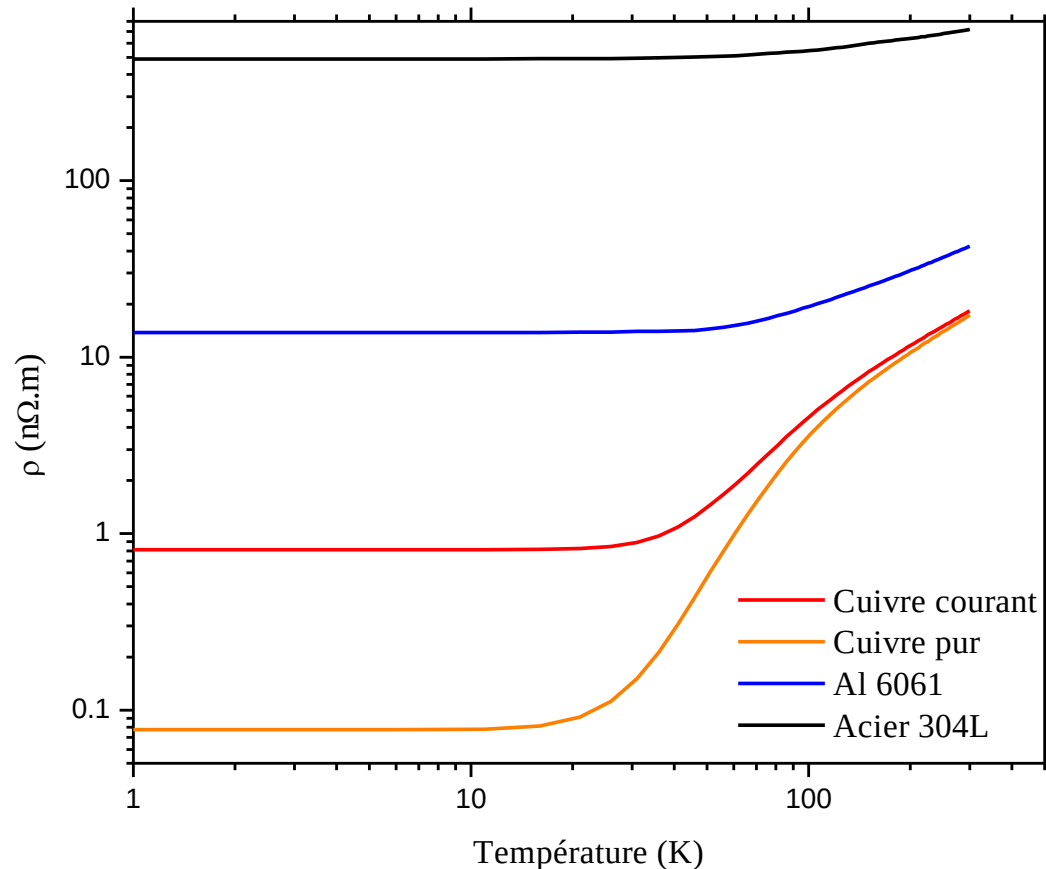
Les propriétés des matériaux évoluent lorsque la température baisse.

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

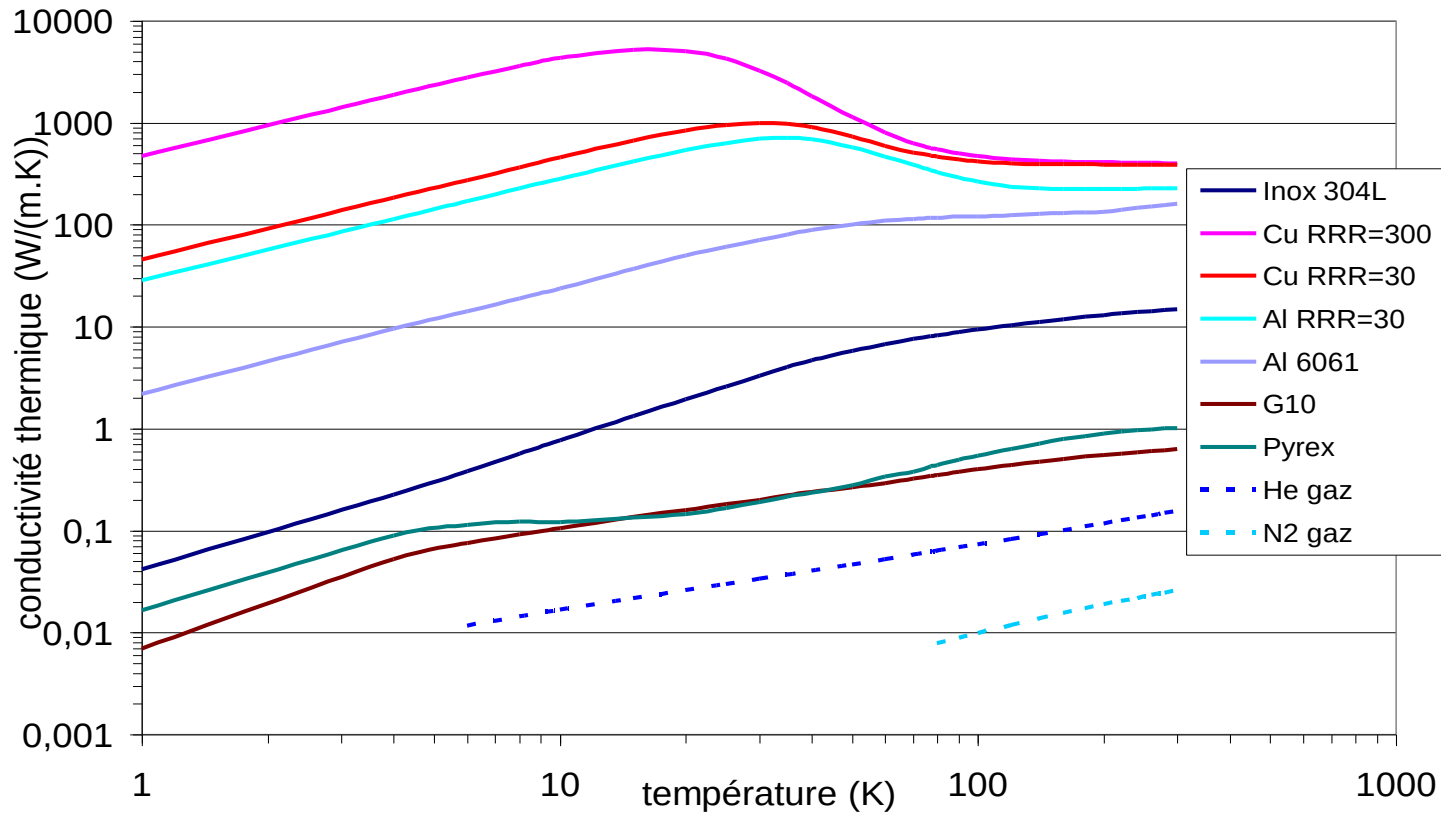
Résistivité électrique

- 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



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

Conductivité thermique



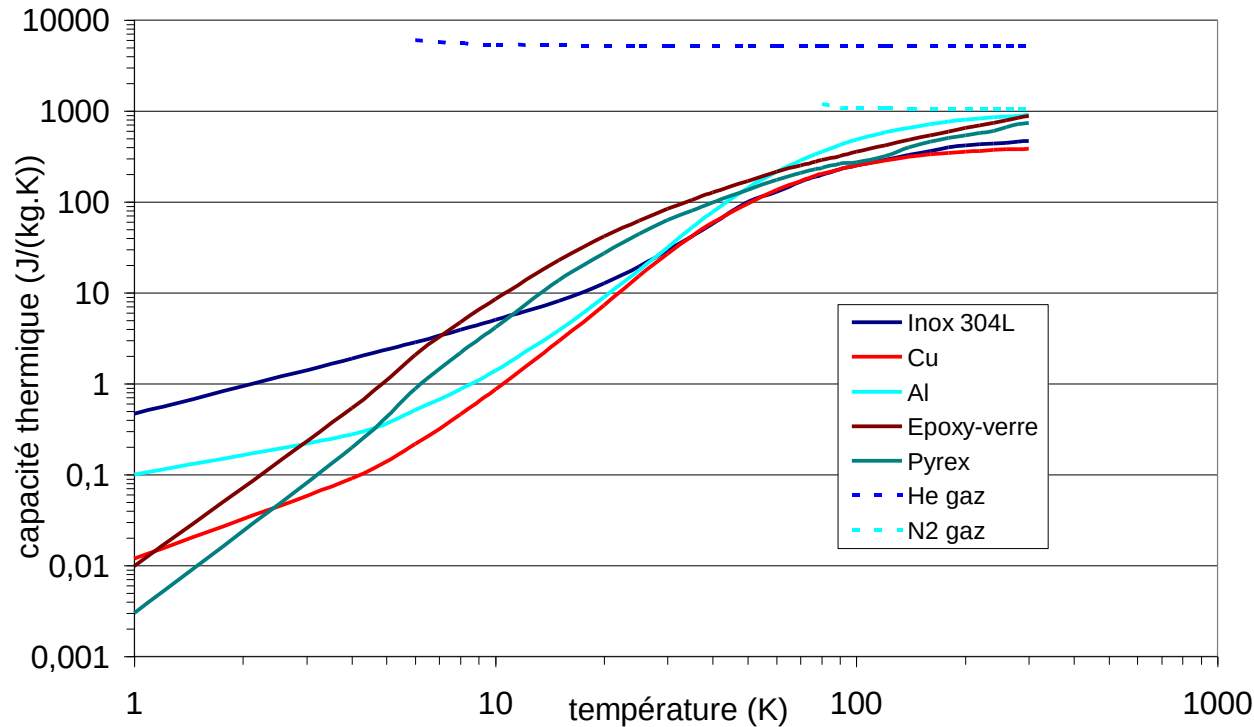
Pour les isolants

- $k \propto T^3$ (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

Capacité massique thermique



C constant à HT, $C_v = 3R$.

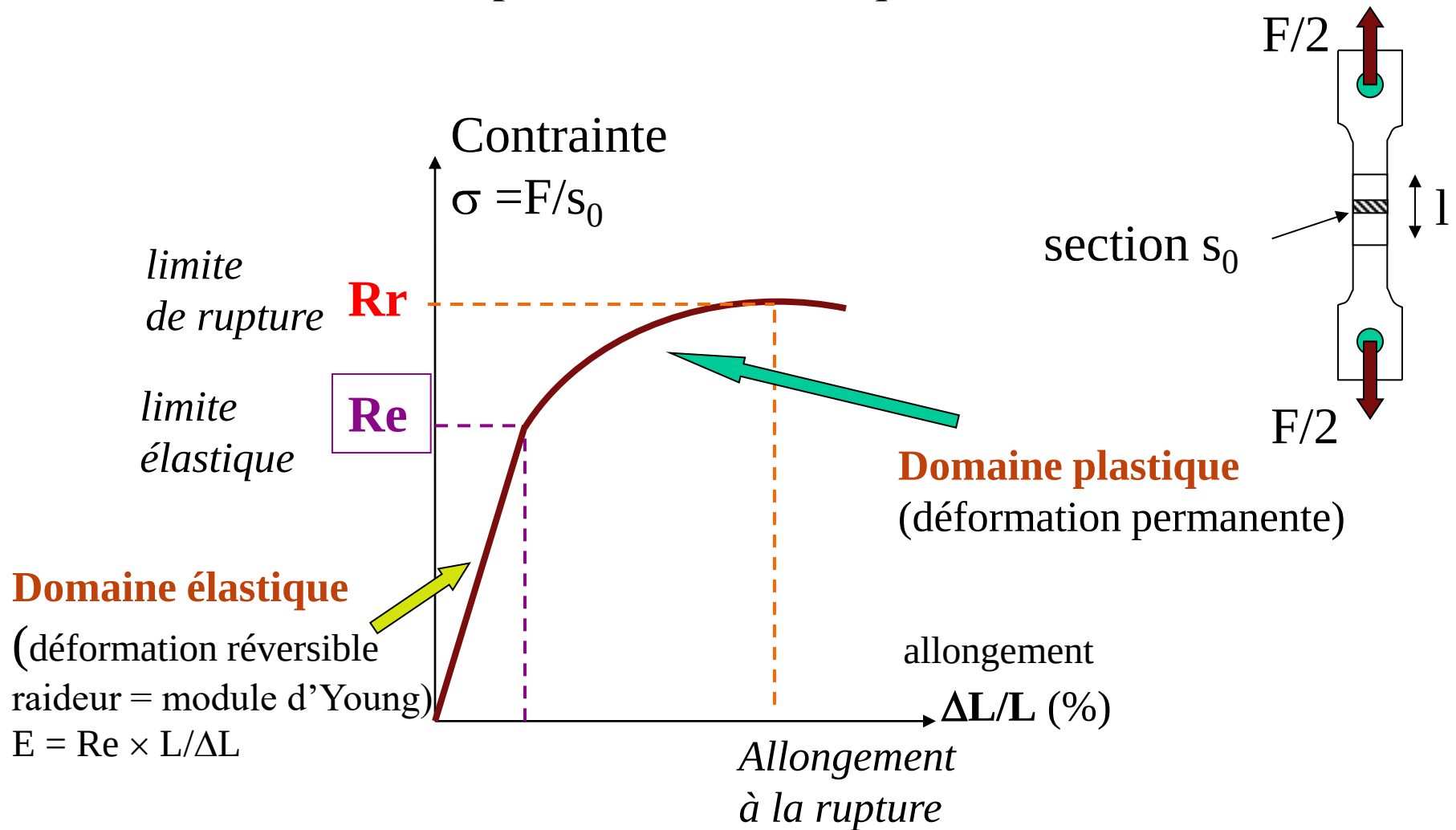
Le comportement de différents matériaux peut se ramener à une fonction unique selon le modèle de DEBYE.

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, $C_v = 3R$.

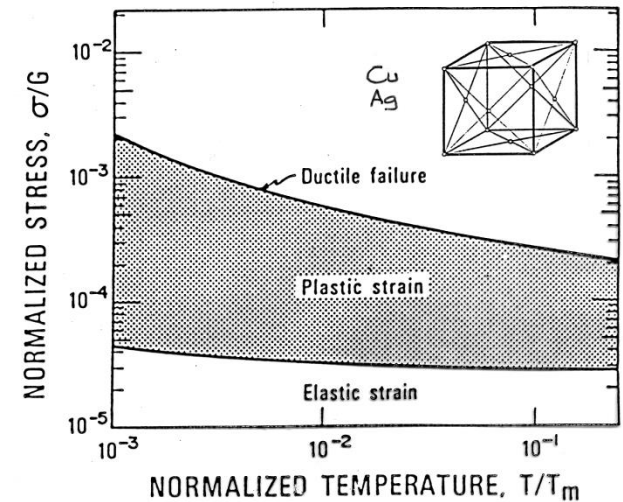
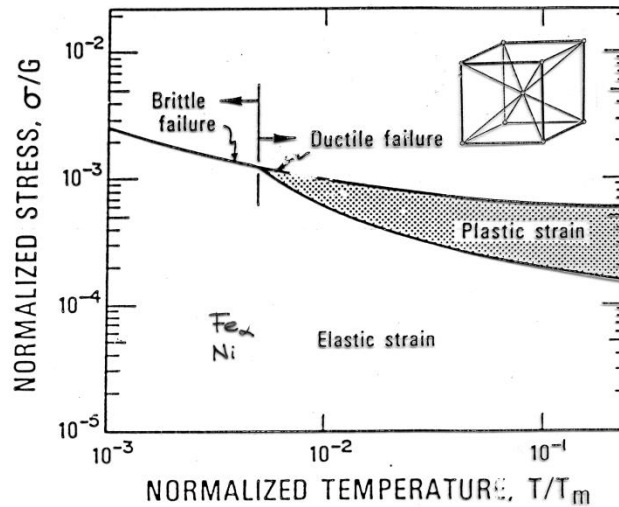
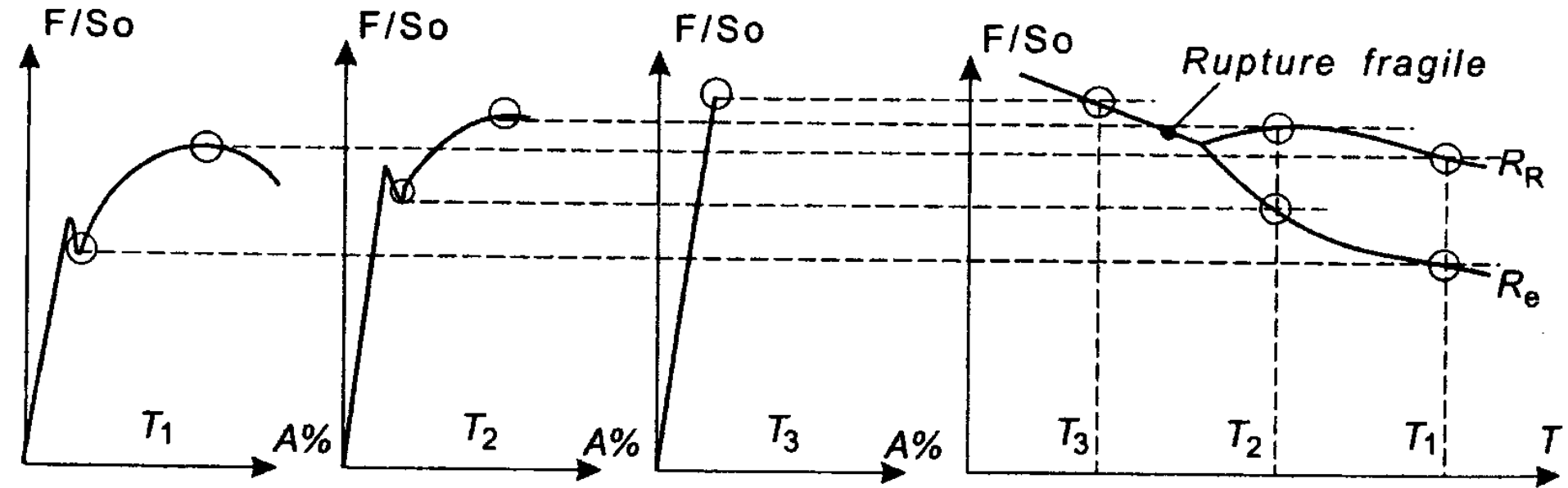
- Pour les métaux $C \propto T$ pour $T < 30$ K
(électrons BT+ phonons HT)
- Pour les isolants $C \propto T^3$ (phonons)

Propriétés Mécaniques : Traction

Exemple de l'essai mécanique de traction

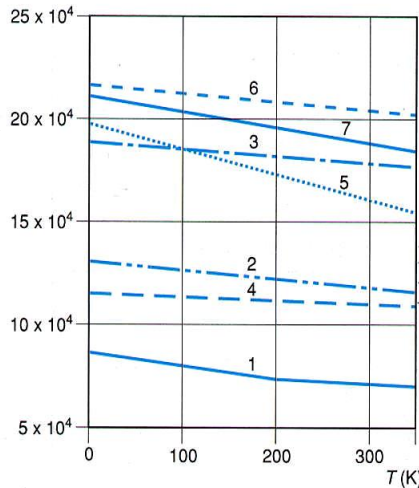


Propriétés mécanique

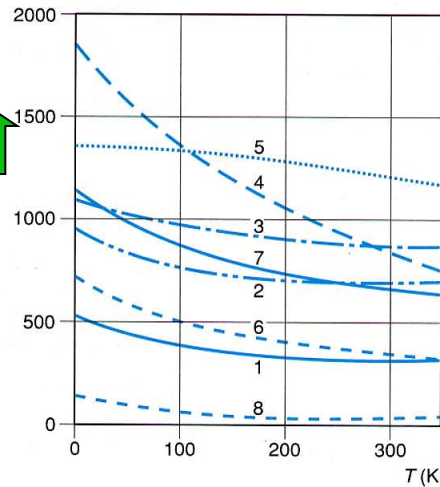


Propriétés mécaniques

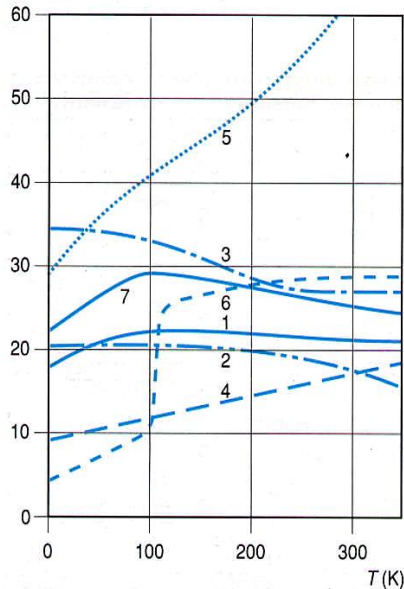
Module d'élasticité (MPa)



Limite d'élasticité (MPa)



Allongement à la rupture (%)



- 1 : 2024 T4 aluminium
- 2 : cuivre-béryllium
- 3 : K monel
- 4 : Titane
- 5 : Acier inox 304
- 6 : Acier carbone C 1020
- 7 : Acier 9% Ni
- 8 : Téflon
- 9 : Fibre de verre -Epoxy
- 10 : Kapton (polyimide)
- 11 : Mylar
- 12 : Nylon (polyamide)

- 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)

Formations en cryogénie

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

Je vous remercie pour votre attention