

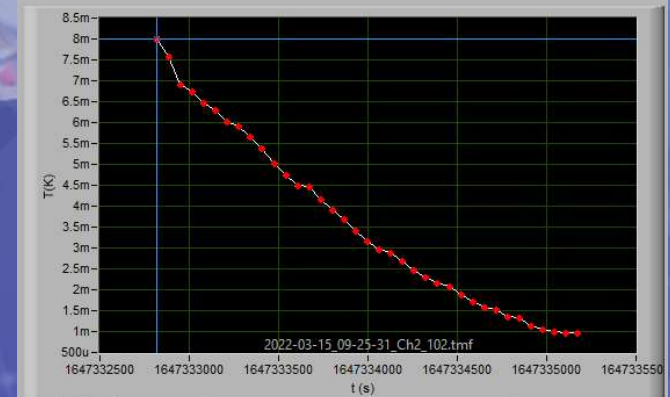


IBM



NEEL
institut

Stop Temp Measurement  T= 0.00096 +/- 0.00000 K



Refroidissement basse température (sous vide)

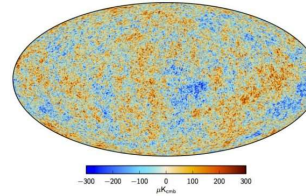
5ème Ecole Technologique du Réseau des Technologies du Vide

Toulouse – Juin 2023



neel.cnrs.fr

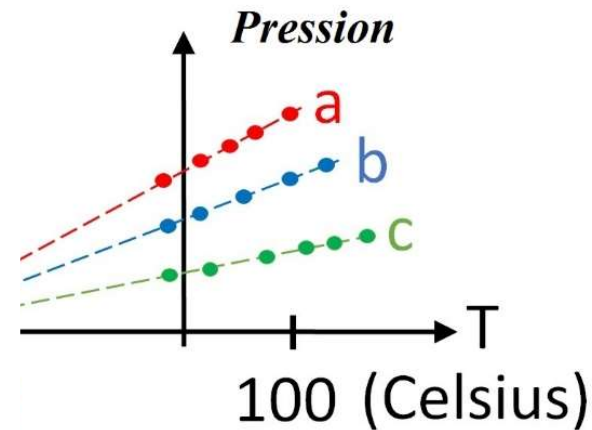
- Pourquoi refroidir ?
- Echelle de température
- Refroidir, ça coûte !
- Les technologies les plus courantes – aperçu
- Les spécificités de l'ultra vide



- Introduction : cas du gaz parfait
 - La vitesse moyenne d'un gaz parfait (distribution de Boltzmann) est proportionnelle à la température :

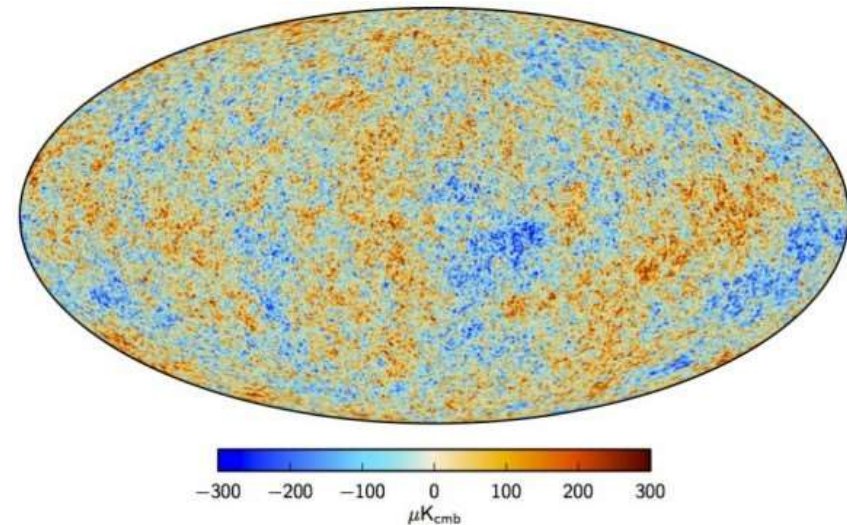
$$v_m = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

- Refroidir un gaz, c'est diminuer l'agitation (thermique) des molécules et donc sa pression ($PV = nRT$)

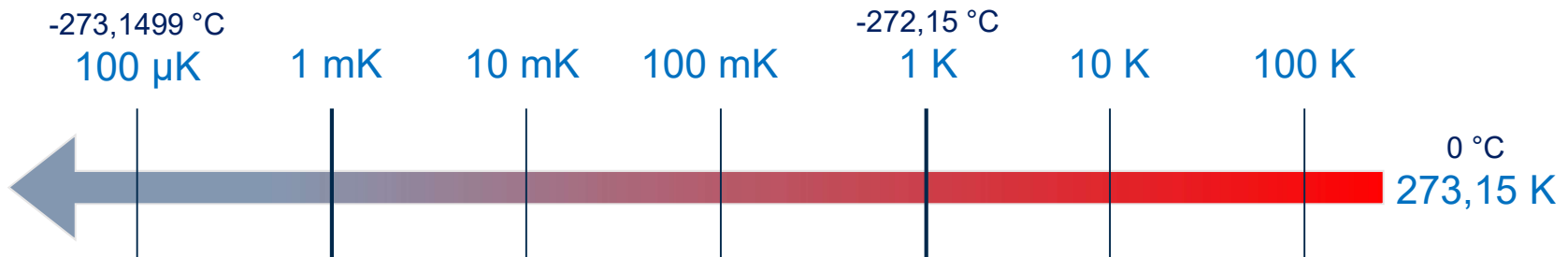


- Dans les solides, c'est similaire :
 - Les vibrations du réseau cristallin sont d'autant plus importantes que la température est élevée
 - Réciproquement, à très basse température, les atomes sont « figés » (pas les électrons)

- Conséquences pratiques :
 - Diminution du bruit thermique
 - Contributions relatives mieux décorréelées (noyaux, électrons...)
 - Apparition de nouveaux phénomènes (échelles d'énergie à comparer à $k_b.T$) : supraconductivité, superfluidité, etc



- Température = mesure de l'agitation thermique d'un système
- L'échelle de température : linéaire vs logarithmique



- Nota : passer de 4 K à 1 K (resp. 40 mK), ce n'est pas diminuer la température de 3 K, c'est la diminuer d'un facteur 4 (resp. 100)

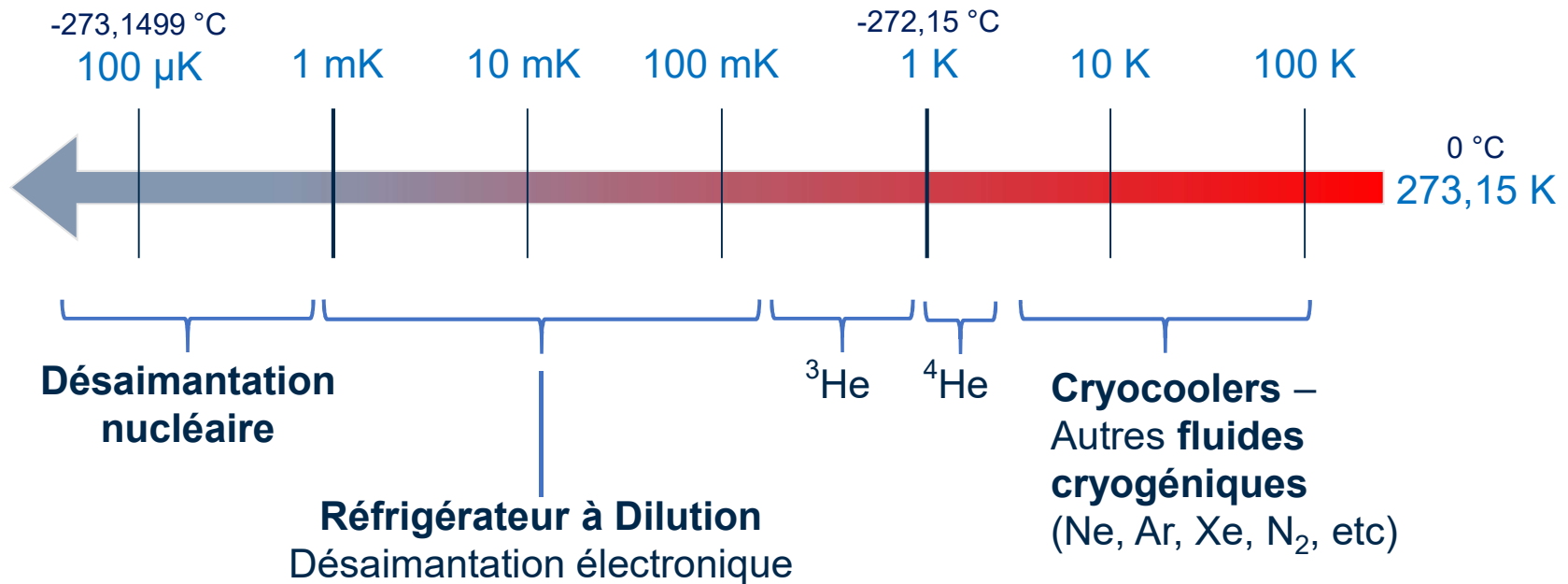
- Efficacité de Carnot :

$$e_c = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{T_c - T_f}$$

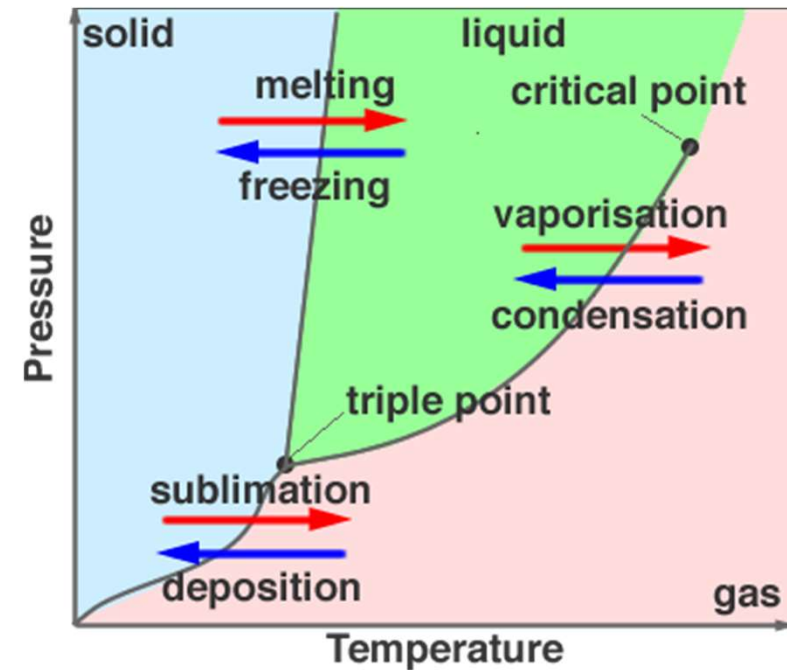
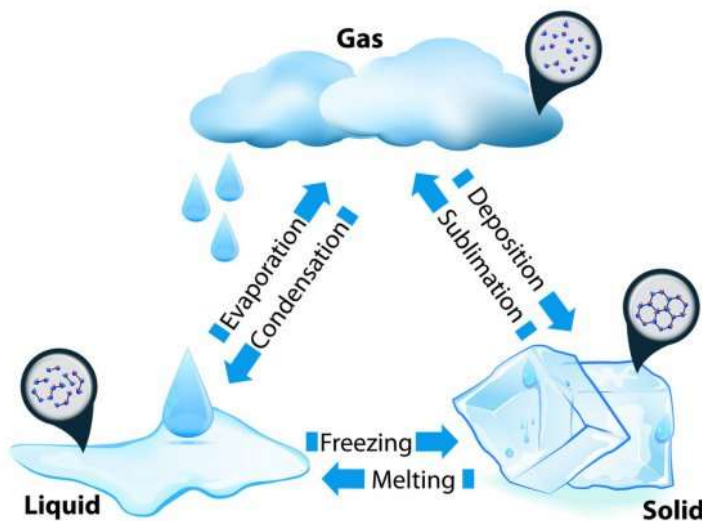
Cycle parfait (pas de pertes)

⇔ ça « coûte » de refroidir à très basse température...

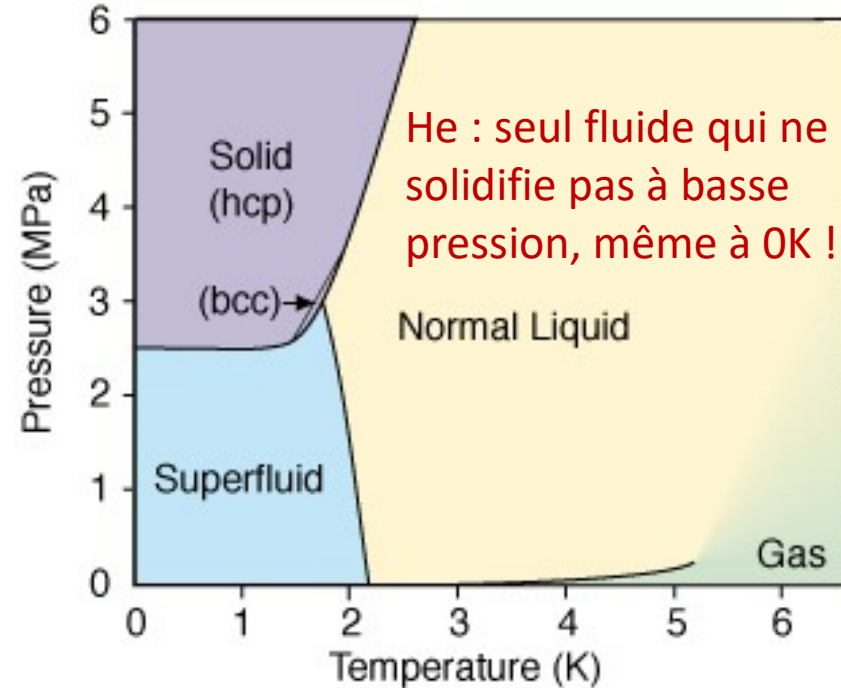
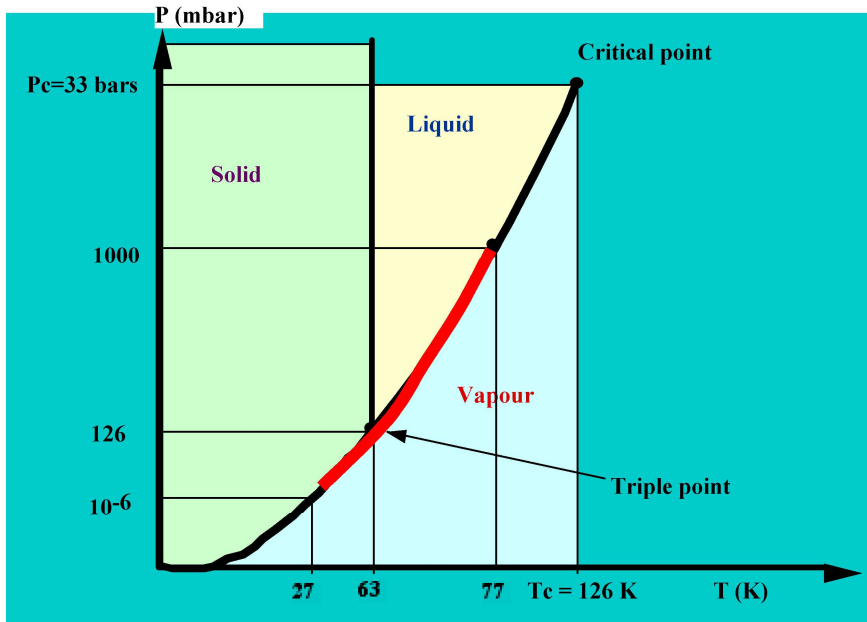
- Techniques permettant de refroidir un élément externe (\neq atomes froids)



- Rappel : les changements d'état => diagramme de phase pression – température

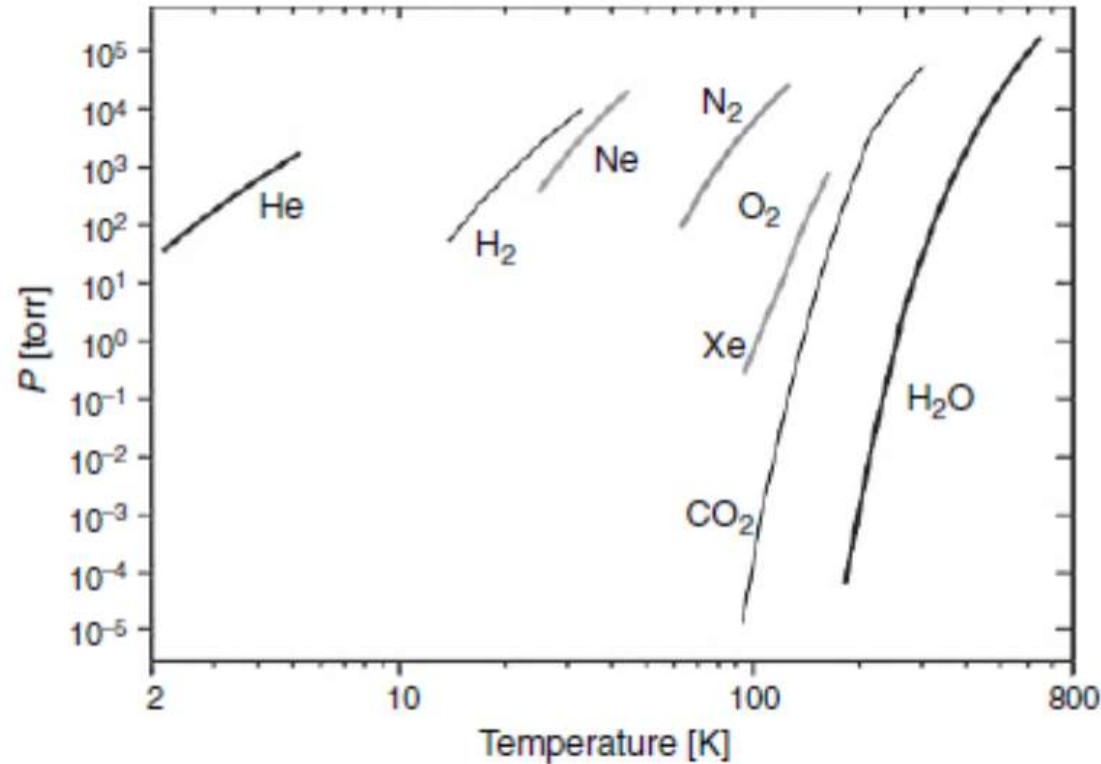


- Refroidissement par pompage, exemple du LN2



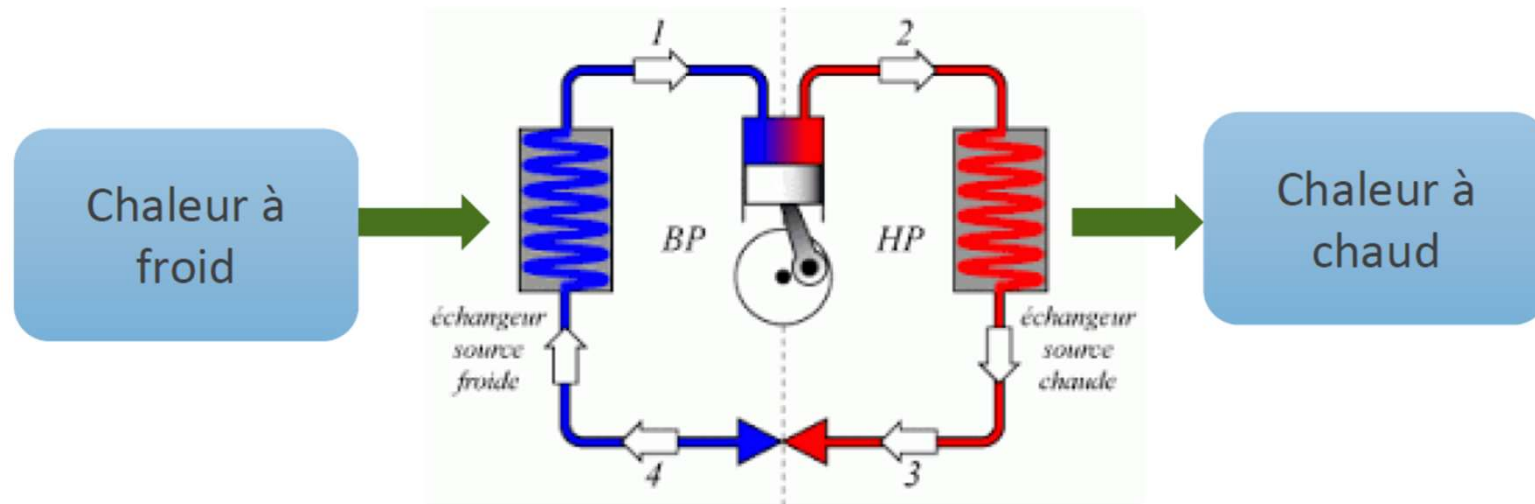
- Quand on abaisse la pression sur un bain de liquide cryogénique par pompage, on abaisse sa température
- A une température donnée, un liquide (resp. solide) est en équilibre avec sa pression de vapeur

- Températures accessibles (équilibre liquide - vapeur)



- Comme P décroît exponentiellement avec T , gamme de température restreinte pour un fluide donné

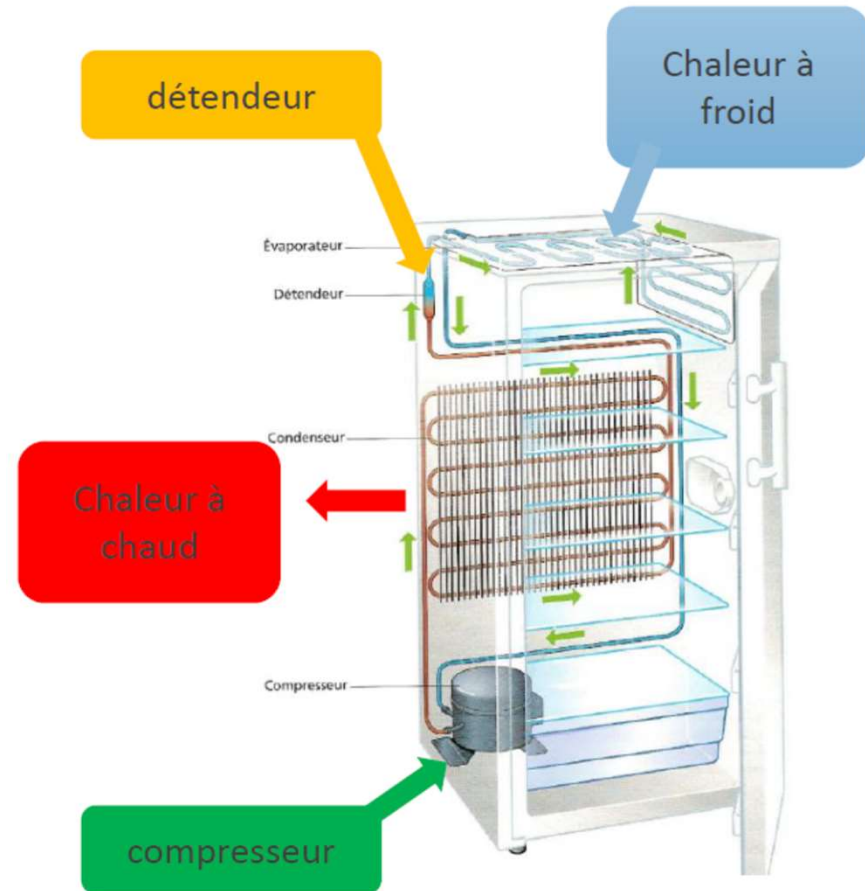
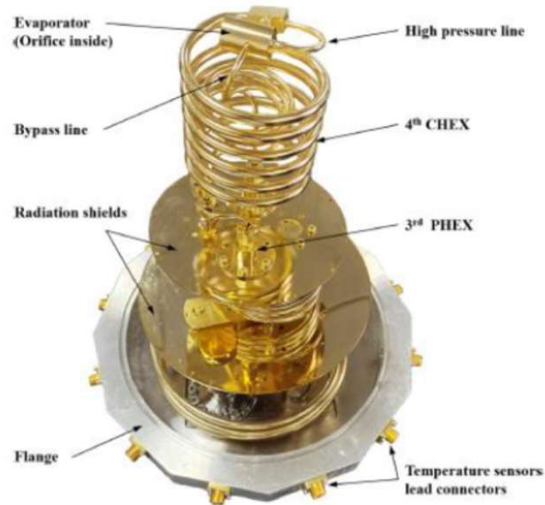
- Principe : réalisation d'un cycle thermodynamique
 - Travail de compression (1 → 2)
 - Source chaude (réjection de chaleur : 2 → 3)
 - Système de détente 3 → 4
 - Source froide (absorption de chaleur : 4 → 1)



Pompé chez : T. Prouvé (CEA)

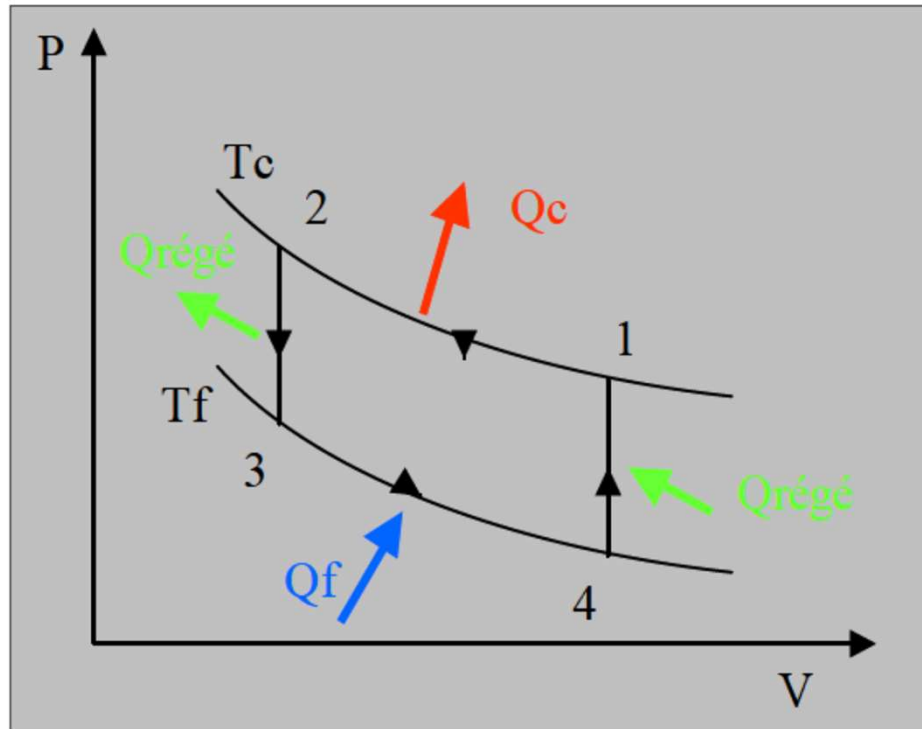
- Détente Joule-Thomson

Avec de l'hélium, possibilité d'atteindre 1 K en continu (~0,3 K avec du ^3He)

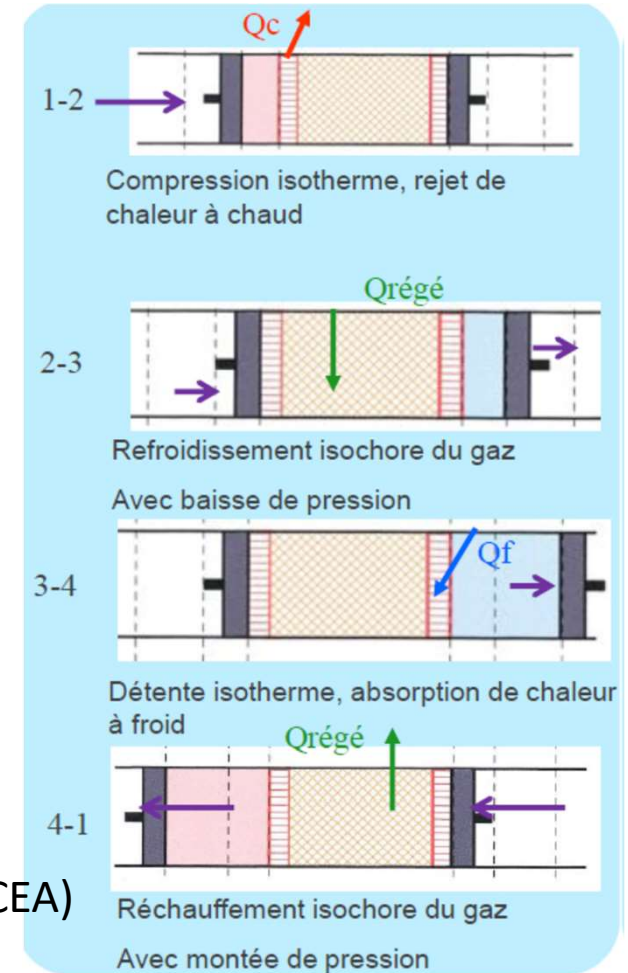


Recopié chez : T. Prouvé (CEA)

- Cycle de Stirling

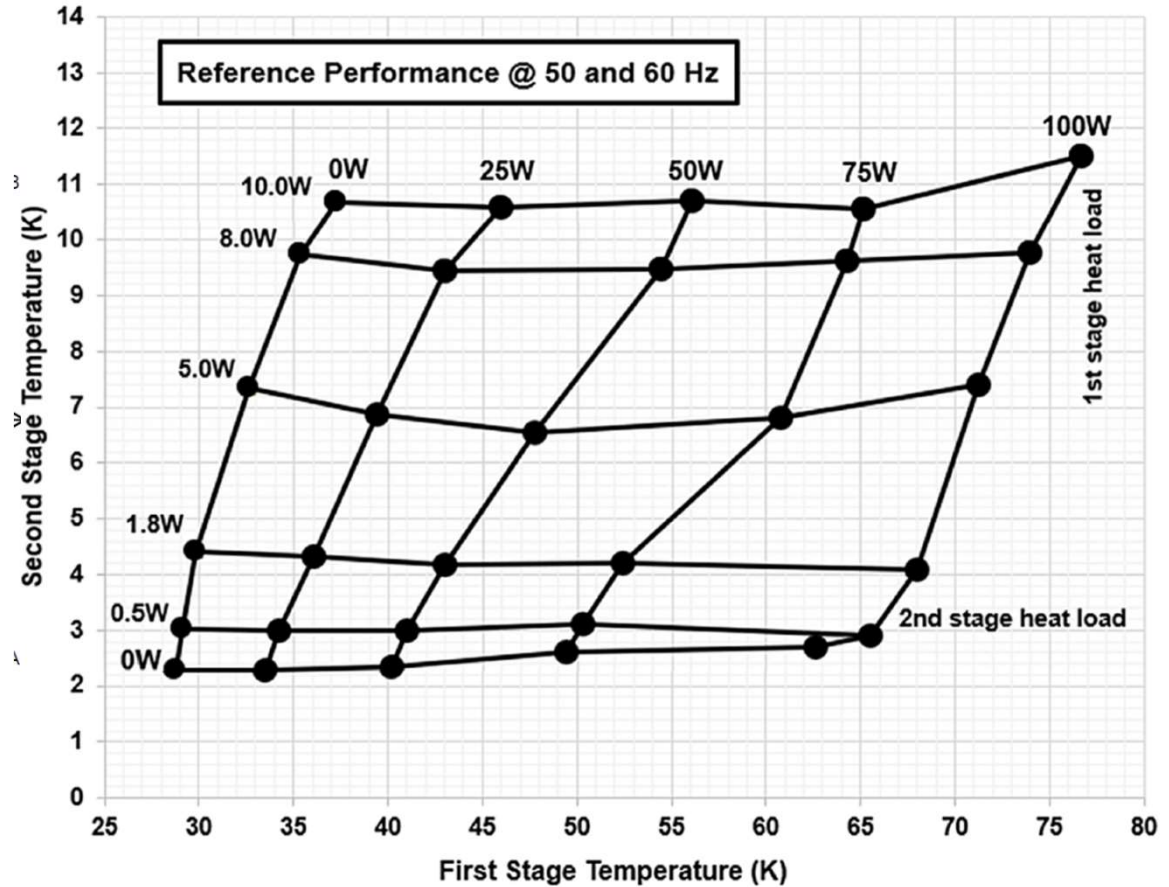


Recopié chez : T. Prouvé (CEA)



- Cycle d'Ericson (GMM et Pulse Tubes basse fréquence) : isobares remplacent les isochores

- Performances : Cryomech PT-420 = Pulse Tube

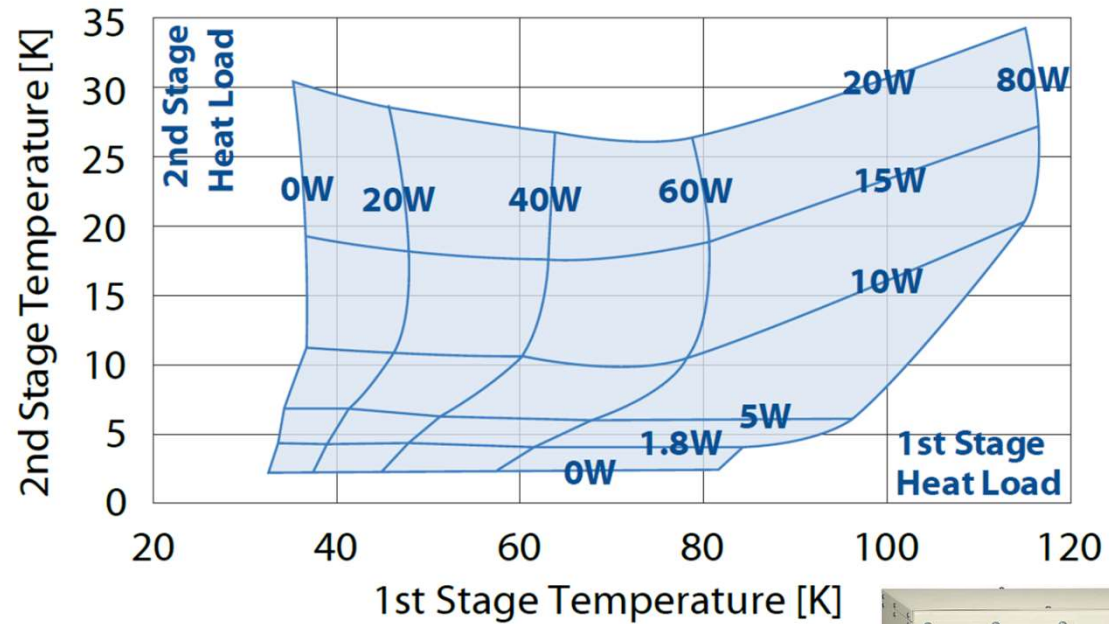


- Performances : Sumitomo (SHI) RDE-418D4 = GMM



SRDE-418D4 Cold Head Capacity Map (50 Hz)

With F-50 Compressor and 20 m (66 ft.) Helium Gas Lines



Nota : F-50 compressor ~7 kW



- Refroidisseurs à dilution ($^3\text{He} - ^4\text{He}$)

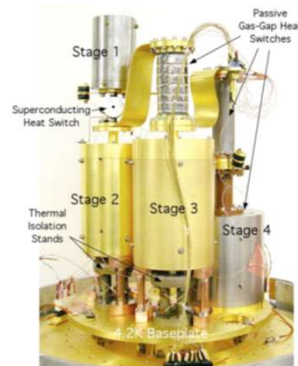
⇒ 10 mK commercial

⇒ 2 mK mini



- Désaimantations adiabatiques électroniques

⇒ ~50 mK



- Désaimantations adiabatiques nucléaires

⇒ < 1 mK voire < 100 μK



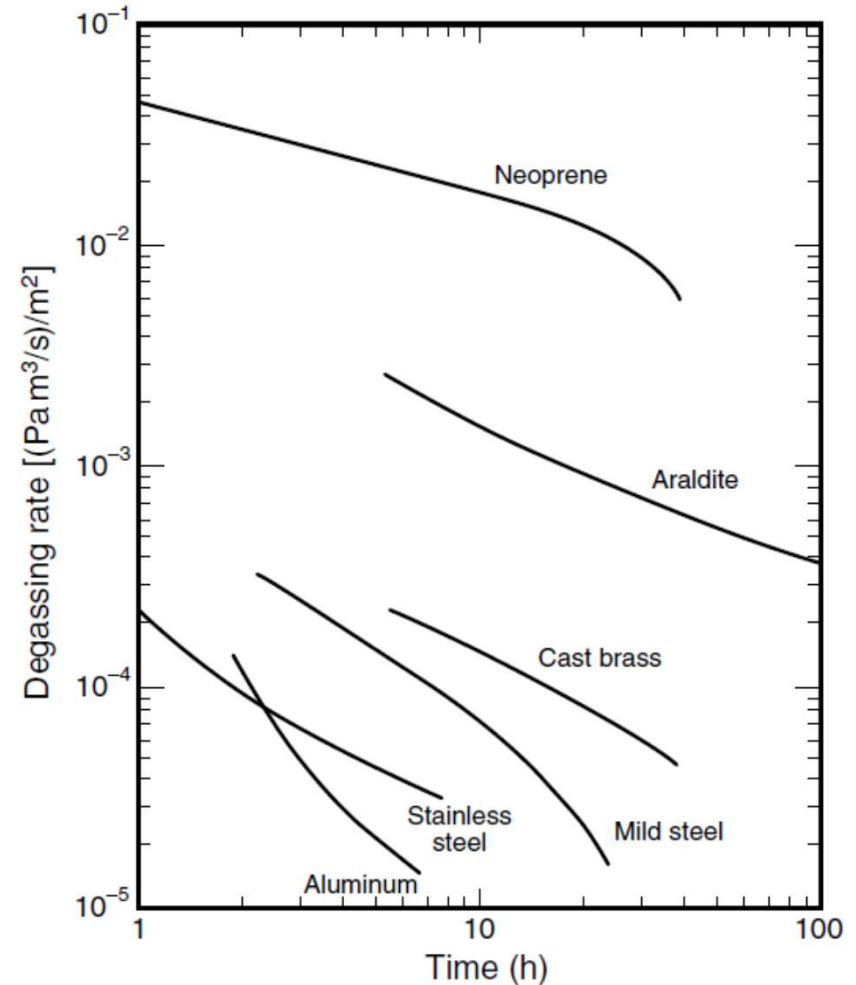
- Dégazage des matériaux

Ici, à T_{amb}

Et sans traitement spécifique pour les métaux

=> Plusieurs ordres de grandeur dans les taux de dégazage

=> Plastiques >> métaux



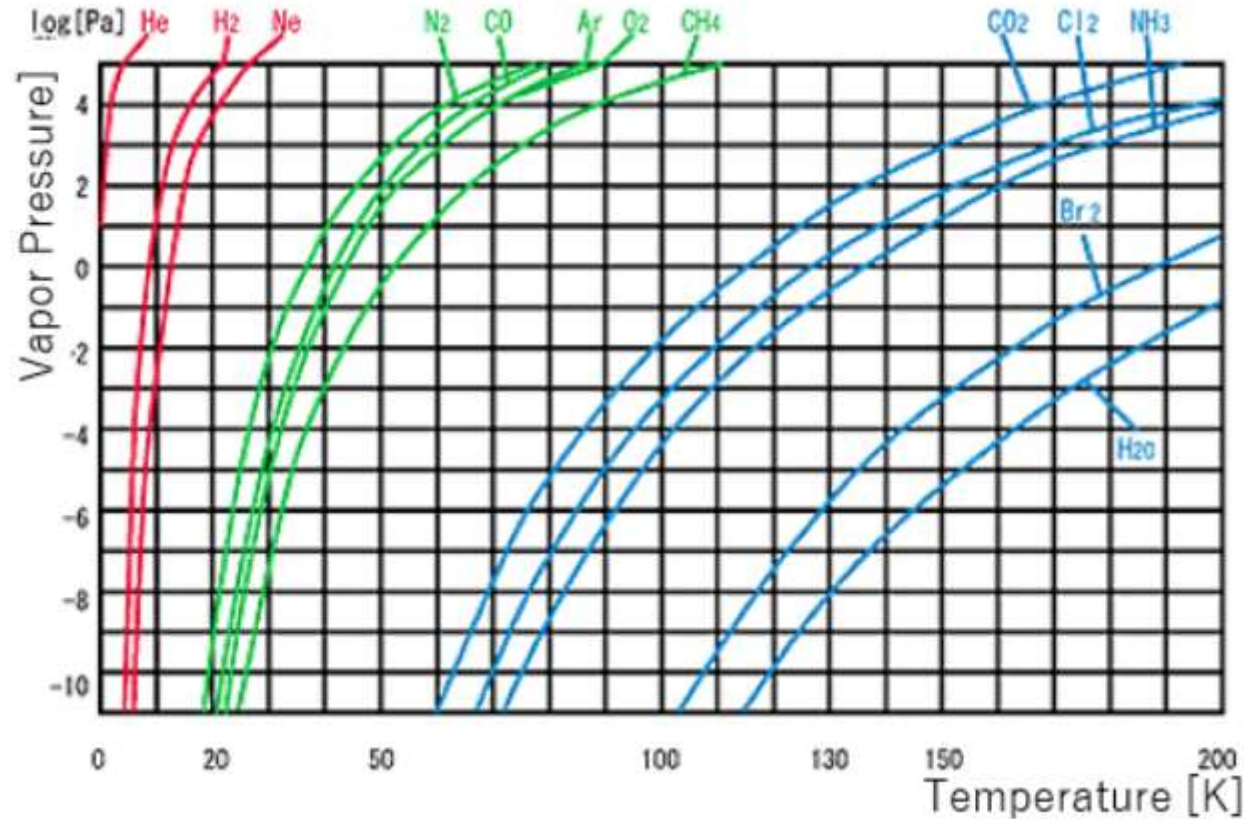
- Dégazage des matériaux

Metal	Melting temperature [K]	Temperature [K] giving a vapor pressure P		
		$P = 1.33 \times 10^{-9}$ Pa	$P = 1.33 \times 10^{-7}$ Pa	$P = 1.33 \times 10^{-5}$ Pa
Ag Silver	1234	721	800	899
Al Aluminum	932	815	906	1015
Au Gold	1336	915	1020	1150
Ba Barium	983	450	510	583
Be Beryllium	1556	832	925	1035
C Carbon	—	1695	1845	2030
Ca Calcium	1123	470	524	590
Cd Cadmium	594	293	328	368
Ce Cerium	1077	1050	1175	1325

La pression d'équilibre décroît exponentiellement avec la température => OK à température cryogénique.

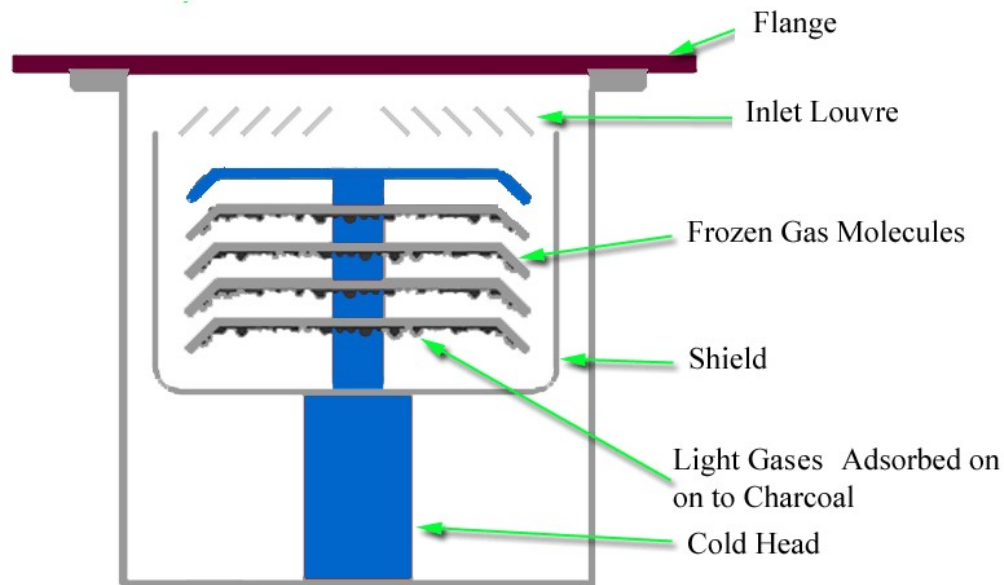
Néanmoins, problème si dégazage à haute température (brasures PbSn, Cadmium)

- Quid des fluides cryogéniques



A 4 K, tous les fluides (sauf He) ont une pression de vapeur saturante très faible

- Cryo pompe : les gaz sont adsorbés sur des parois froides



Charbons \Leftrightarrow grande surface d'adsorption et potentiel d'adsorption élevé \Rightarrow pressions d'équilibre + basses \Rightarrow UHV

- Vide et cryogénie sont étroitement liés :
 - Impossible de refroidir significativement sans un « bon » vide
 - On peut se servir de la cryogénie pour améliorer le vide d'une enceinte par cryopompage
- Pour l'UHV, la cryogénie aide, mais le choix des matériaux (et de leur état de surface / propreté) reste critique