

Techniques Cryogéniques Modernes

Philippe Camus
Institut Néel

DRTBT2012,
La-Londe-Les-Maures, 21 mai 2012



Plan

- Les cycles thermodynamiques
- Principales machines cryogéniques
- Les très basses températures
- Particularités de l'environnement spatial
- Conclusions

Les Cycles thermodynamiques

- Le premier principe

$$dU = \delta W + \delta Q$$

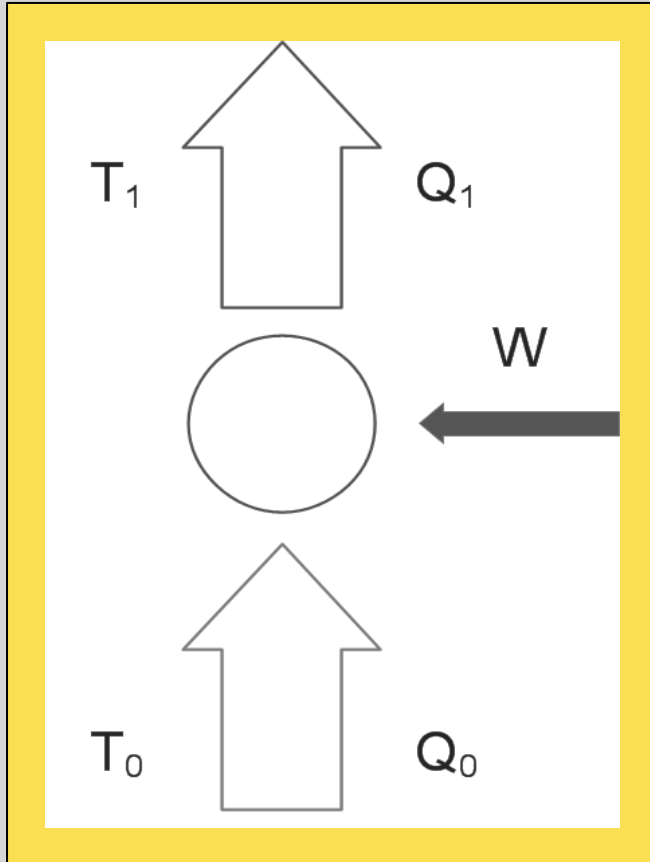
$$\delta W = -P.dV \quad (\text{travail mécanique})$$

$$\delta W = \vec{M}.d\vec{B} \quad (\text{travail magnétique})$$

La chaleur, un status spécial...

Les Cycles thermodynamiques

- Le cycle de Carnot (1824)



- Cycle réversible qui donne le meilleur rendement (Q_0/W)
- $Q_1/Q_0 = f(T_1)/f(T_0)$
- Choix $f(T) = T$
- C'est la même température que celle d'un gaz parfait
 $PV = NRT$
- Carnot ne précise pas la machine...

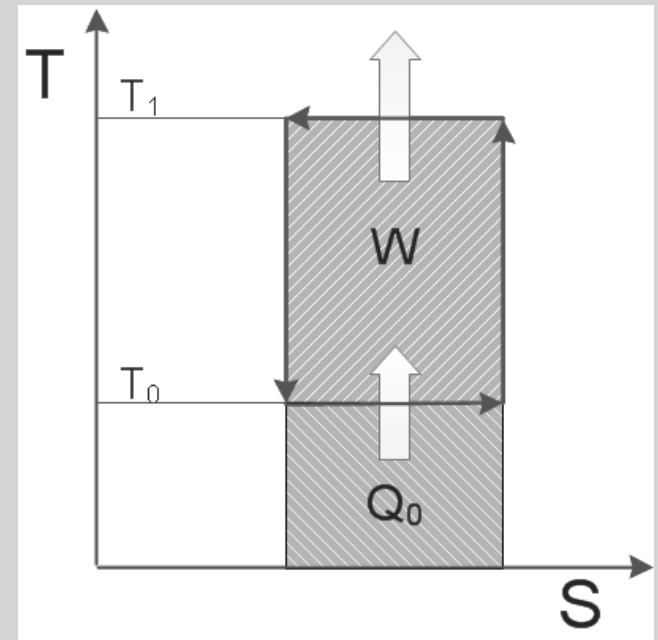
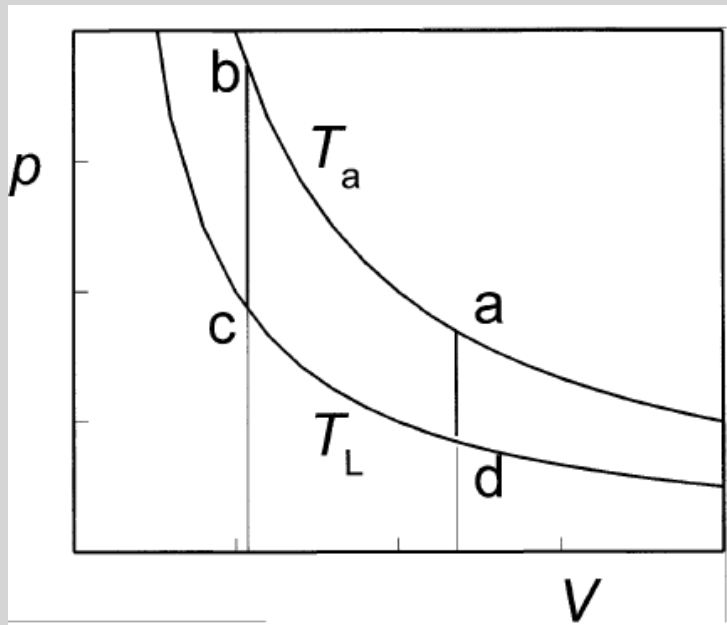
- Le second principe
 - Énoncé de Clausius : « la chaleur ne passe pas spontanément d'un corps froid vers un corps chaud »
 - Clausius introduit l'entropie $S = Q/T$
- => c'est la variable extensive associée au transfert de chaleur

Les cycles thermodynamiques

- Equation d'état d'une substance compressible simple

$$dU = -P \cdot dV + T \cdot dS$$

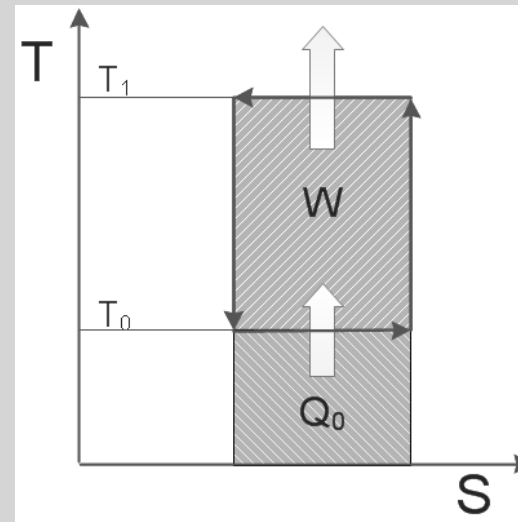
$$U(V, S)$$



Les cycles thermodynamiques

- Coefficient de performance

$$COP_C = \frac{Q_0}{W} = \frac{T_0}{T_1 - T_0}$$



Les Cycles thermodynamiques

- Le caractère irréalisable du cycle de Carnot
- Rappels pour un gaz parfait

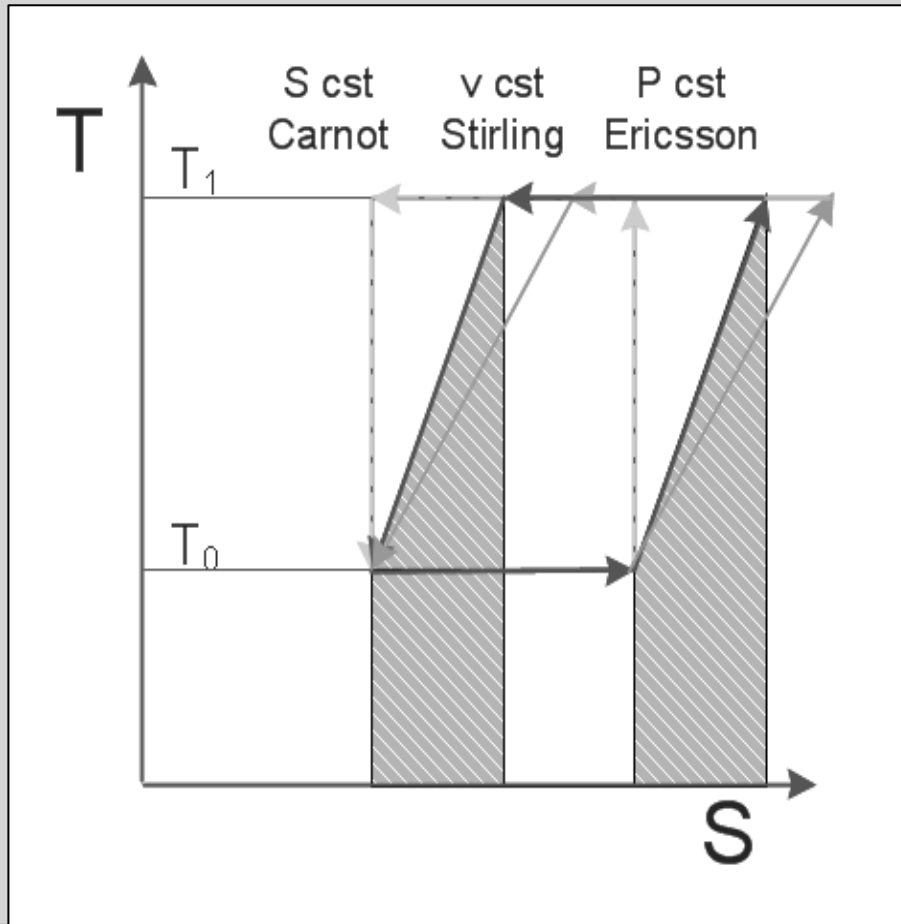
$$PV = NRT \rightarrow C_v(T)$$

$$C_p(T) = C_v(T) + R$$

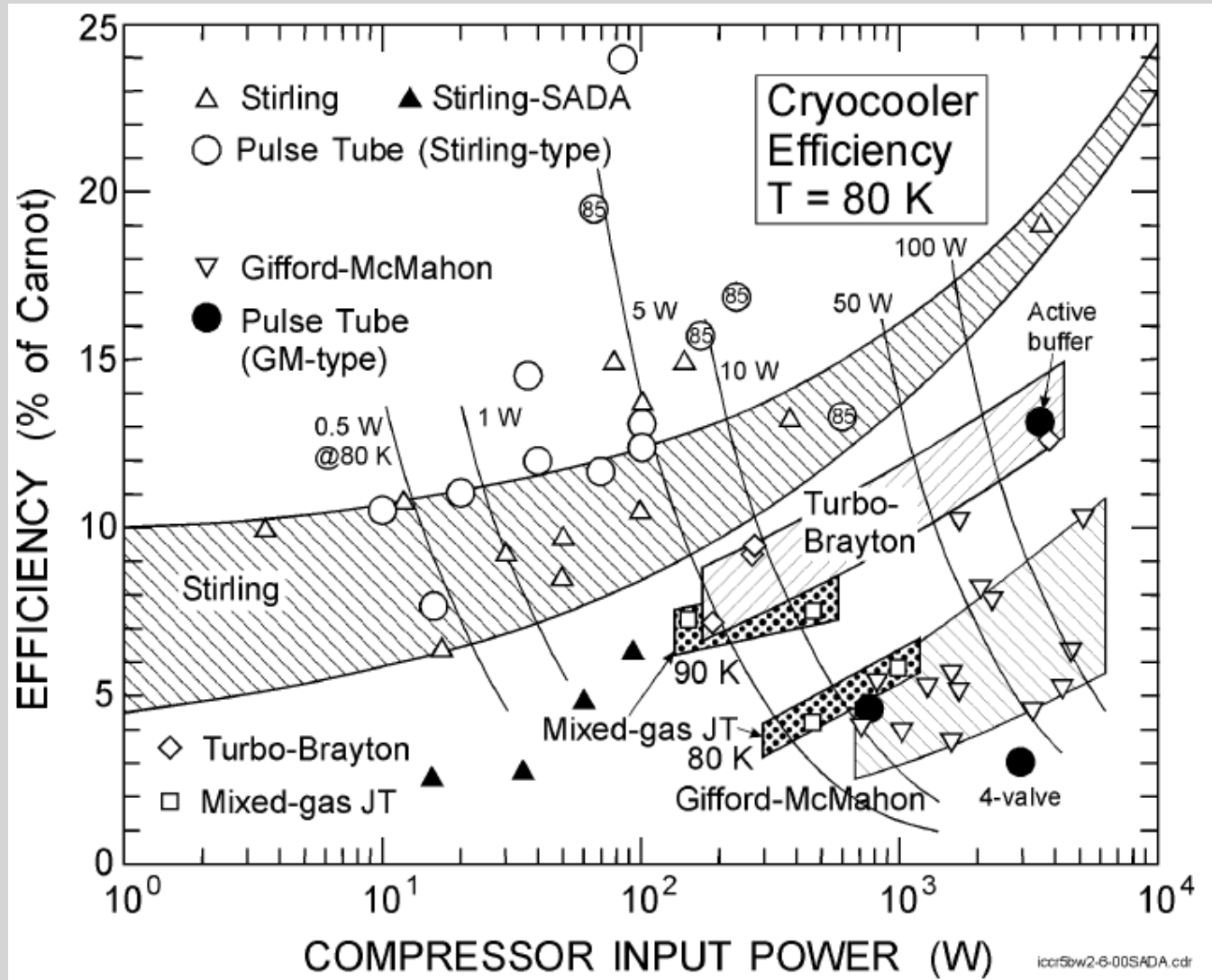
$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \Rightarrow (300/10)^{(1.67/0.67)} = 4800!!$$

Les Cycles thermodynamiques

- Cycles d'Ericsson et Stirling



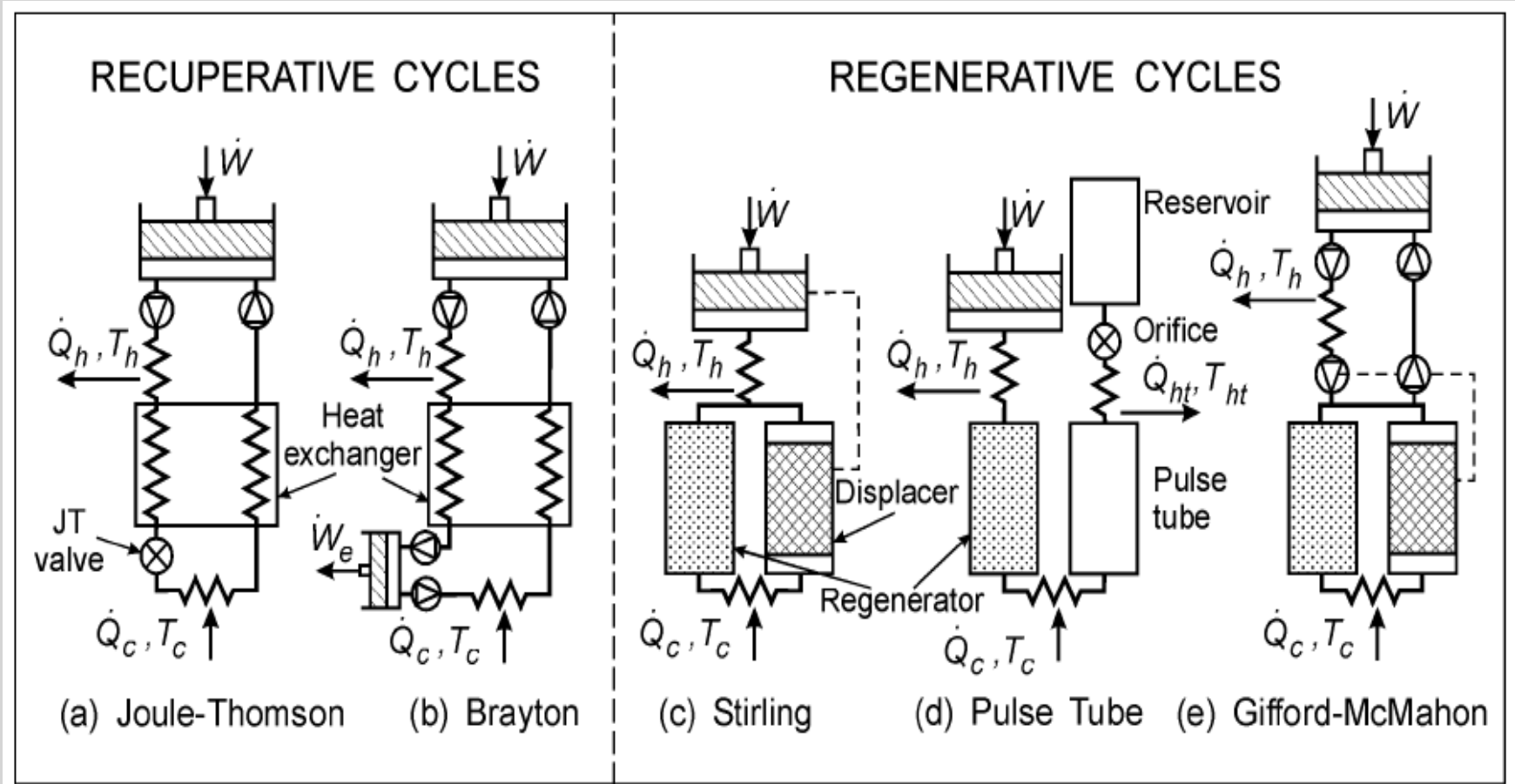
Performances des machines réelles



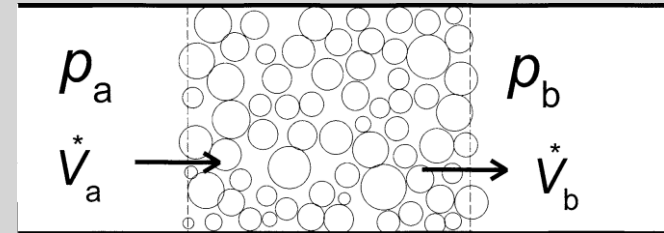
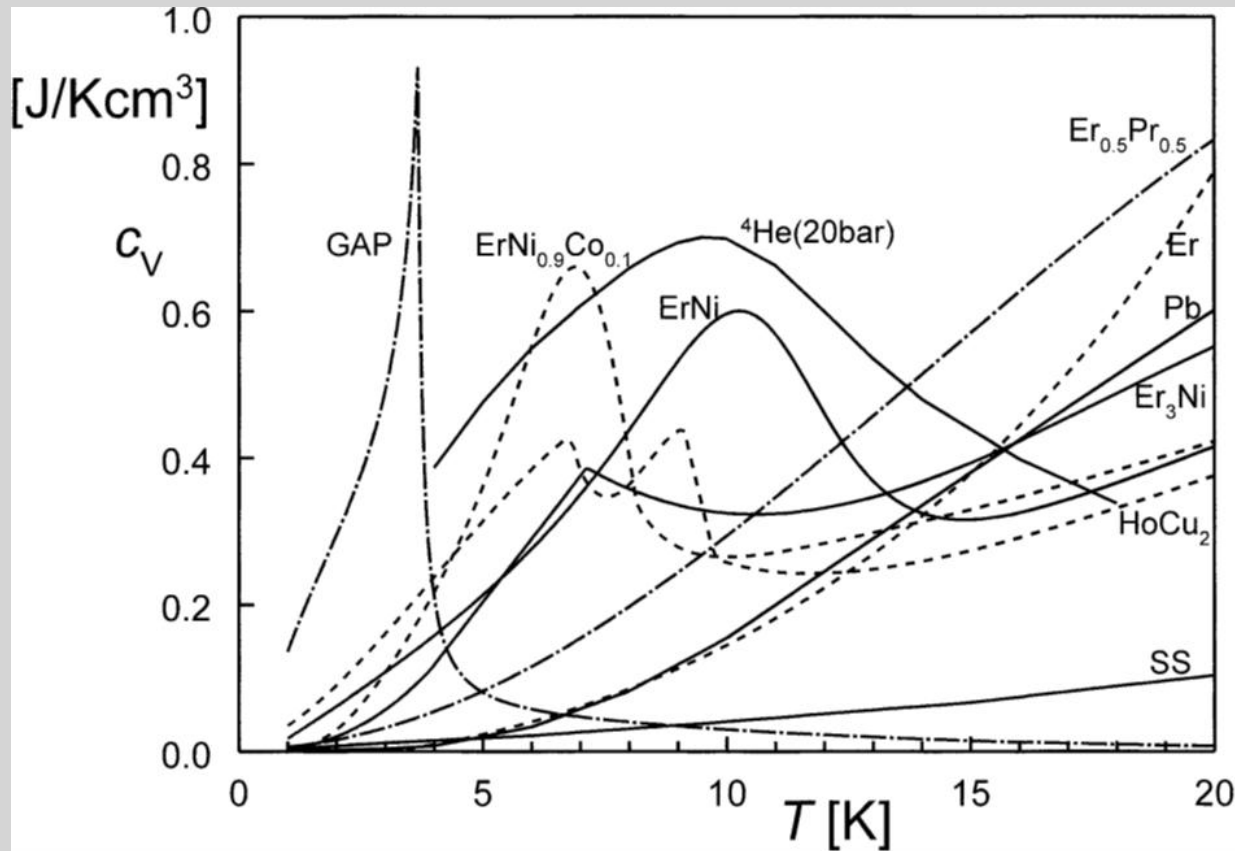
Principales machines cryogéniques

- Machines de Stirling
- Machine de Villeumier
- Gifford-Mac-Mahon
- Pulse-Tubes
- Cycle Joule-Thompson
- Turbo Brayton
- Liquéfacteurs d'hélium : cycle de Claude

Cycle récupératifs ou régénératifs



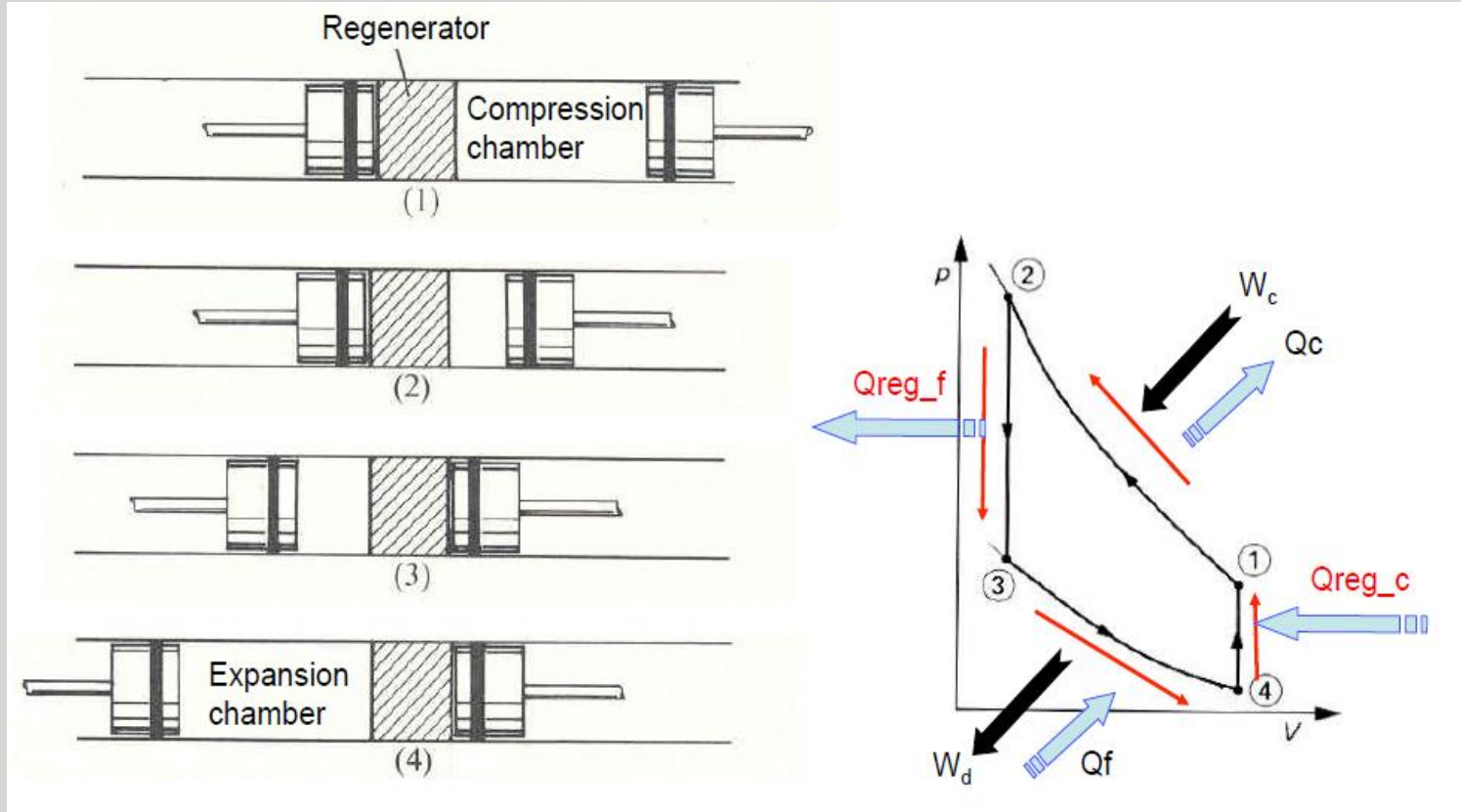
Deux façons de réaliser les échanges internes



Régénérateur idéal :

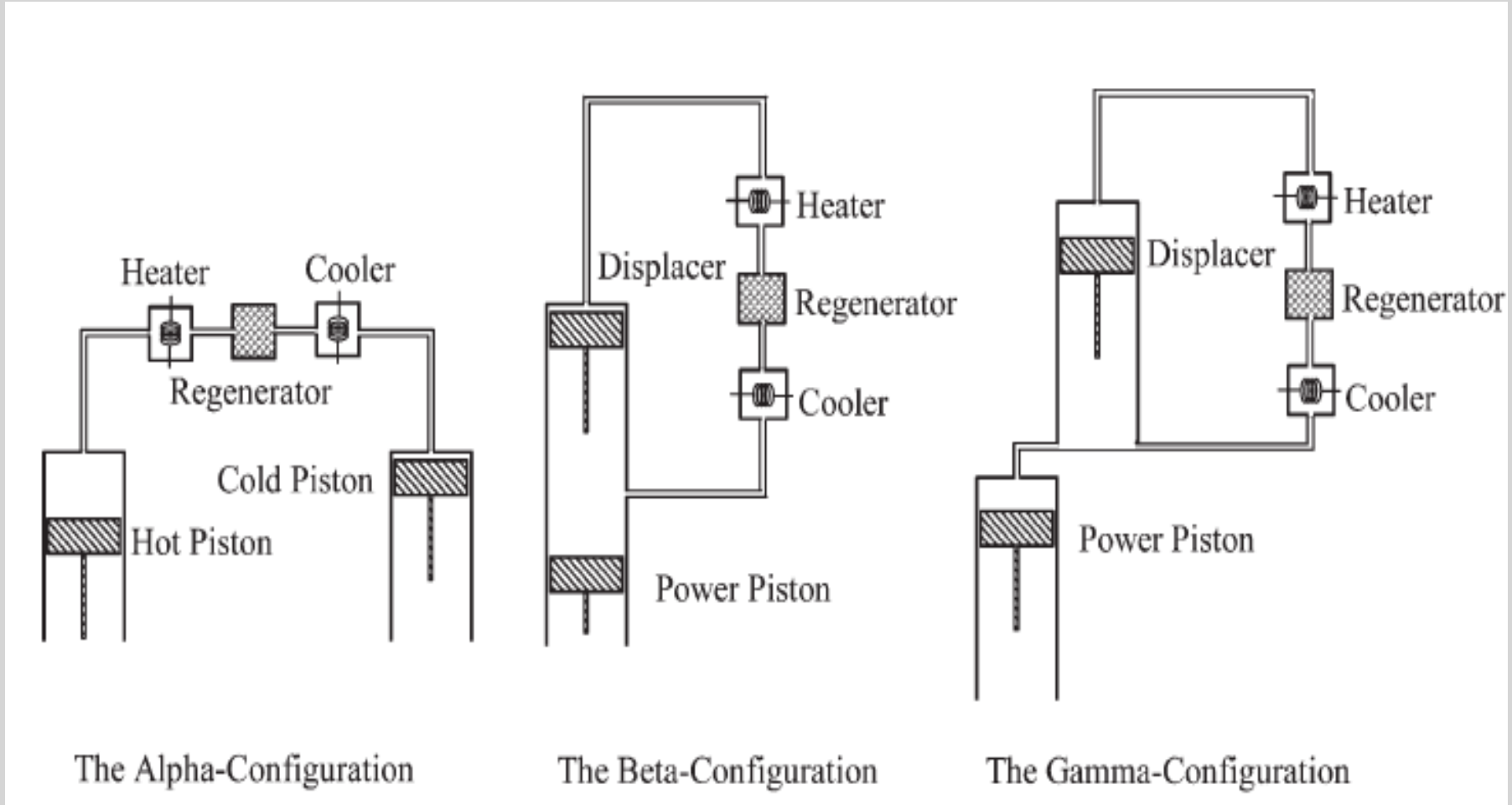
- $C_{\text{REG}} \gg C_{\text{gaz}}$
- $k = 0$
- $\Delta P = 0$

Machines de Stirling

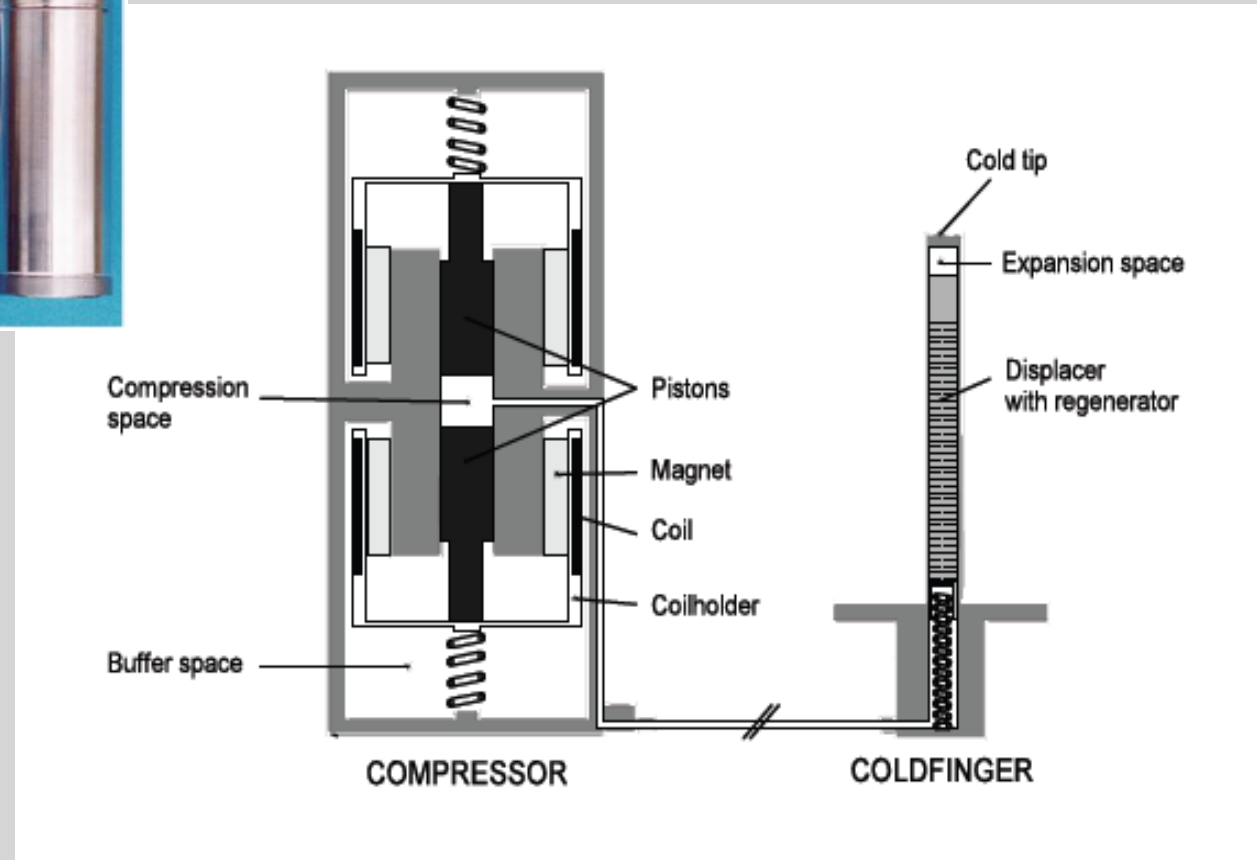
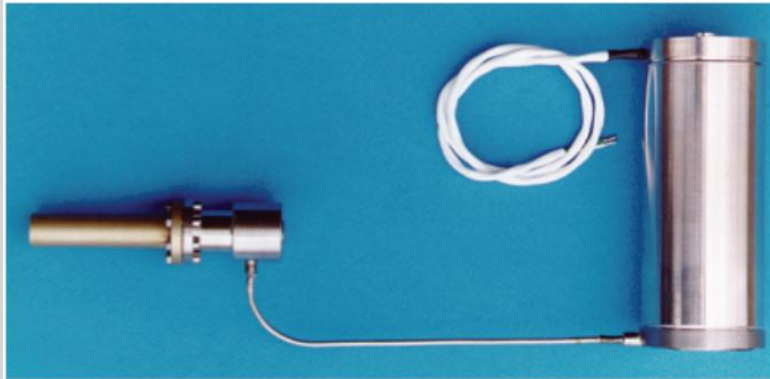


Réalisation du cycle avec régénérateur isochore / compressions et détente isothermes

Trois configurations

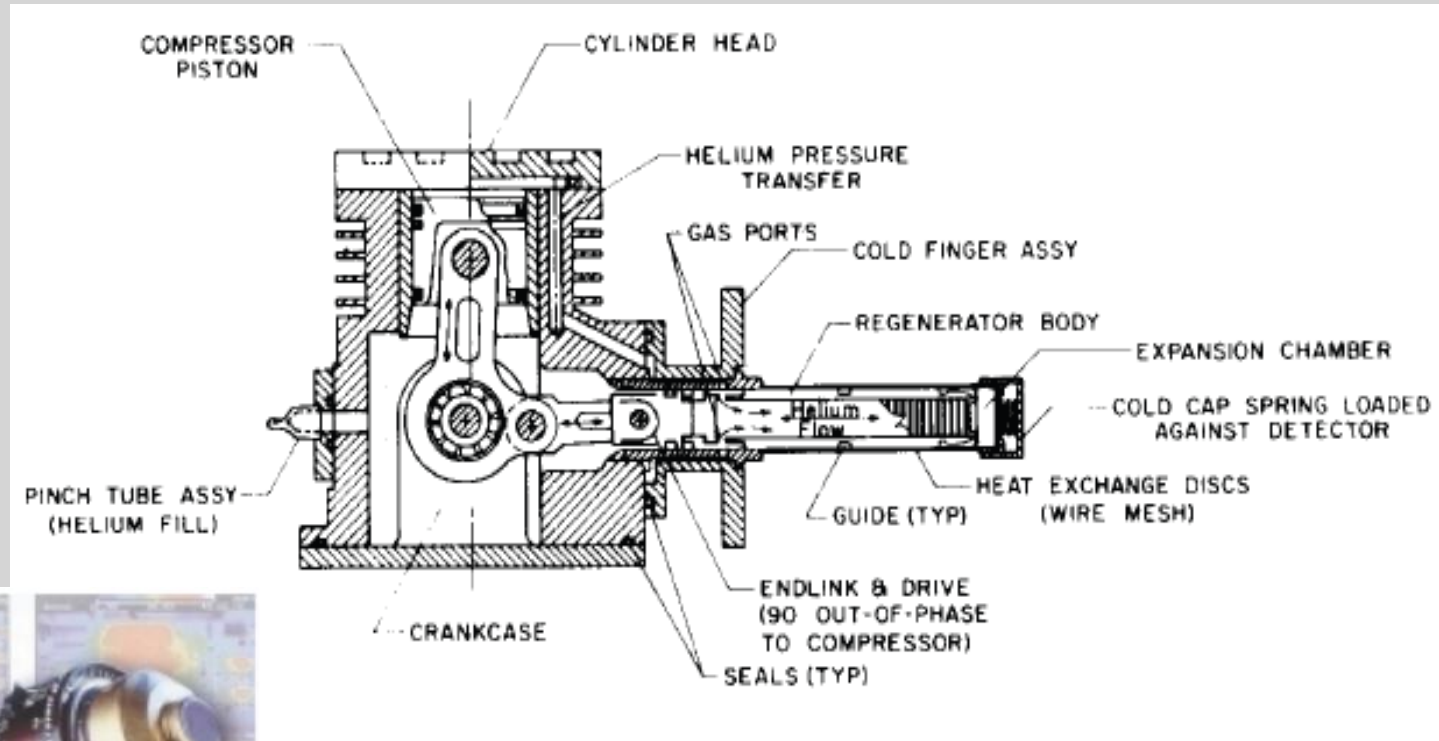


Architecture classique



Synchronisation pistons / déplaceur

Architecture avec embiellage



Intégration directe avec détecteurs

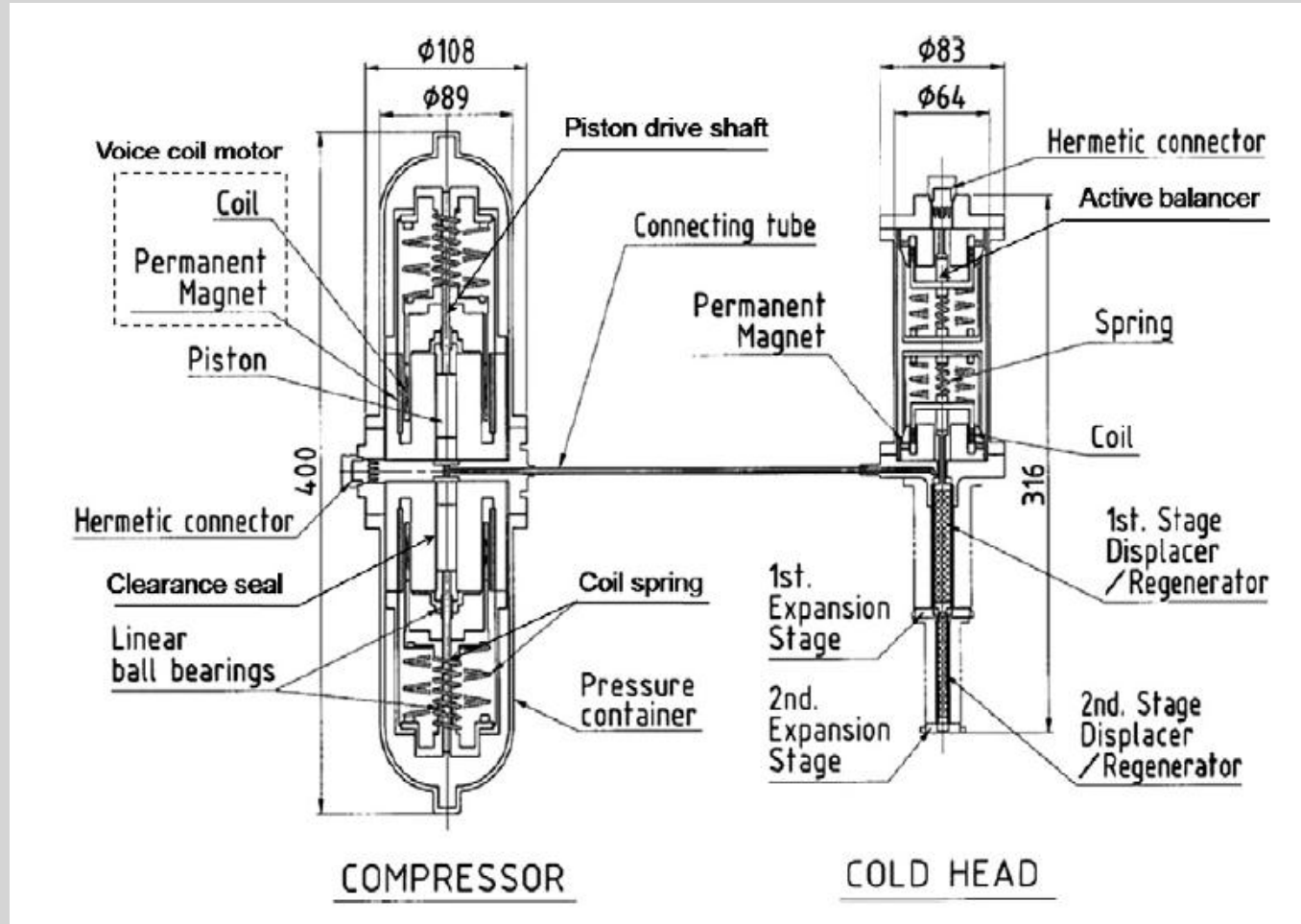
Exemple gamme de produits Air Liquide



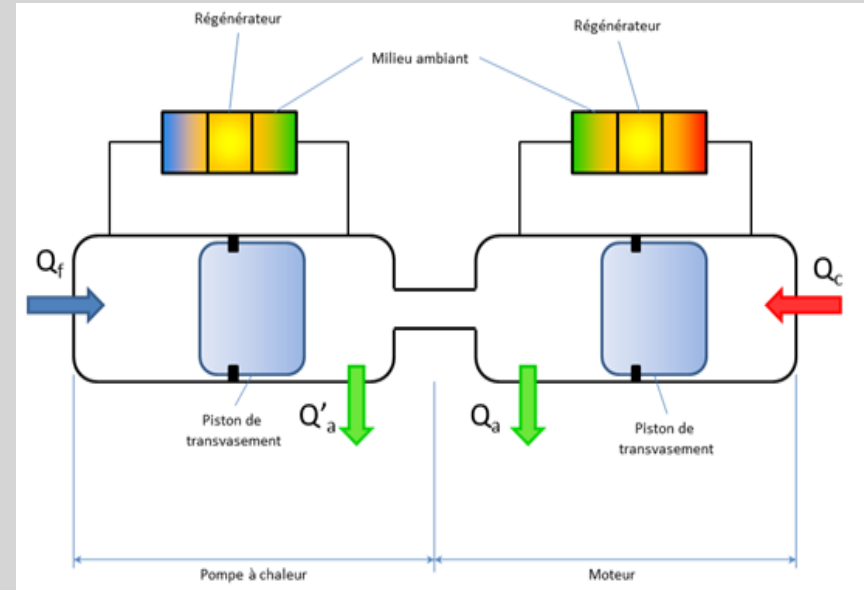
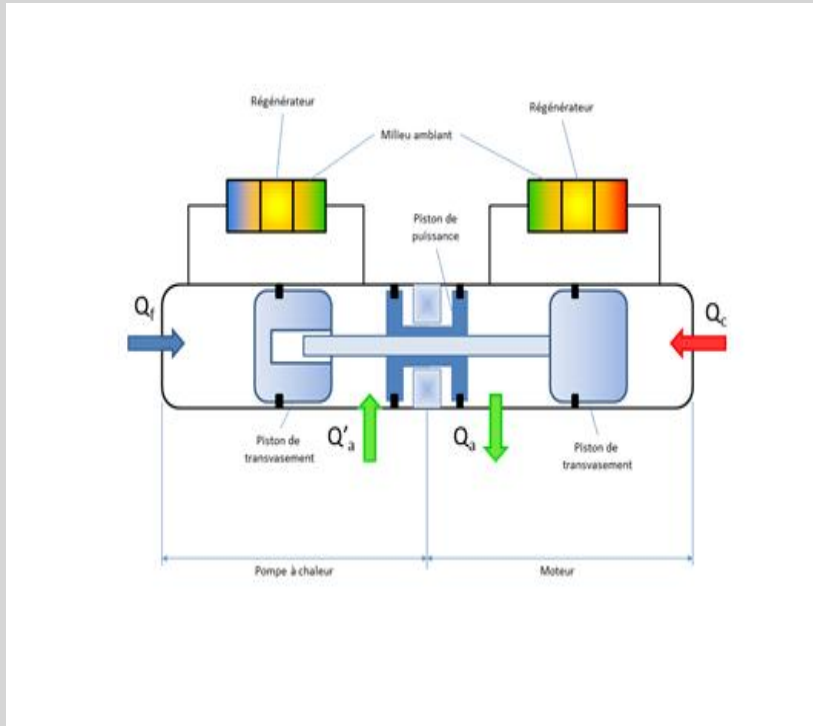
	K 508	K 526S	K548	K549	K563	K515
Type	Integral Stirling 1/2 W	Split Stirling 1/2 W	Integral Stirling 3/4 W	Split Stirling 3/4 W	Integral Stirling low power	Split Stirling 0,6 W
Cooldown time to 77 K	typ 5 min (250 J at 23°C)	typ 5 min (240 J at 23°C)	typ 5 min (500 J at 23°C)	typ 5 min (620 J at 23°C)	typ 6 min at 23°C, 10 min at 71°C(210 J at 23°C, 300 J at 71°C)	typ 3 min (150 J at 23°C)
Total weight	450 g	970 g	600 g	950 g	290 g	770 g
MTTF	> 10,000 hours	> 5,000 hours	> 8,000 hours	> 7,500 hours	> 5,000 hours	> 6,000 hours
Input voltage	12-16 or 18-28 Vdc	18-32 Vdc	18-32 Vdc	18-32 Vdc	12 Vdc	12-16 or 18-28 Vdc
Steady State input power	220 mW at 77 K	500 mW at 77 K	550 mW at 77 K	550 mW at 77 K	220 mW at 80 K	220 mW at 80 K
Maximum input power	17 W	35 W	40 W	40 W	15 W	
Ambient temperature limits	-40°C / +85°C operational -56°C / +85°C non operational	-40°C / +71°C operational -54°C / +85°C non operational	-40°C / +71°C operational -56°C / +85°C non operational	-40°C / +71°C operational -56°C / +85°C non operational	-40°C / +71°C operational	-40°C / +71°C operational -56°C / +85°C non operational

Thalès Cryogenics, Ricor, Sunpower, Radeon,...

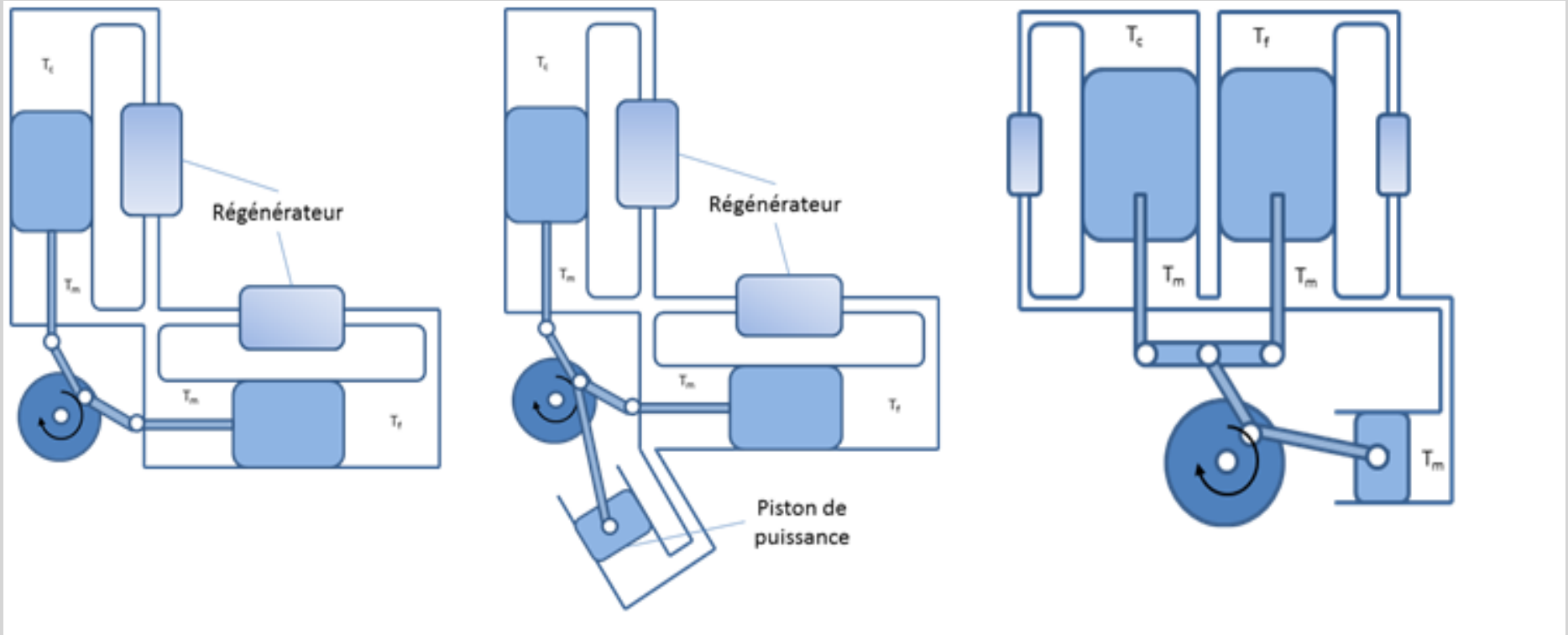
Exemple machine 20 K



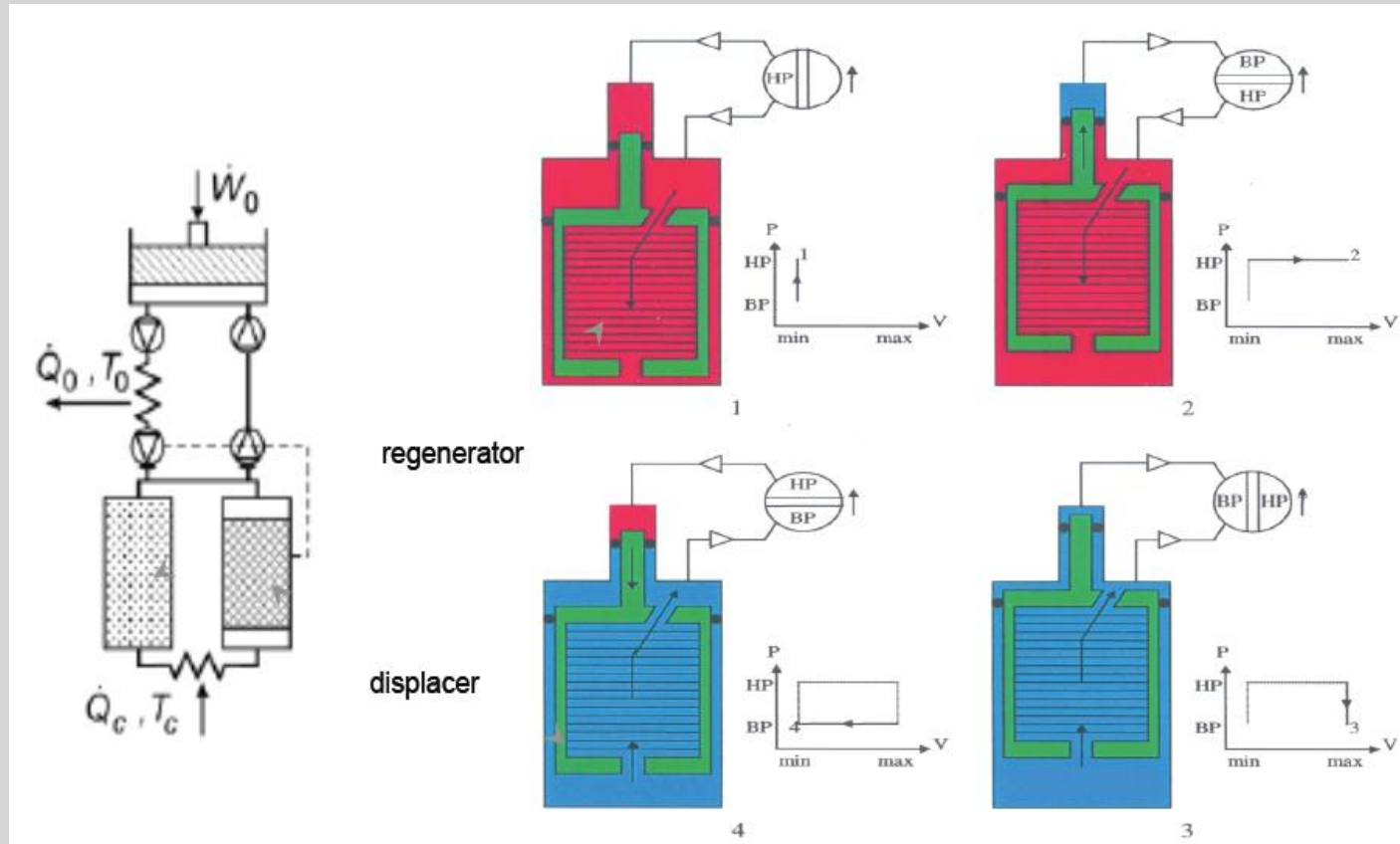
Stirling 2 étages (JAXA), Sato (2010)



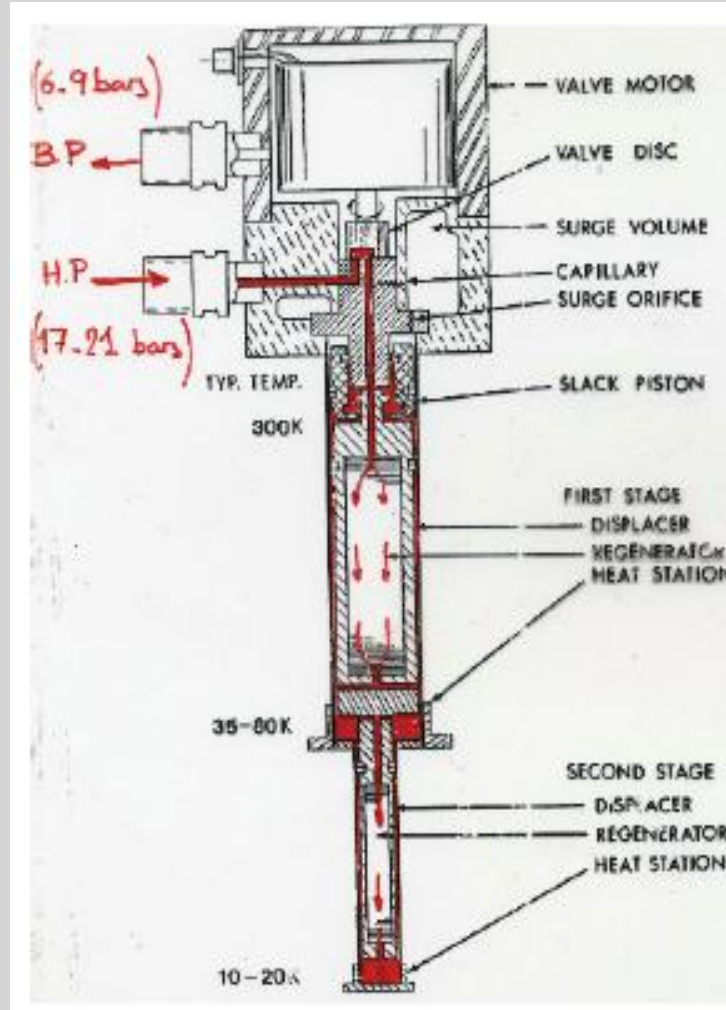
Couplage de deux cycles pour éliminer l'apport de travail mécanique (3 sources thermiques)



Gifford-Mac-Mahon



- Régénérateur isobare
- Vanne admission / détente (irréversibilité)

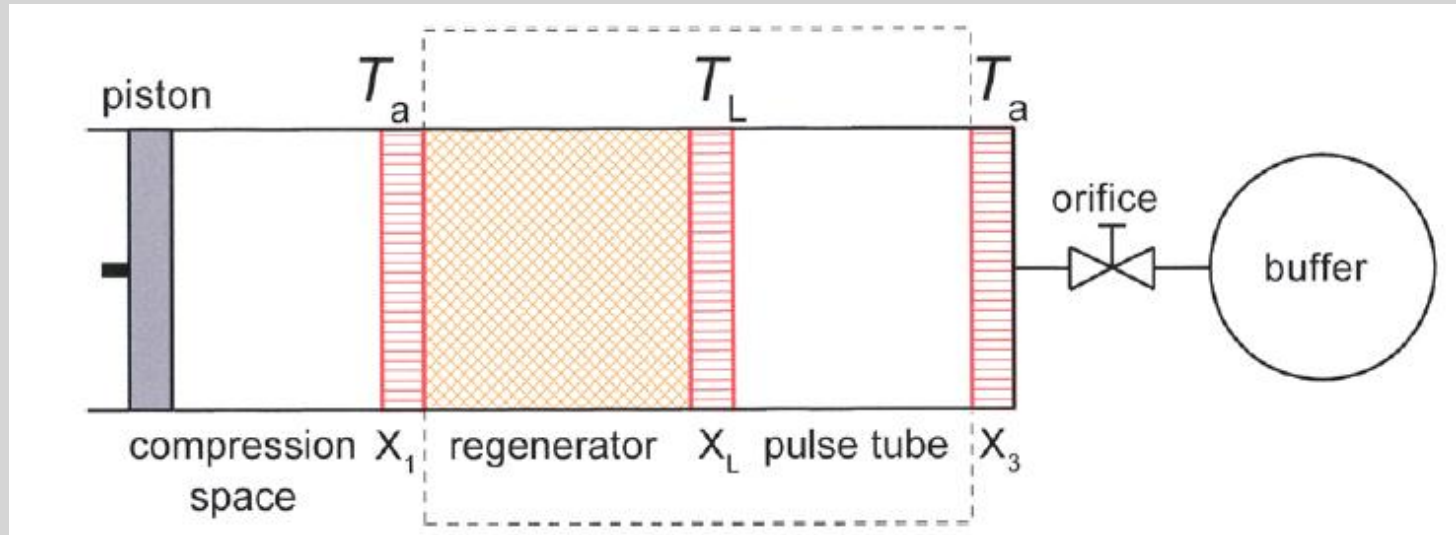


10K Cryocooler Specification Chart

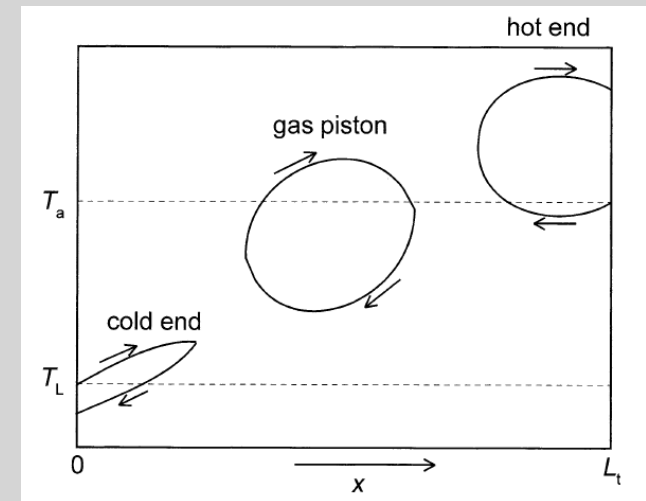
	Watts @ 50 Hz		Watts @ 60 Hz	
	1st Stage Capacity	2nd Stage Capacity	1st Stage Capacity	2nd Stage Capacity
CH-204-N (6.5 K)	N/A	2.5 W @ 10 K	N/A	3.0 W @ 10 K
RDK-408S (6.5K)	30 W @ 45 K	5.4 W @ 10 K	35 W @ 45 K	6.3 W @ 10 K
CH-202	7.3 W @ 77 K	1.8 W @ 20 K	8.8 W @ 77 K	2.2 W @ 20 K
CH-204	13.5 W @ 80 K	6.7 W @ 20 K	16.2 W @ 80 K	8.1 W @ 20 K
CH-208R	65 W @ 77 K	6.0 W @ 20 K	80 W @ 77 K	7.5 W @ 20 K
CH-208L	28 W @ 77 K	8.0 W @ 20 K	35 W @ 77 K	10 W @ 20 K
CH-210	110 W @ 77 K	6.0 W @ 20 K	120 W @ 77 K	7.0 W @ 20 K
RDK-400B	54 W @ 40 K	N/A	70 W @ 40 K	N/A
CH-104	34 W @ 77 K	N/A	42 W @ 77 K	N/A
CH-110	175 W @ 77 K	N/A	200 W @ 77 K	N/A

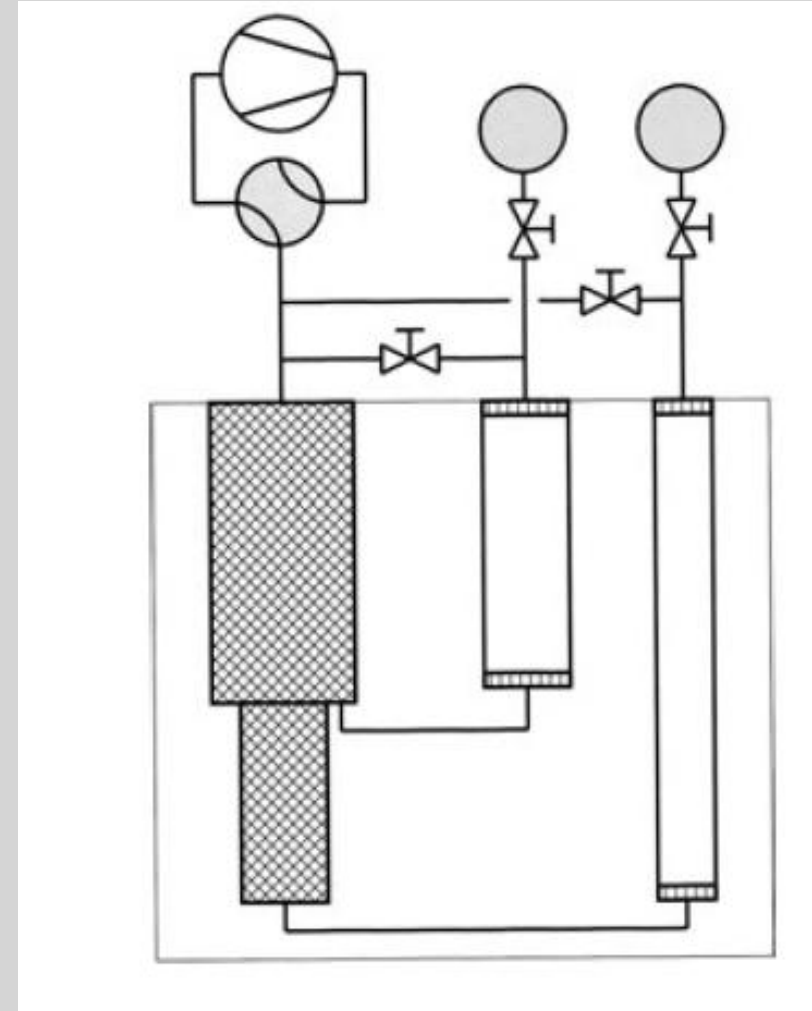
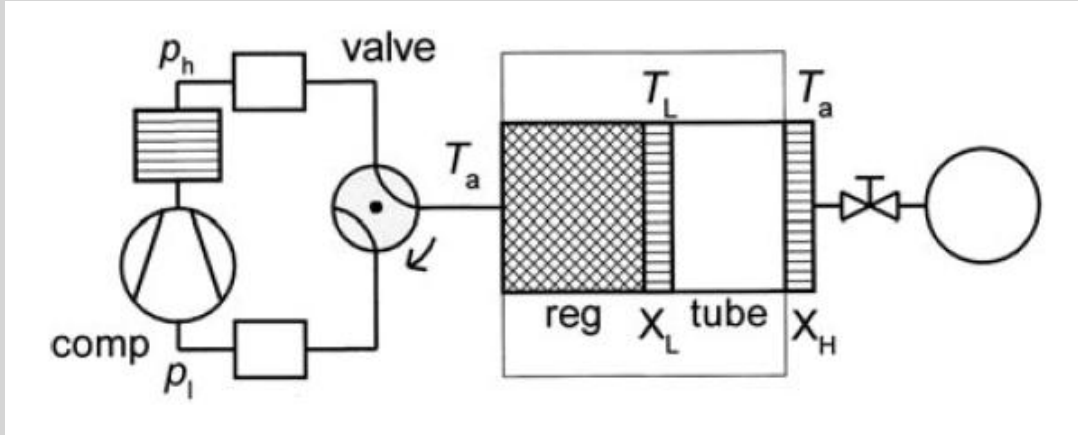
Specifications subject to change without notice.

Machines robustes, MTBF = 10000 – 20000 h
 Cryomech, Sumitomo, CTI,



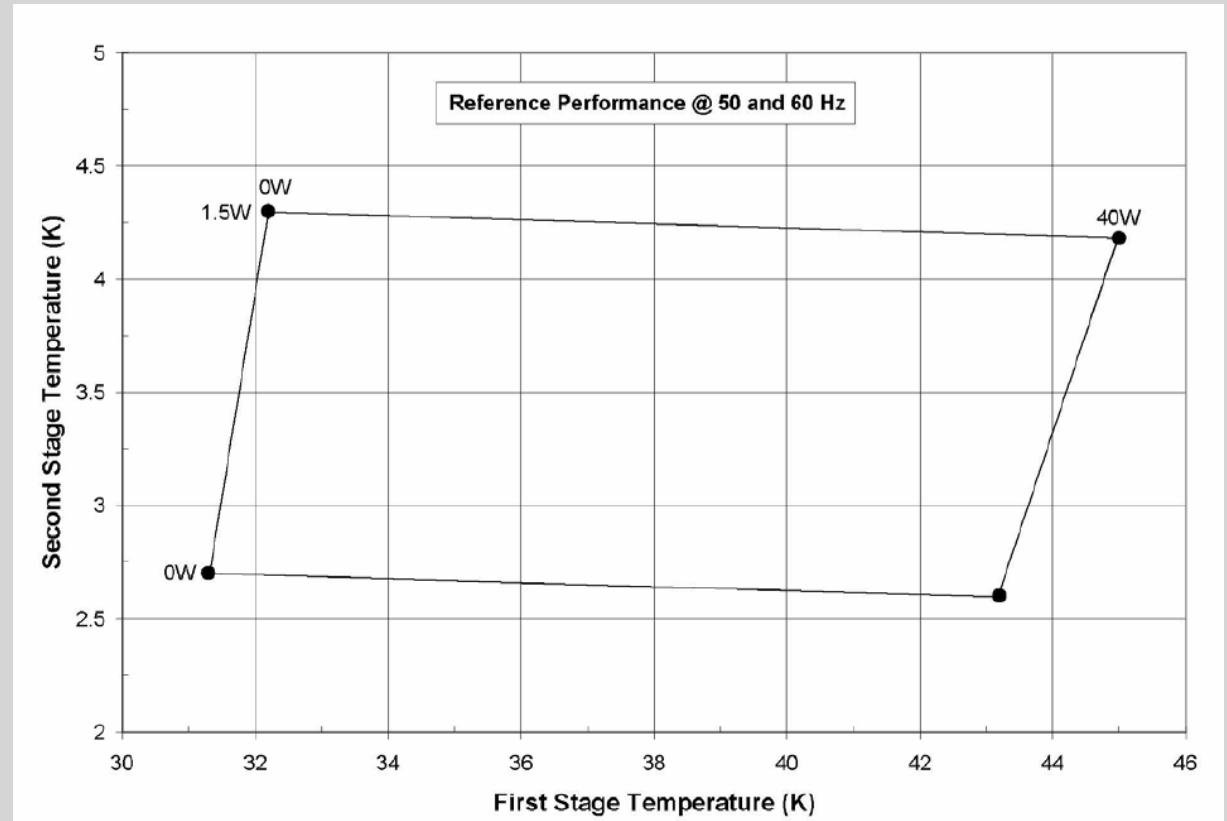
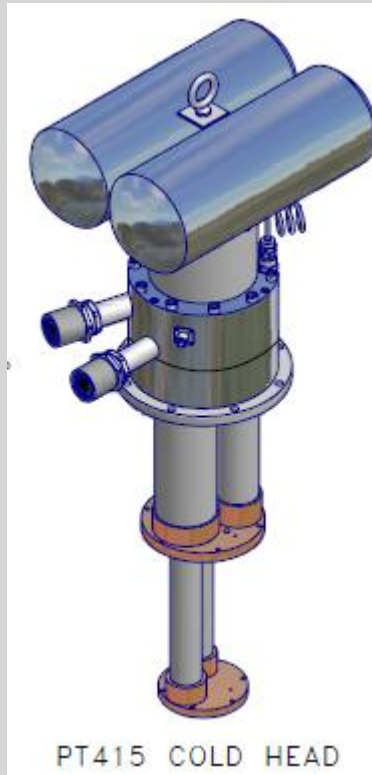
- Remplacement du déplaceur par un 'piston gazeux'
- Configuration 'Stirling'





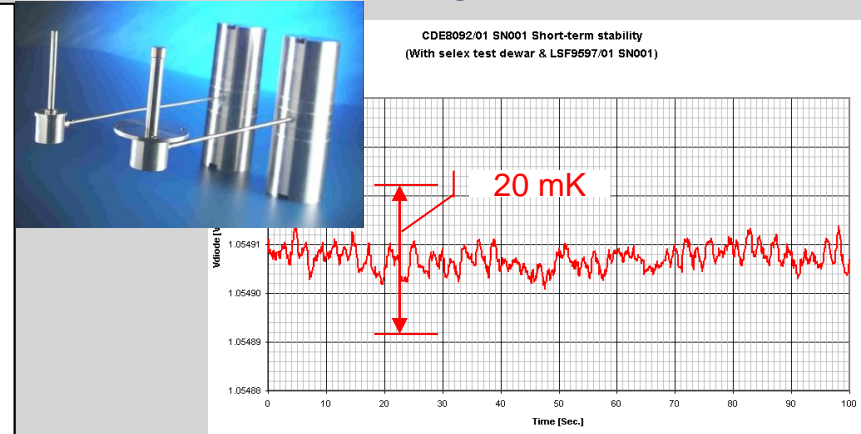
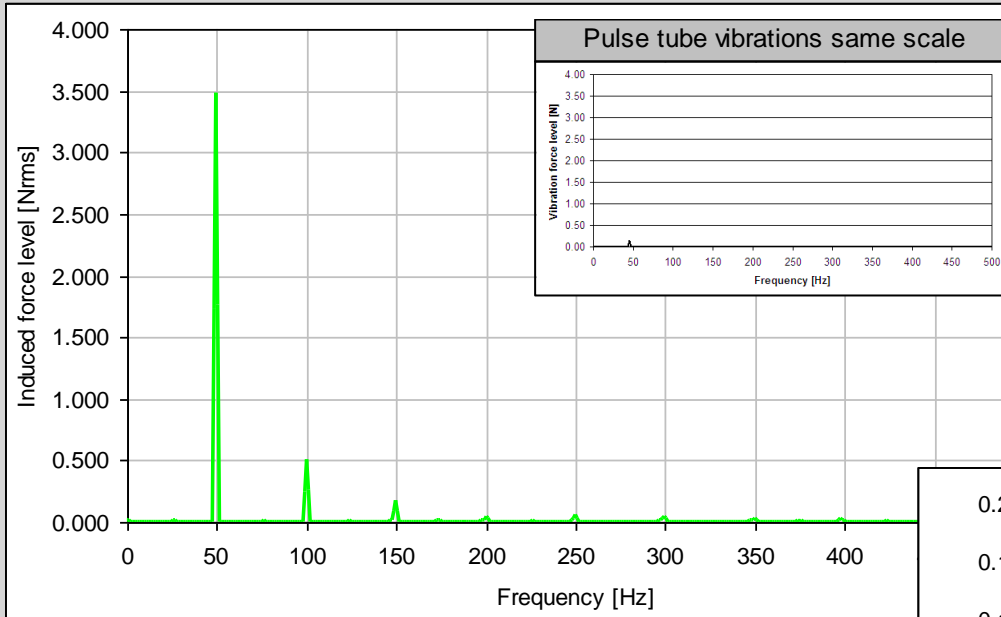
- Configuration GM
- Ajout de plusieurs étages

Gamme Cryomech



- Pulse Tube 1 ou 2 étages

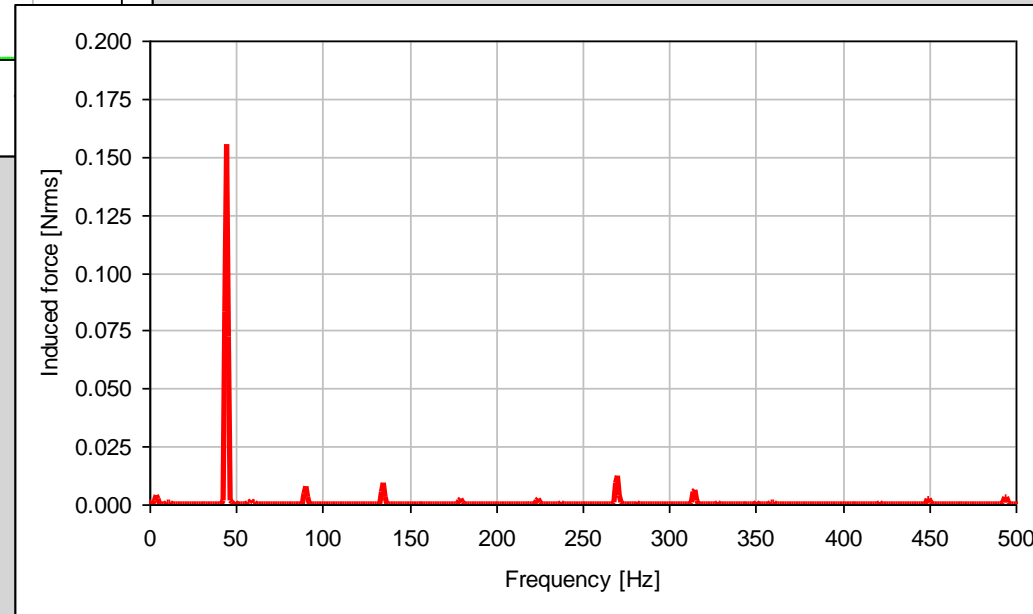
LSF 9589 Stirling



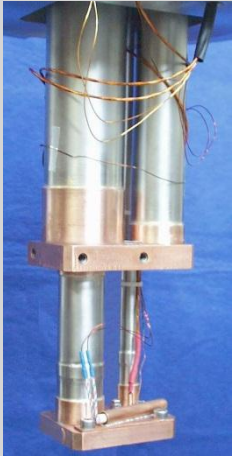
LPT 9510 pulse tube

Advantages Pulse Tube cold finger:

- Very low vibrations
- Robust design



PT basse fréquence : réalisations CEA



ESO: detectors cooling

30 W @ 55 K
3 W @ 19 K

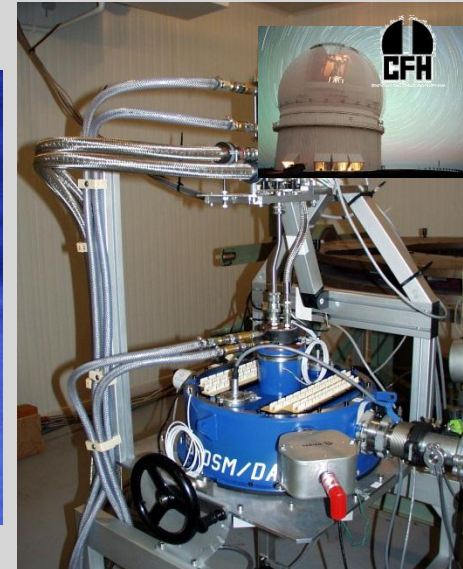


23 W @ 56 K

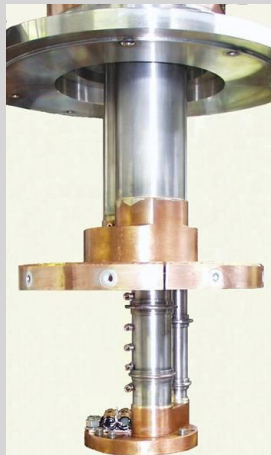
*"Antenne médicale" :
Skin analysis*



90 W @ 140 K



*MEGACAM: Detectors on
Hawaiian telescope*



4 K PT

30 W @ 55 K
600 mW @ 4.2 K



*READY: Superconduct.
converter cooling*

100 W @ 80 K



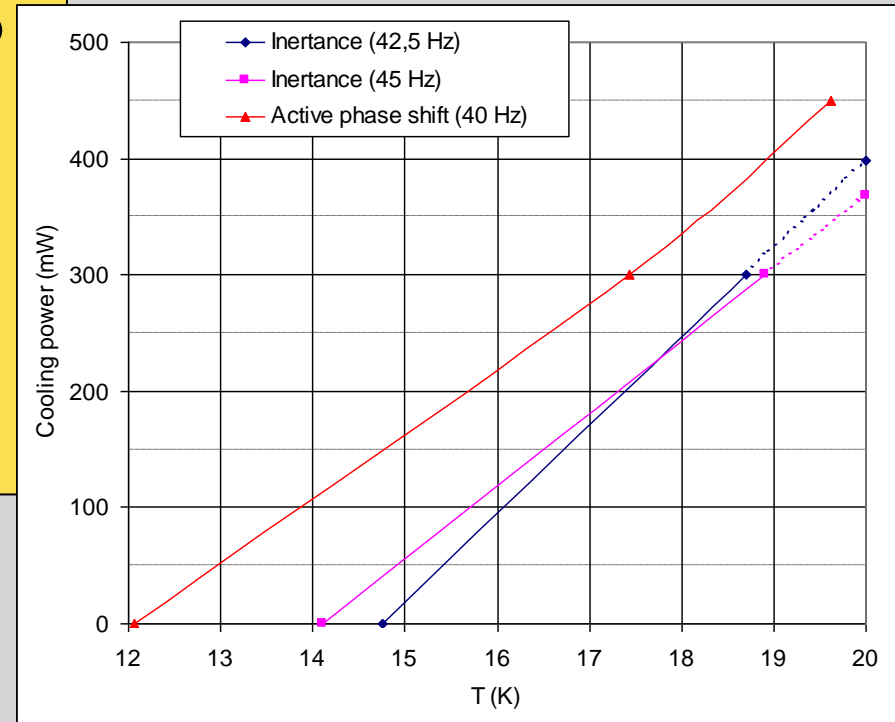
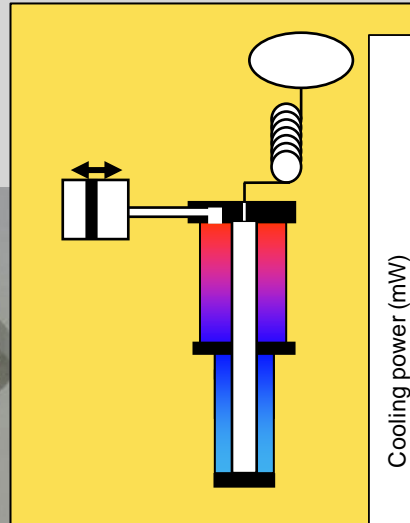
PT 35K 15 W @ 25 K



Aluminum warm flange 300 K

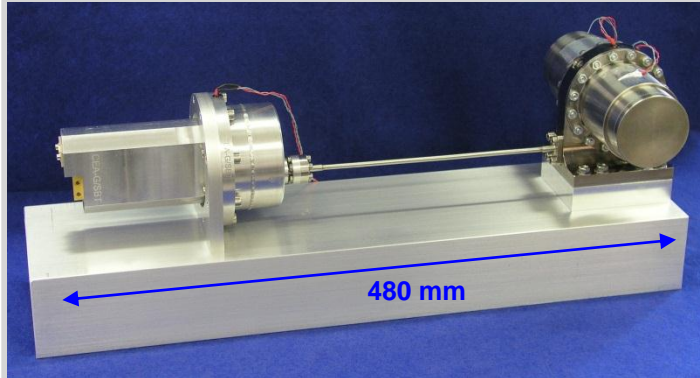
Heat interceptor linked to cold source (80 K)

Cold end 10-20 K



10.1 K has been achieved with 50 K intercept temperature and 80 W PV

1 W @ 80 K



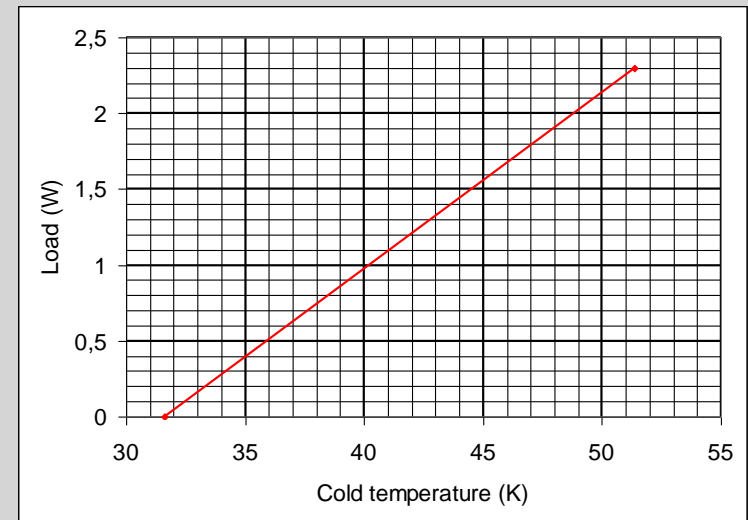
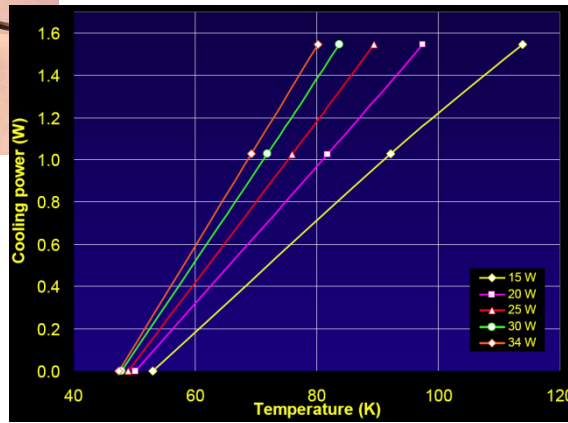
**MPTC
(ESA/TRP)**
35 W elec input
2.8 kg



2.3 W @ 50 K

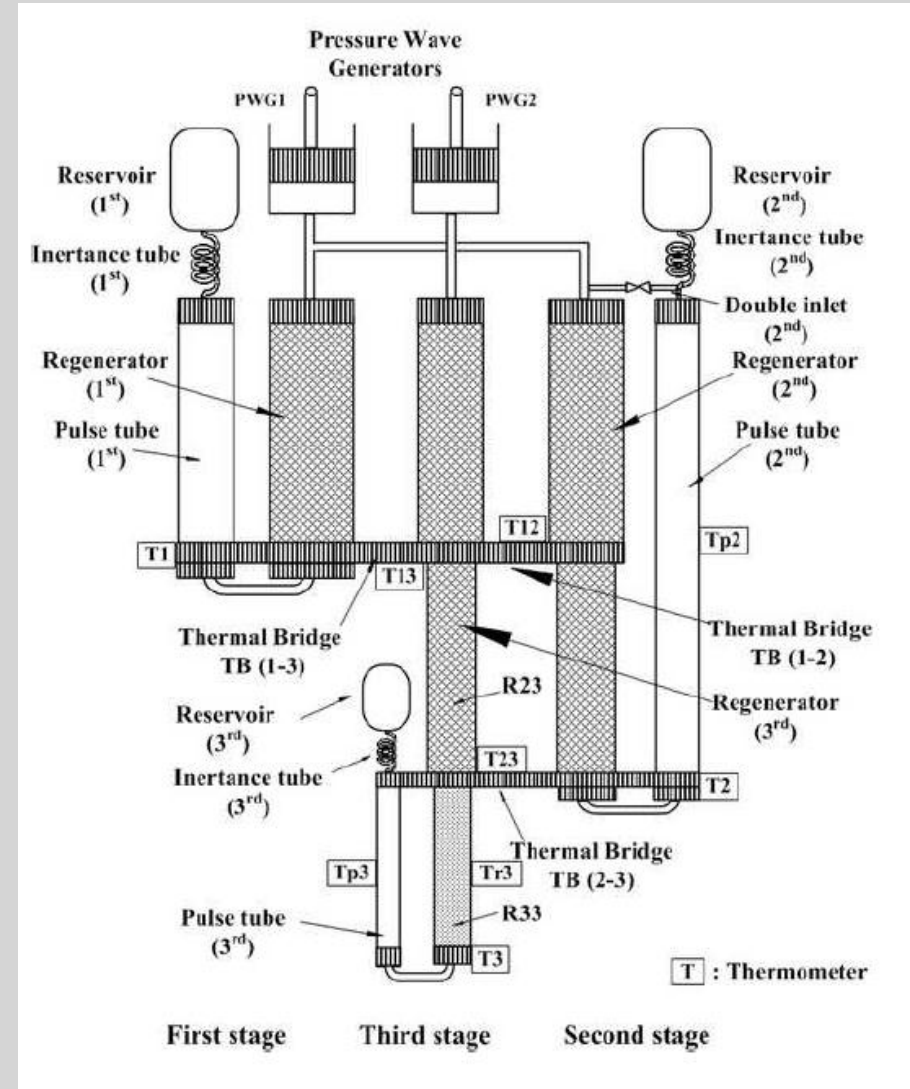


**LPTC
(ESA/TRP)**
35 W elec input
2.8 kg

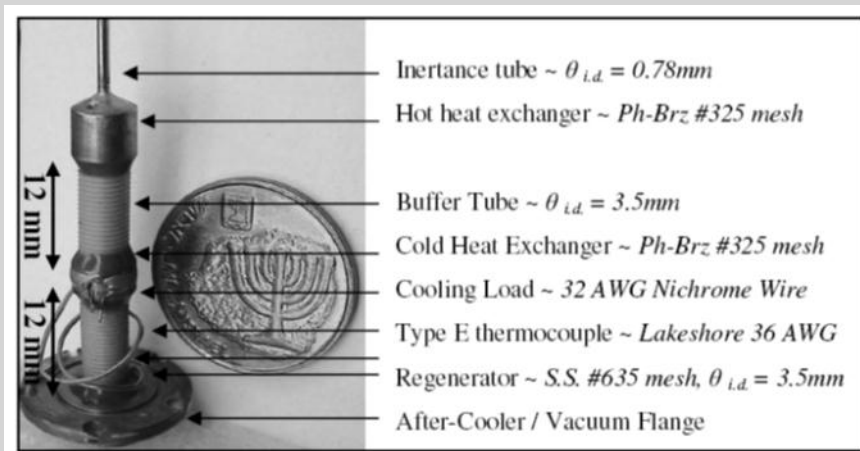


Encore plus...

- PT 26 Hz pour applications spatiales
- 6K
- Qiu et al., Cryogenics 2011

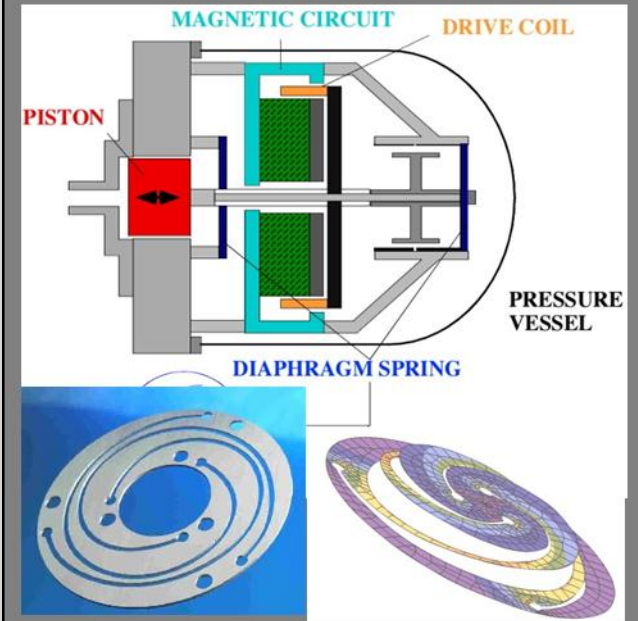


- Réduction de la masse
- Temps de MEF
- Fiabilité



- $T_{min} = 146 K$
- 100 mW @ 160 K
- $L_{rege} = 12 mm$
- $P = 38 bar, f = 150 Hz$
- Ricor miniature linear compressor

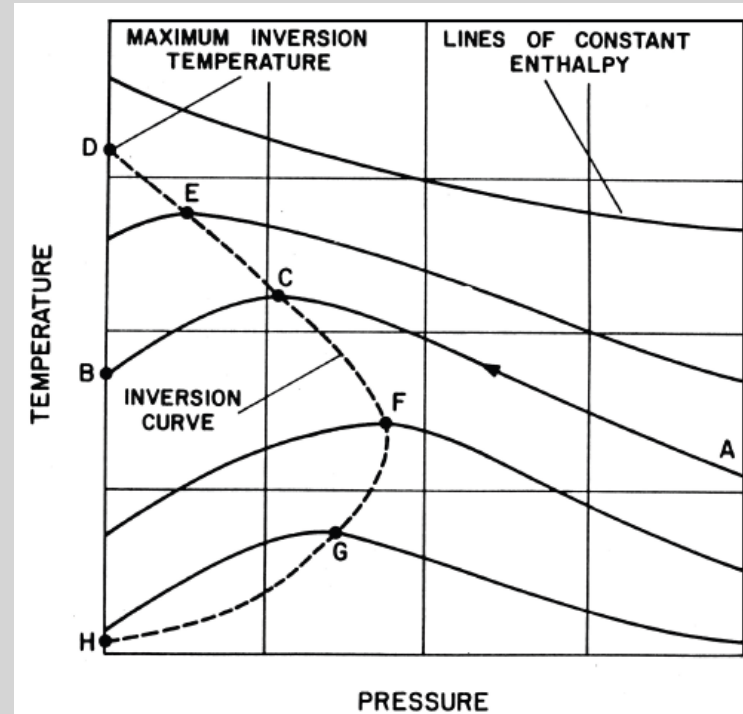
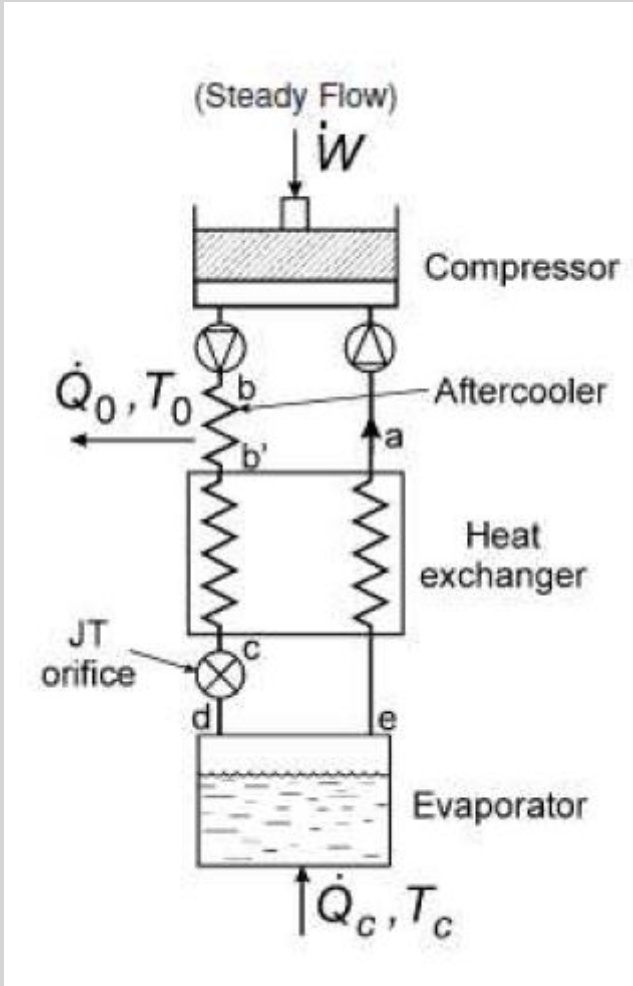
Key concept : Flexure bearing



Very high radial stiffness ensure axial alignment

NO FRICTION

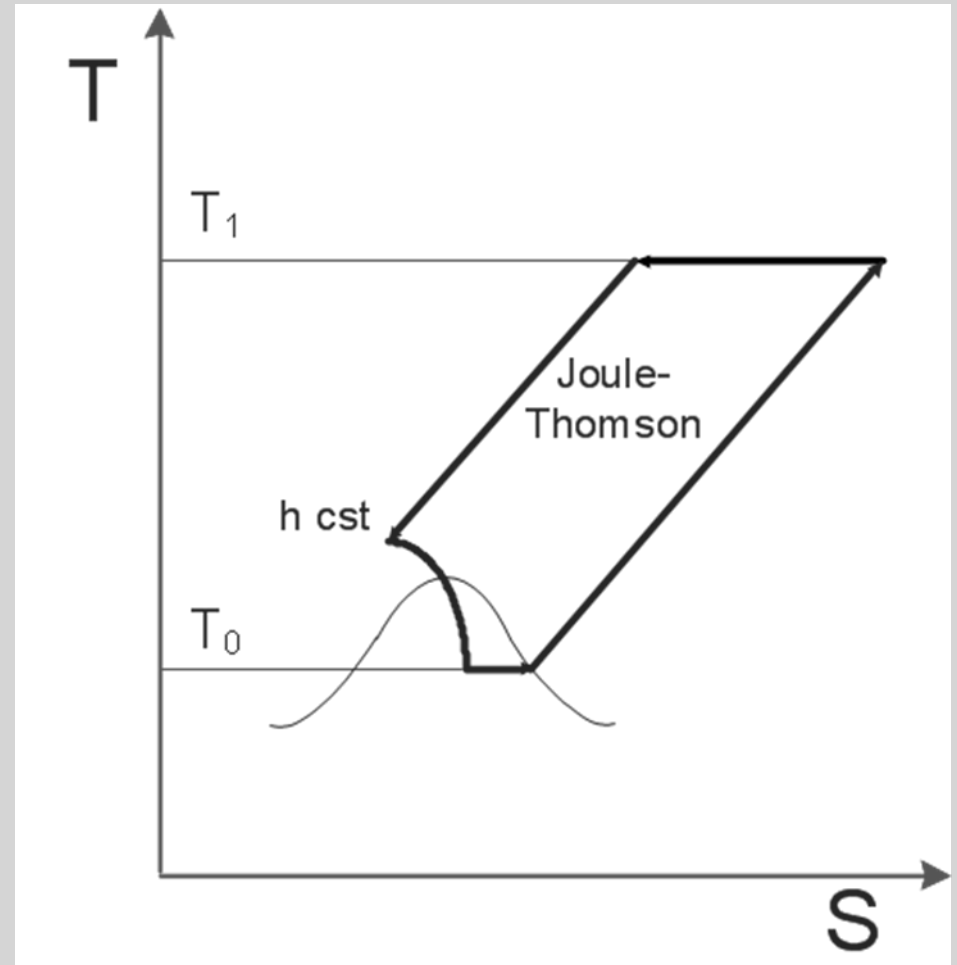
Cycle Joule-Thompson



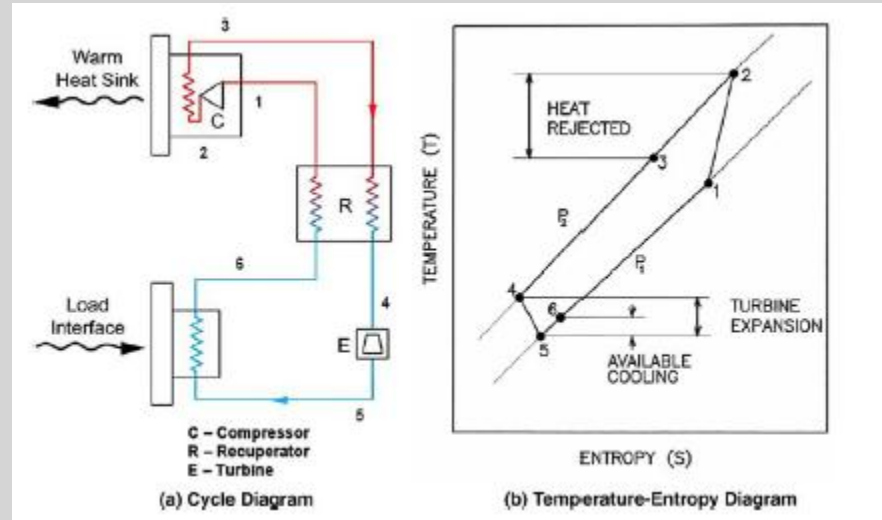
- ✓ Pré-refroidissement nécessaire pour inversion
- ✓ Phase liquide dans le doigt froid

- Ecoulement adiabatique
- $u.dm + pv.dm = h.dm$
- $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = 0$ pour GP

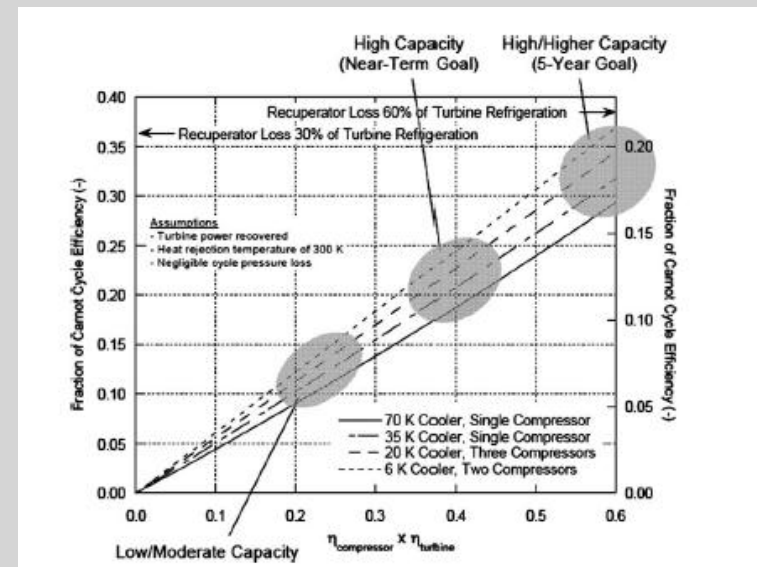
Fluide	T _{inv} (K)
He	43
H ₂	202
Ne	260
N ₂	623

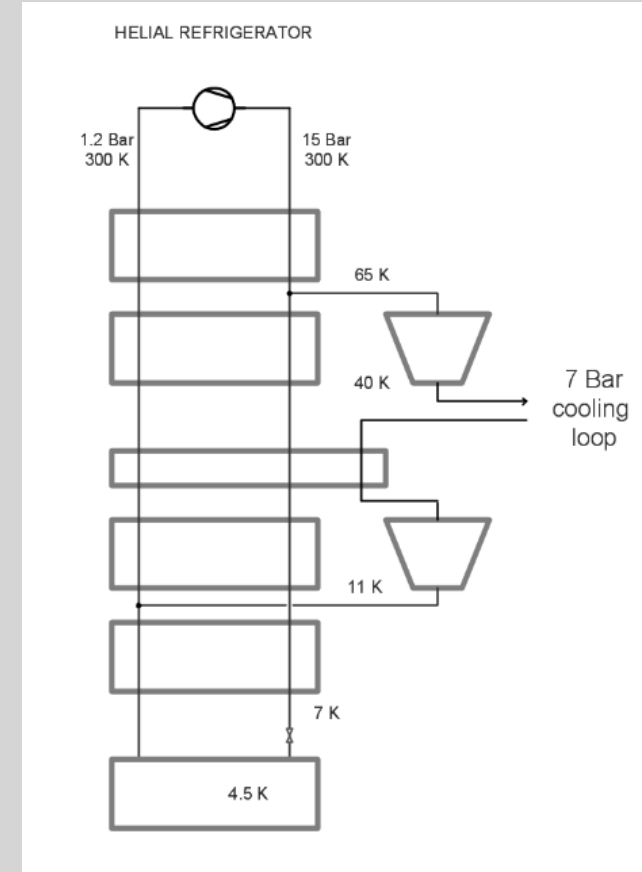
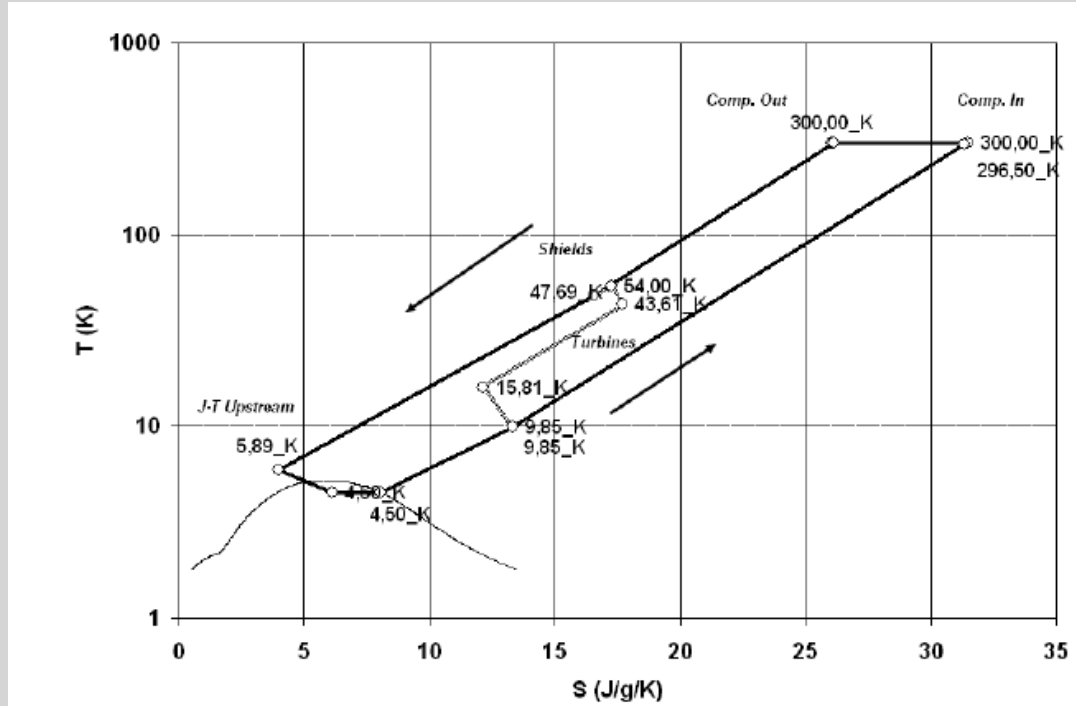


- Performances
- Faibles vibrations



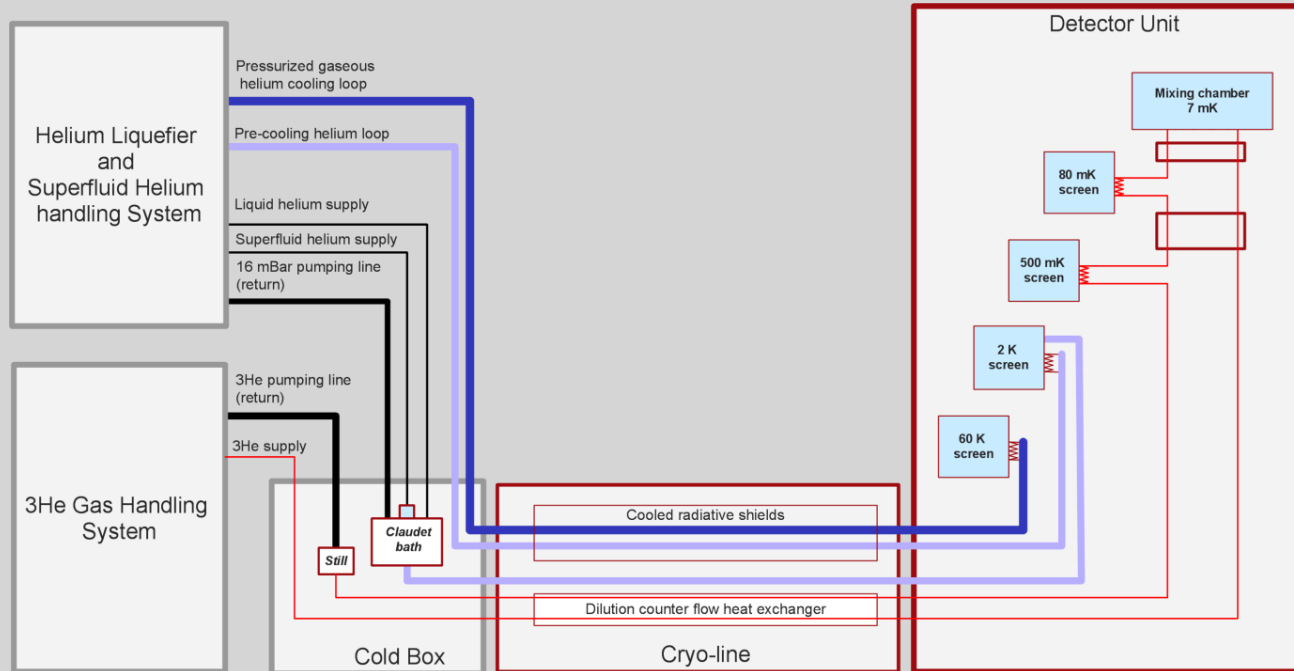
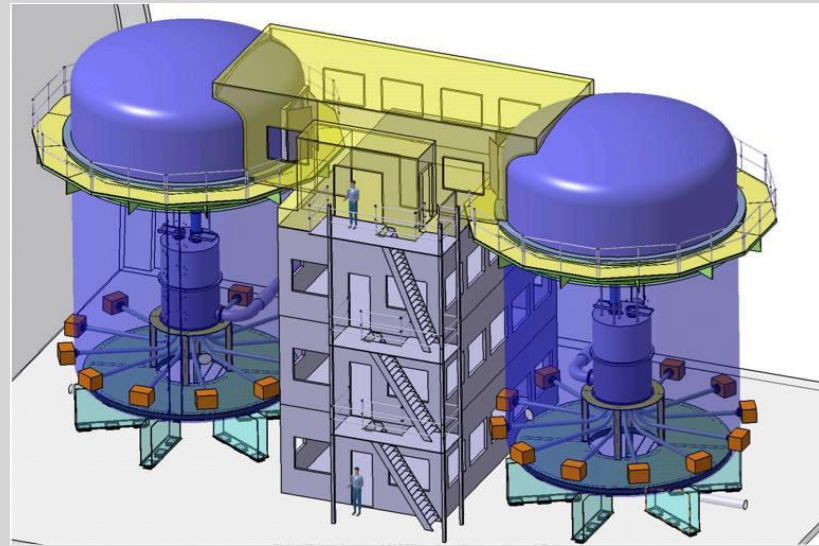
MELFI / ISS, Air Liquide





Couplage cycle de Brayton et détente Joule-Thompson

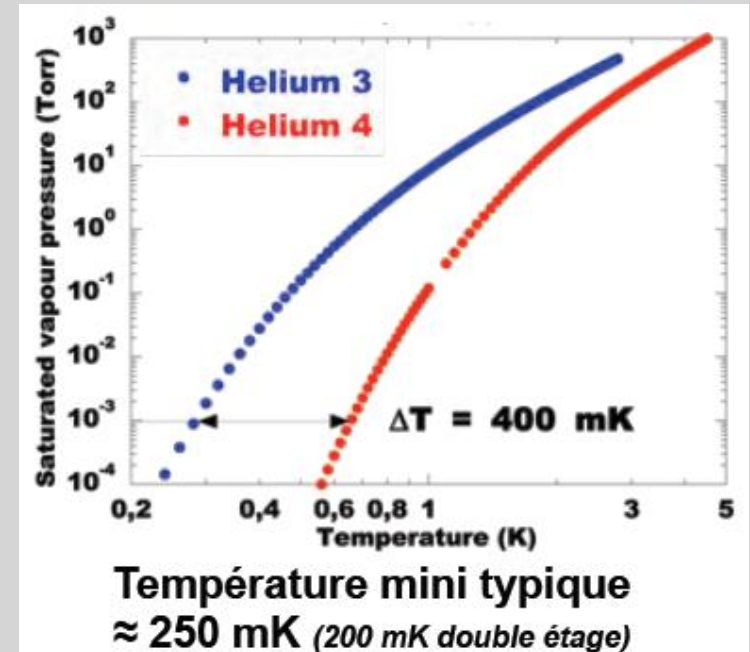
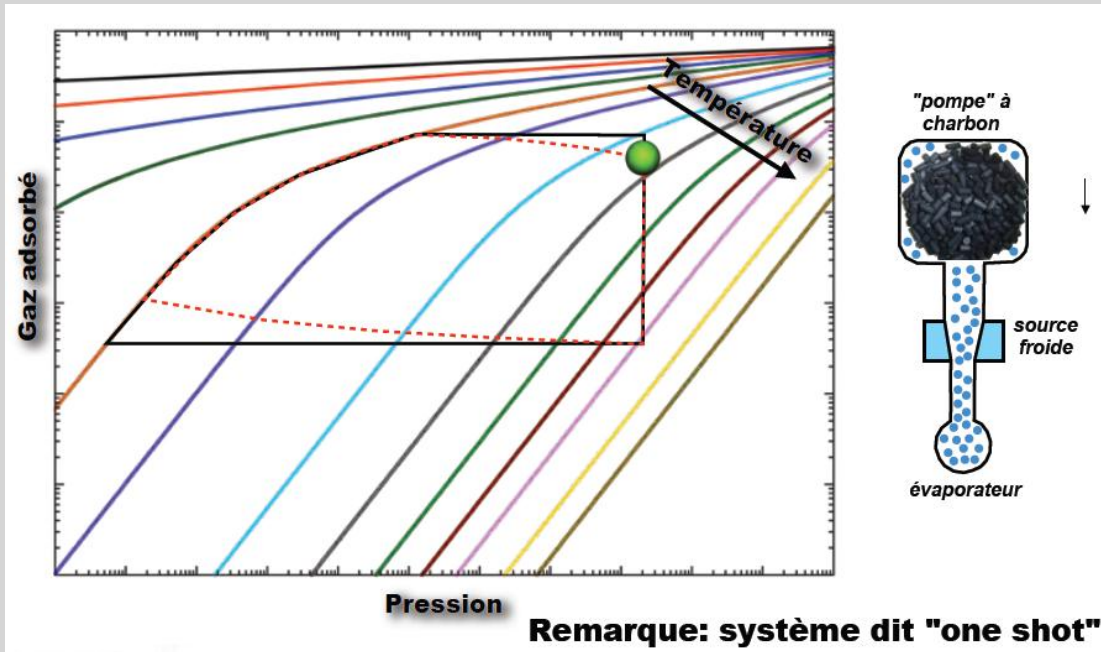
Expérience EURECA 1T @ 10 mK



Les très basses températures

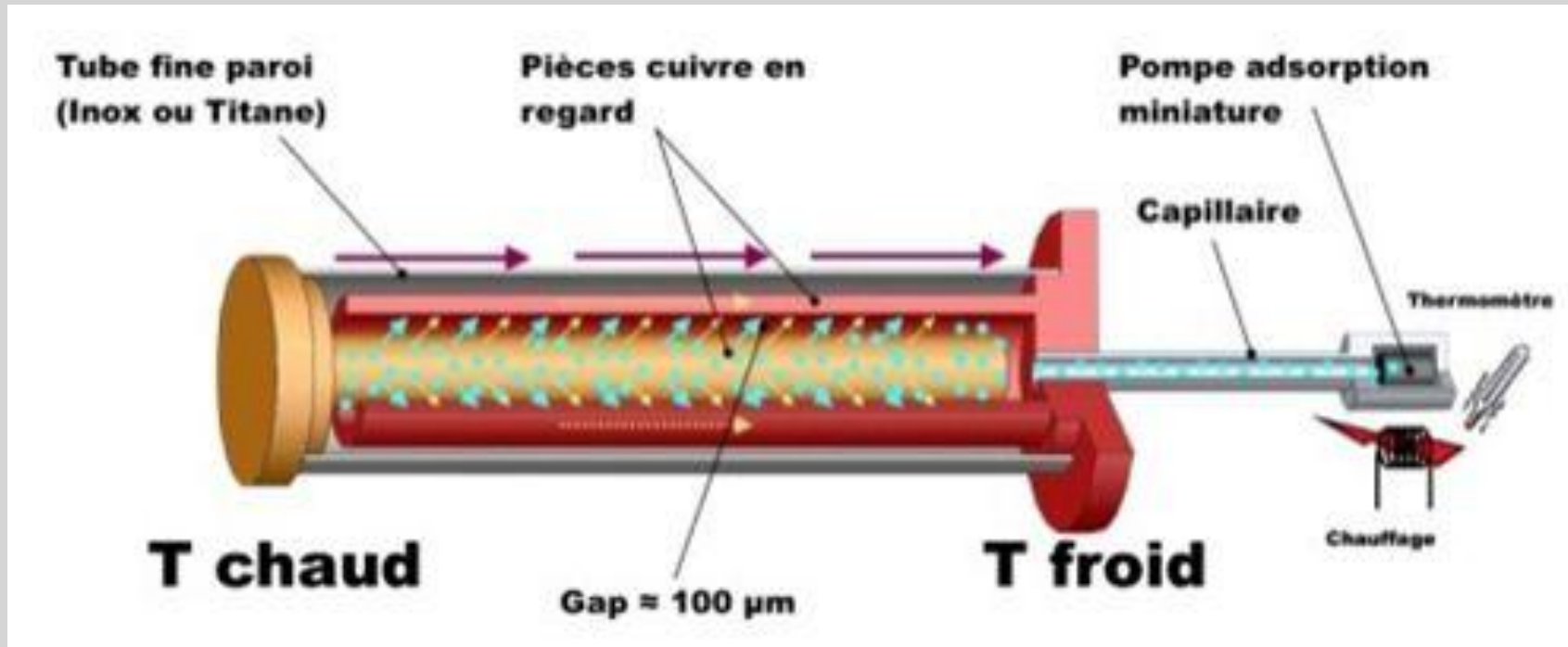
- Cryostat à adsorption de ^3He
- Cryostat à dilution
- Désaimantation adiabatique

Réfrigérateur à adsorption

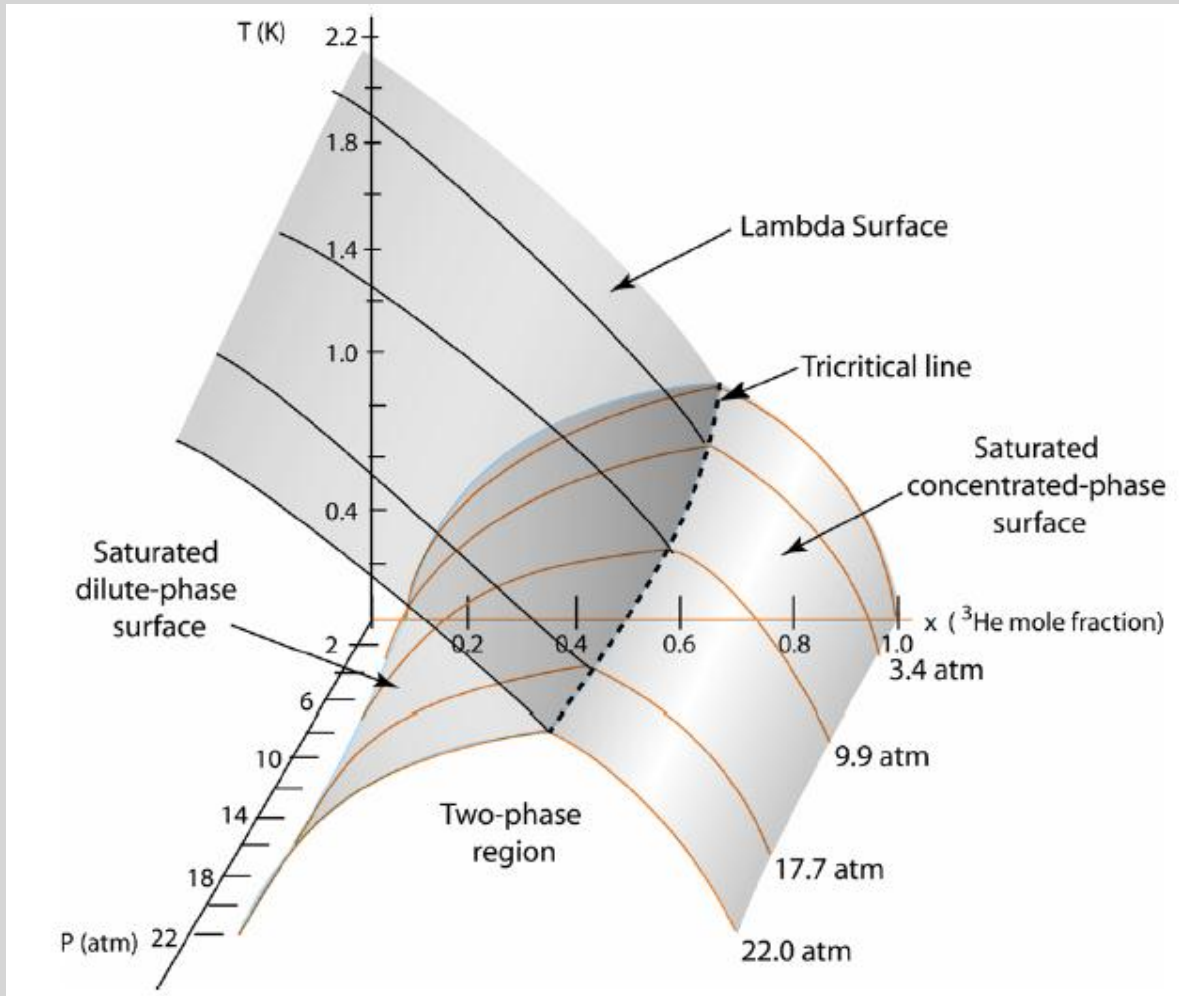


- ✓ Pour les TBT : système à ^4He ou ^3He liquide
- ✓ Besoin température $\sim 1.5\text{K}$ pour liquéfaction du ^3He
- ✓ Nécessité de cycler le système
- ✓ Version 'spatiale' pour contenir la phase liquide

Interrupteur thermique à gaz



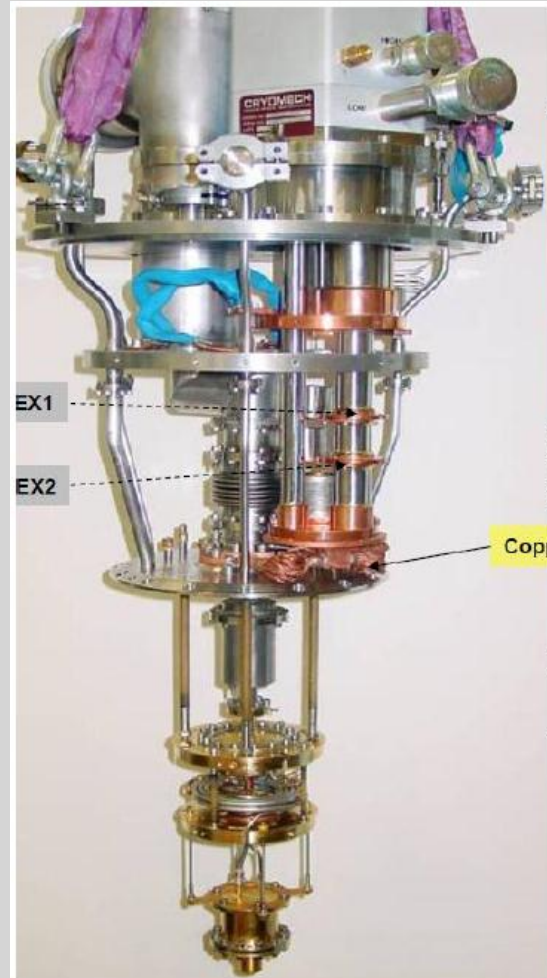
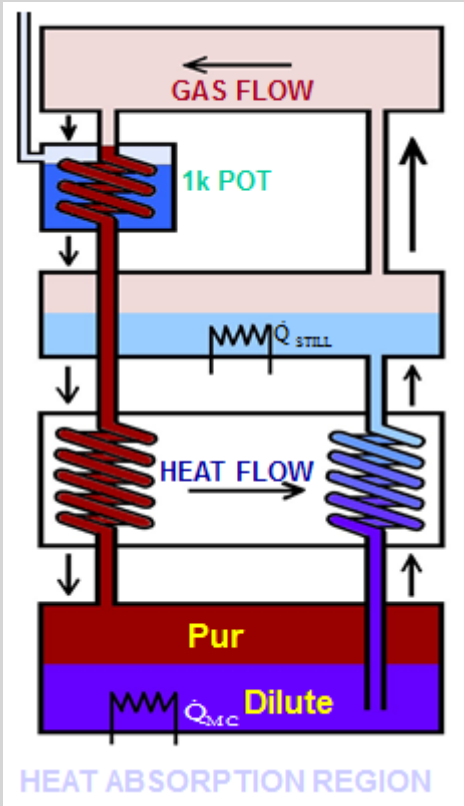
Cryostat à dilution



- Séparation des phases en dessous de 0.67K
- Phase superfluide

Chaudhry & Brisson, JLTP (2009), 155:235-289

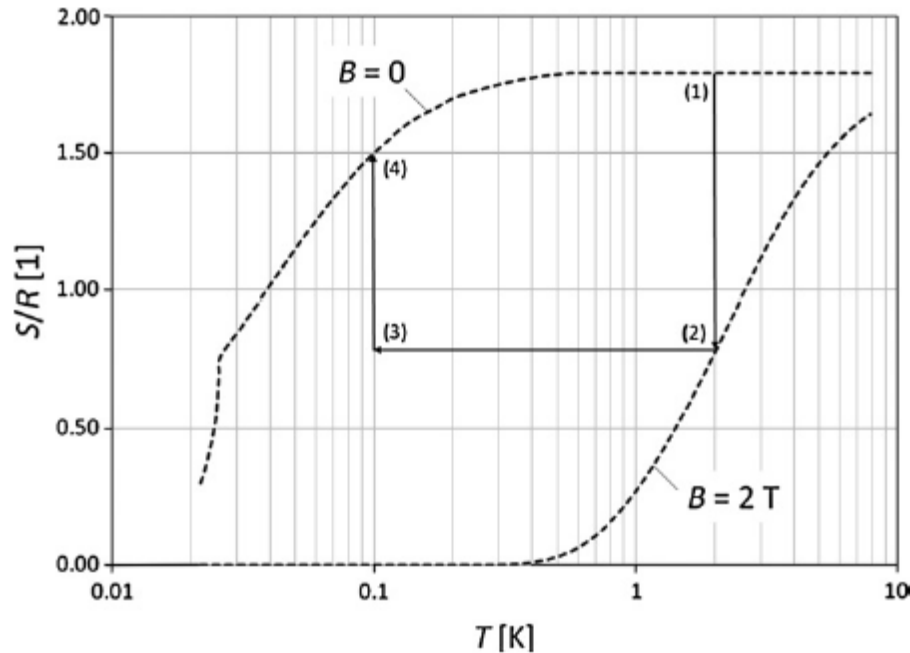
Cryostat à dilution



- ✓ Large gamme de puissances possibles (1 μ W-1mW @ 100mK)
- ✓ Fonctionnement continu et sans champ magnétique
- ✓ Nombreuses variantes possibles...
- ✓ Disponibles commercialement

Dilution cryogen-free (T.Prouvé)

Désaimantation adiabatique



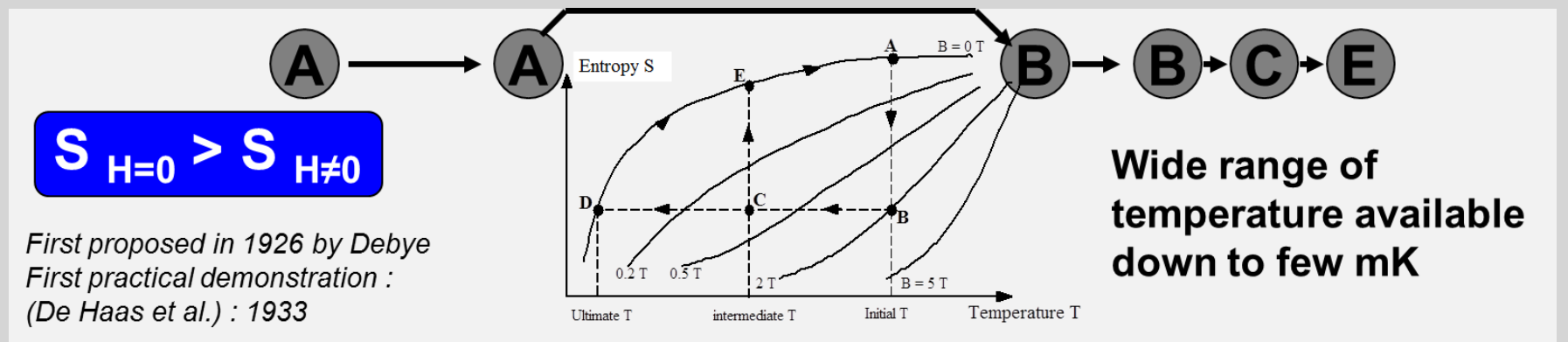
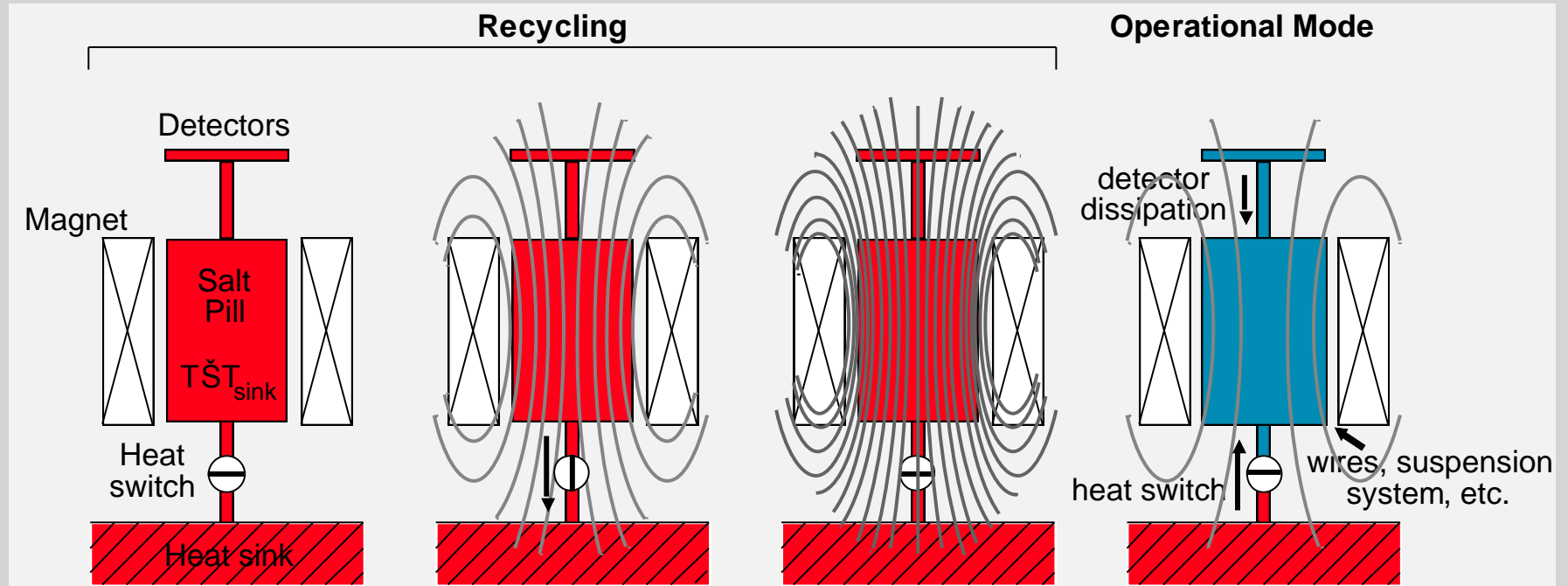
- L'entropie d'un sel paramagnétique dépend du champ magnétique
- Possibilité de réaliser un cycle de Carnot parfait !

Salt	Chemical composition	J [1]	g [1]	T_o (mK)	n [1]	M (g/mol)	ρ (g/cm ³)	$S(0, T)$ [Refs.]	Data T_{min} (mK)
CCA	CrCs (SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	3/2	2	10	1	593.2	2.06	[7]	50
CMN	Ce ₂ Mg ₃ · (NO ₃) ₁₂ · 24H ₂ O	1/2	2	1.5	2	1529.6	2.1	[8]	0.6
CPA	CrK (SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	3/2	2	9	1	499.4	1.83	[9]	17
DGG	Dy ₃ Ga ₅ O ₁₂	15/2 ^a	8	373	3	1028.1	7.3	[11,12]	37
FAA	Fe (SO ₄) ₂ NH ₄ · 12H ₂ O	5/2	2	26	1	482.2	1.71	[9]	22
GGG	Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	7/2	2	380	3	1012.3	7.08	[13]	200
GLF	GdLiF ₄	7/2	2	480	1	240.2	5.34	[14]	500
MAS	Mn (SO ₄) ₂ (NH ₄) ₂ · 6H ₂ O	5/2	2	170	1	391.2	1.81	[9]	95

$$S = R \cdot \left\{ x \cdot (\coth(x) - y \cdot \coth(x \cdot y)) + \ln \left(\frac{\sinh(x \cdot y)}{\sinh(x)} \right) \right\}$$

$$x = \frac{\mu_B g B}{2k_B T} \quad y = 2J + 1$$

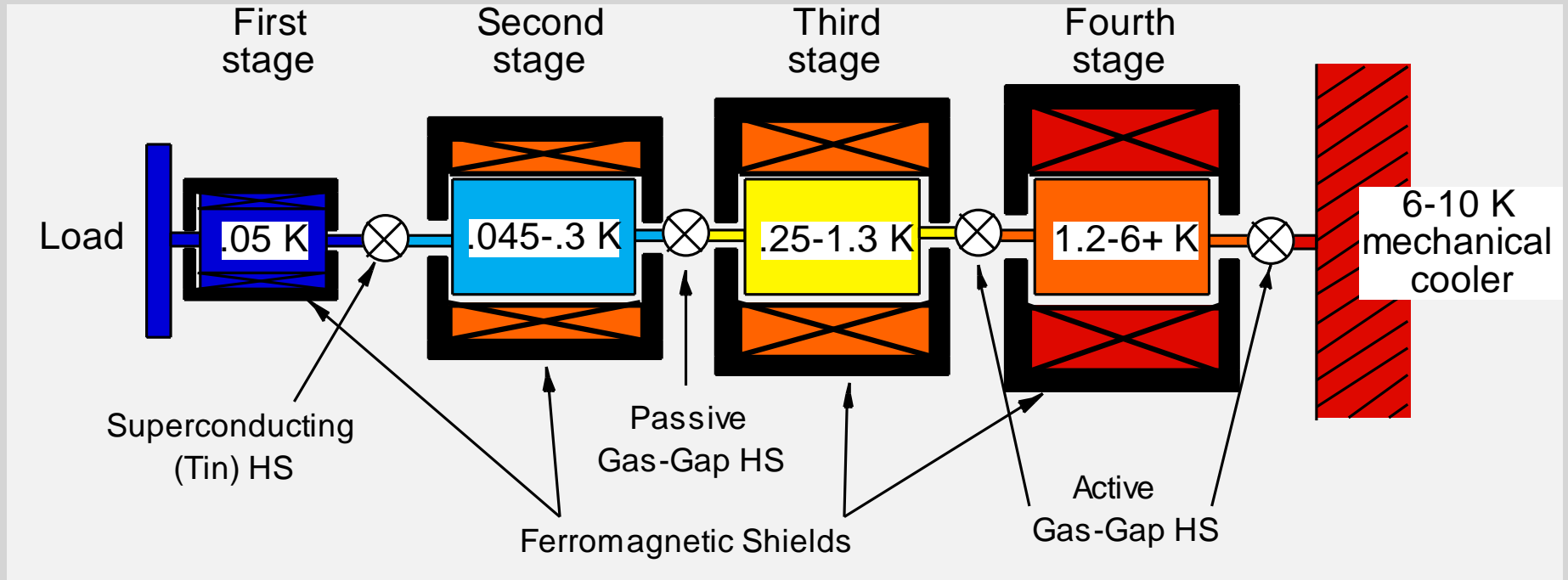
P. Wikus et al., Cryogenics 51 (2011)



$$S_{H=0} > S_{H \neq 0}$$

First proposed in 1926 by Debye
 First practical demonstration :
 (De Haas et al.) : 1933

Désaimantation continue (KIPCOOL)

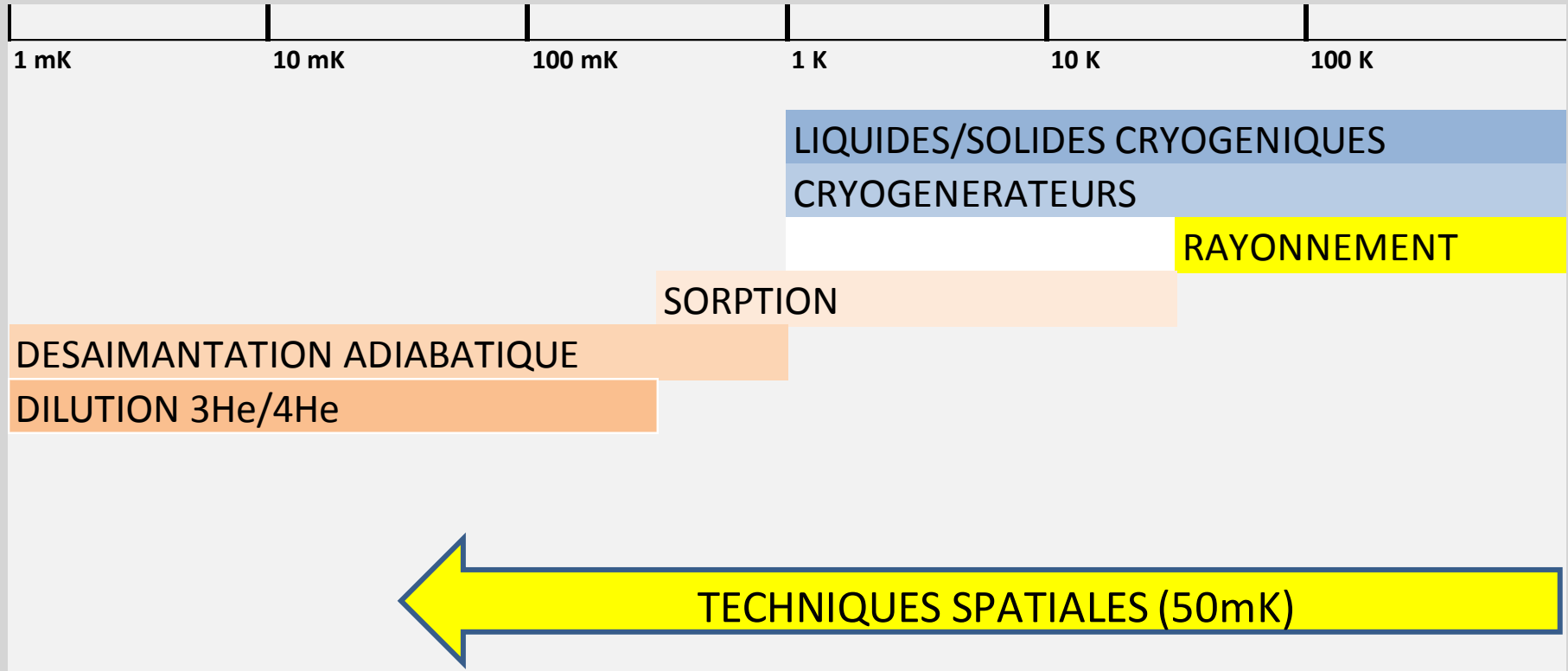


- Combinaison de plusieurs étages
- Régulation du dernier sel pour maintenir une température constante ($1 \mu\text{W}$ @ 50 mK)

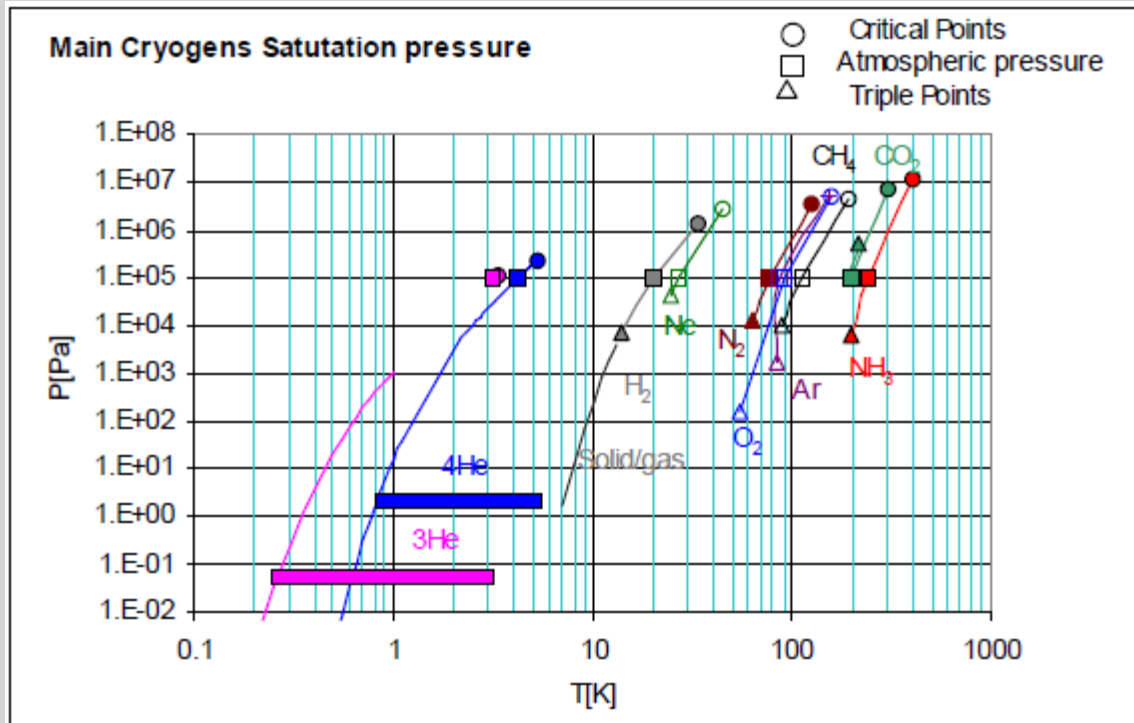
Particularités de l'environnement spatial

- Utilisation de l'environnement radiatif
- Ressources énergétiques limitées
- Redondance
- Test au sol

Chaines cryogéniques

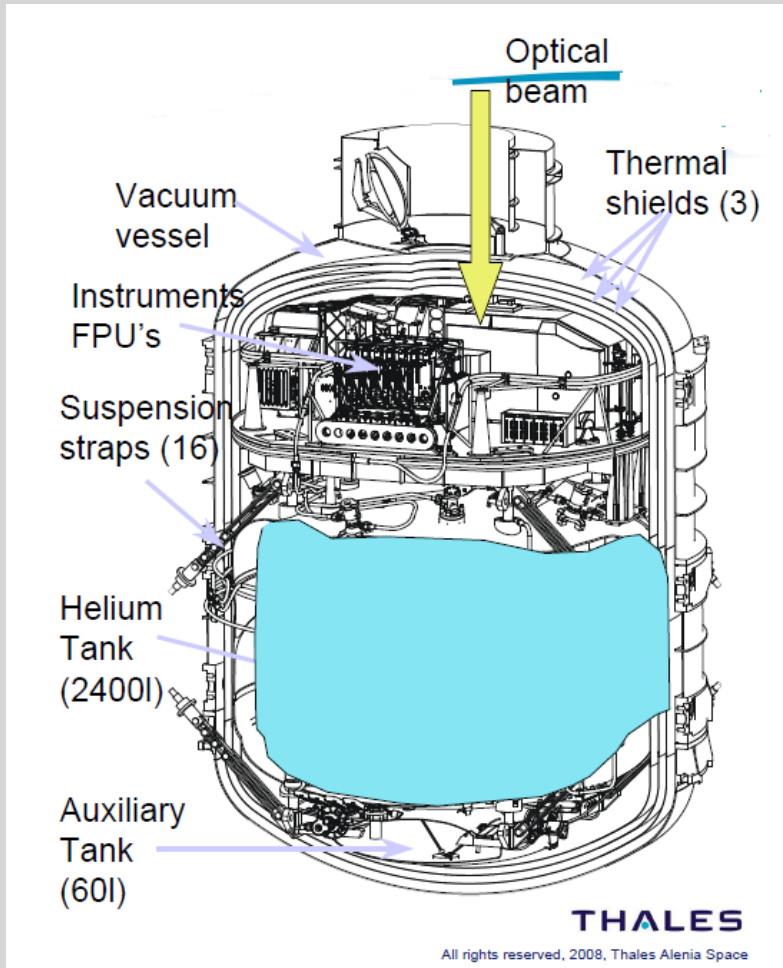


Cryogènes



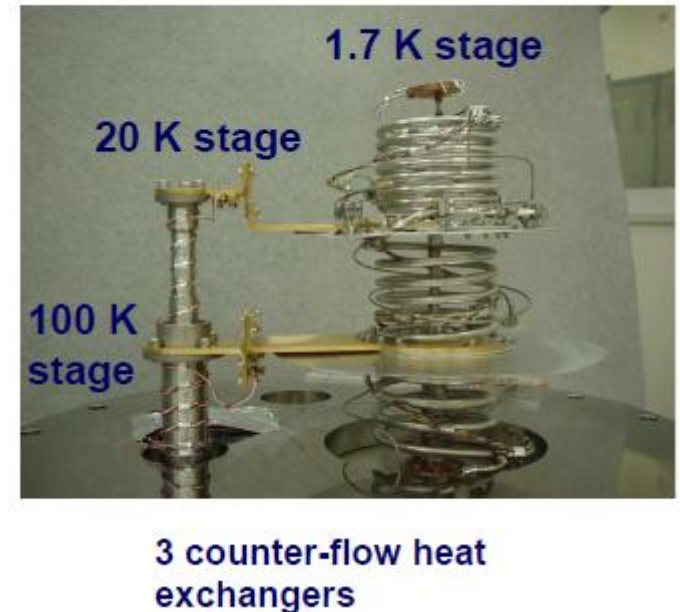
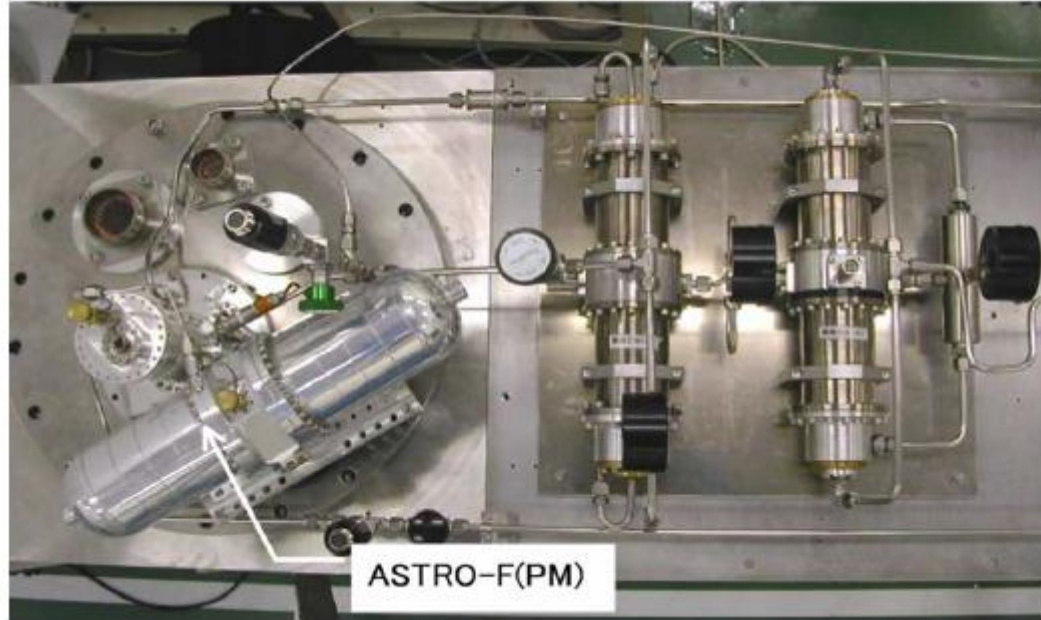
- Utilisation chaleur latente + vapeurs froides
- C'est un stockage d'énergie

- Possibilité d'utiliser plusieurs types de cryogènes pour réduire masse/volume
- Autonomie de plusieurs années réalisable



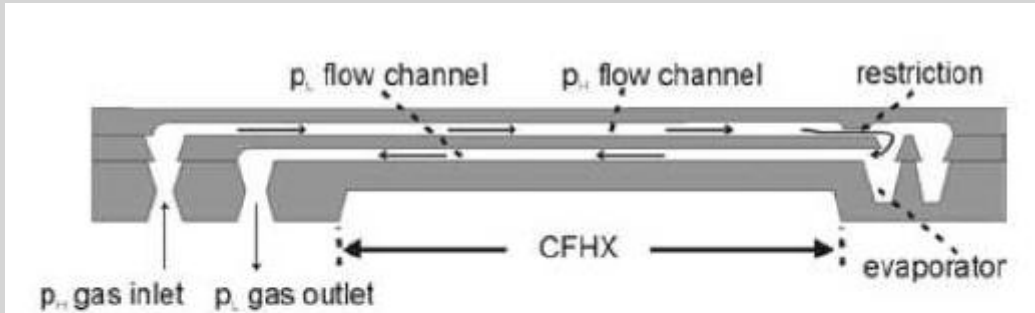
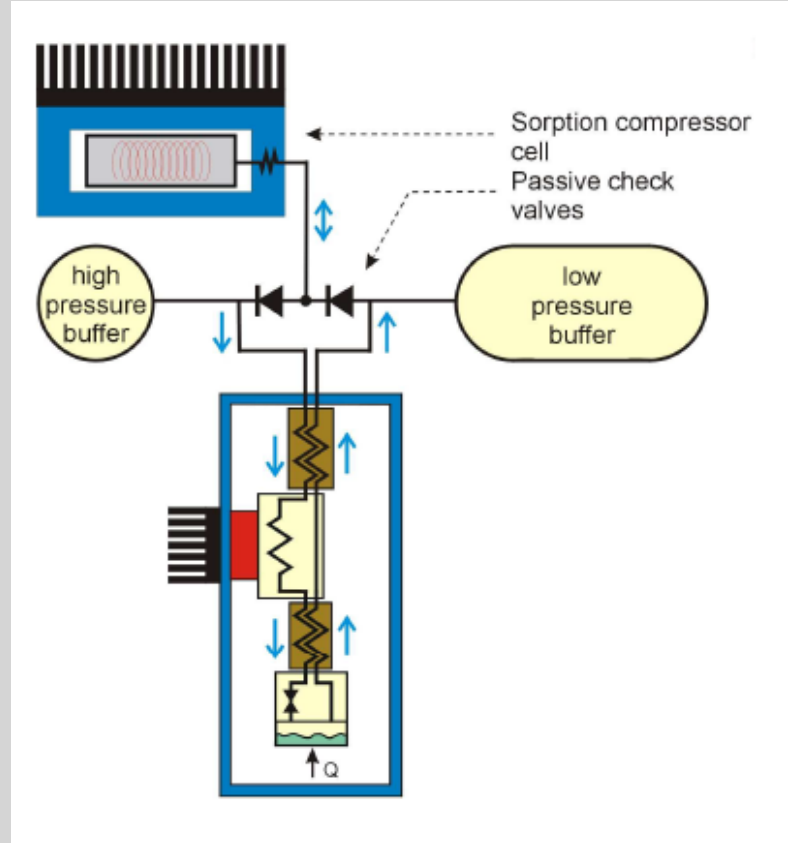
- ✓ Gestion de la cryogénie au sol
- ✓ Fonctionnement en apesanteur
- ✓ Pour les expériences au sol, nécessite une gestion de l'approvisionnement des cryogènes
- ✓ La tendance est de les remplacer par des cryogénérateurs...

Exemple chaine cryogenique SPICA



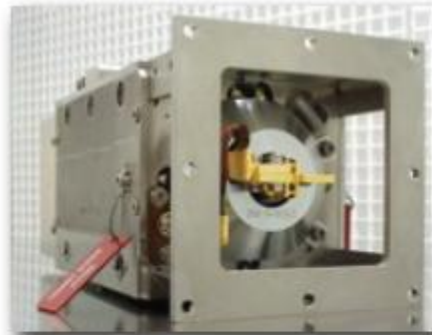
- ✓ Démonstrateur JT-³He pour la mission SPICA
- ✓ Compresseur linéaire 4 étages
- ✓ Couplage avec machine Stirling (20K)

Université de Twente, échangeur micro-usiné, Compresseur thermique à adsorption Démonstrateur pour Darwin



cooling power	10 mW @ 4.5 K
passive precooling at L2	< 4 W @ 50 K
exported vibrations	< 1 $\mu\text{N}/\sqrt{\text{Hz}}$
lifetime	> 5 years

TBT : adsorption 3He



- 10 μW @ 290 mK
- Autonomie \approx 2 jours
- Durée de vie: "illimitée"
- Aucune vibration

**2 systèmes à bord
de HERSCHEL**



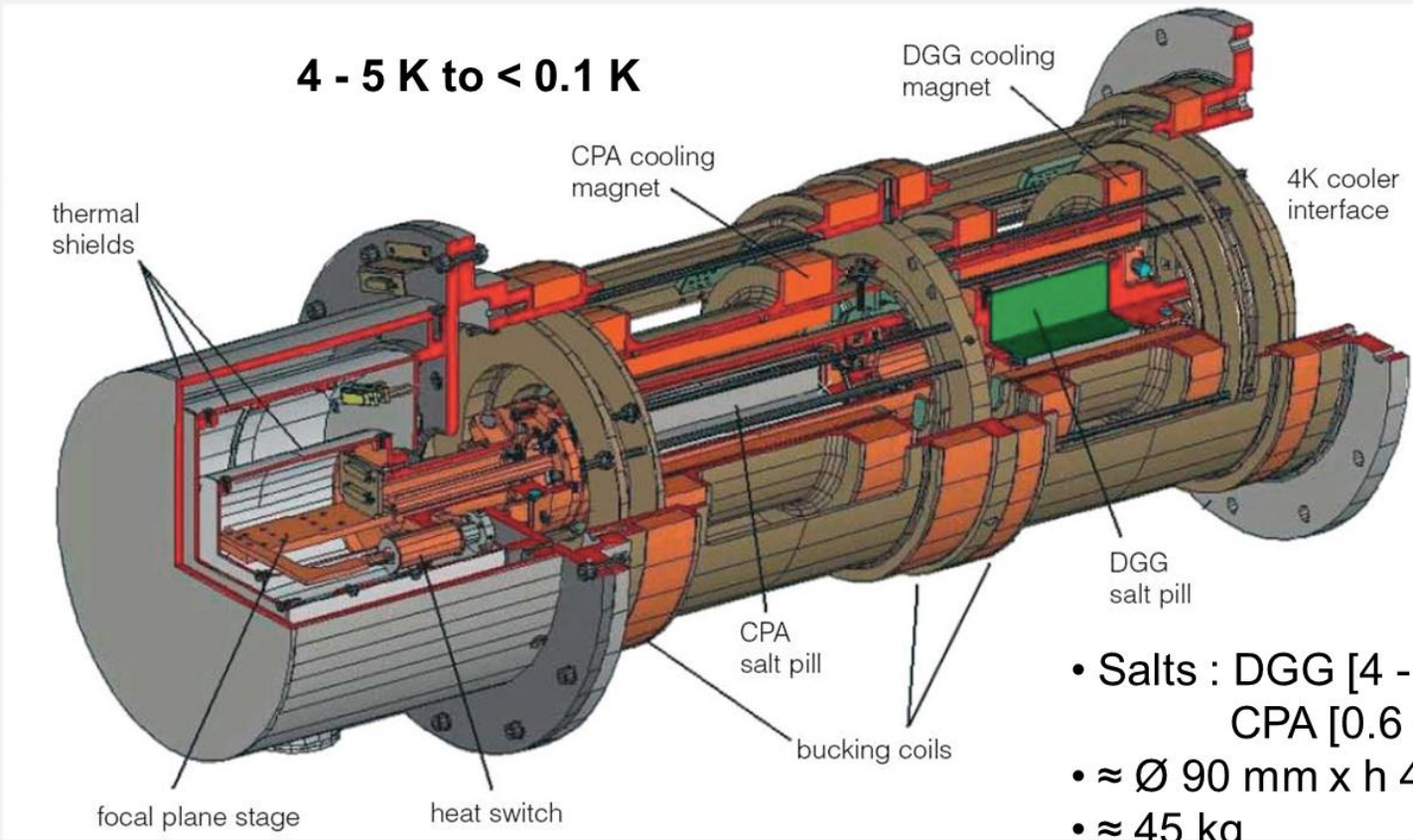
Inter thermique à gaz d'échange

Evaporateur



Pompe à adsorption

TBT : Désaimantation

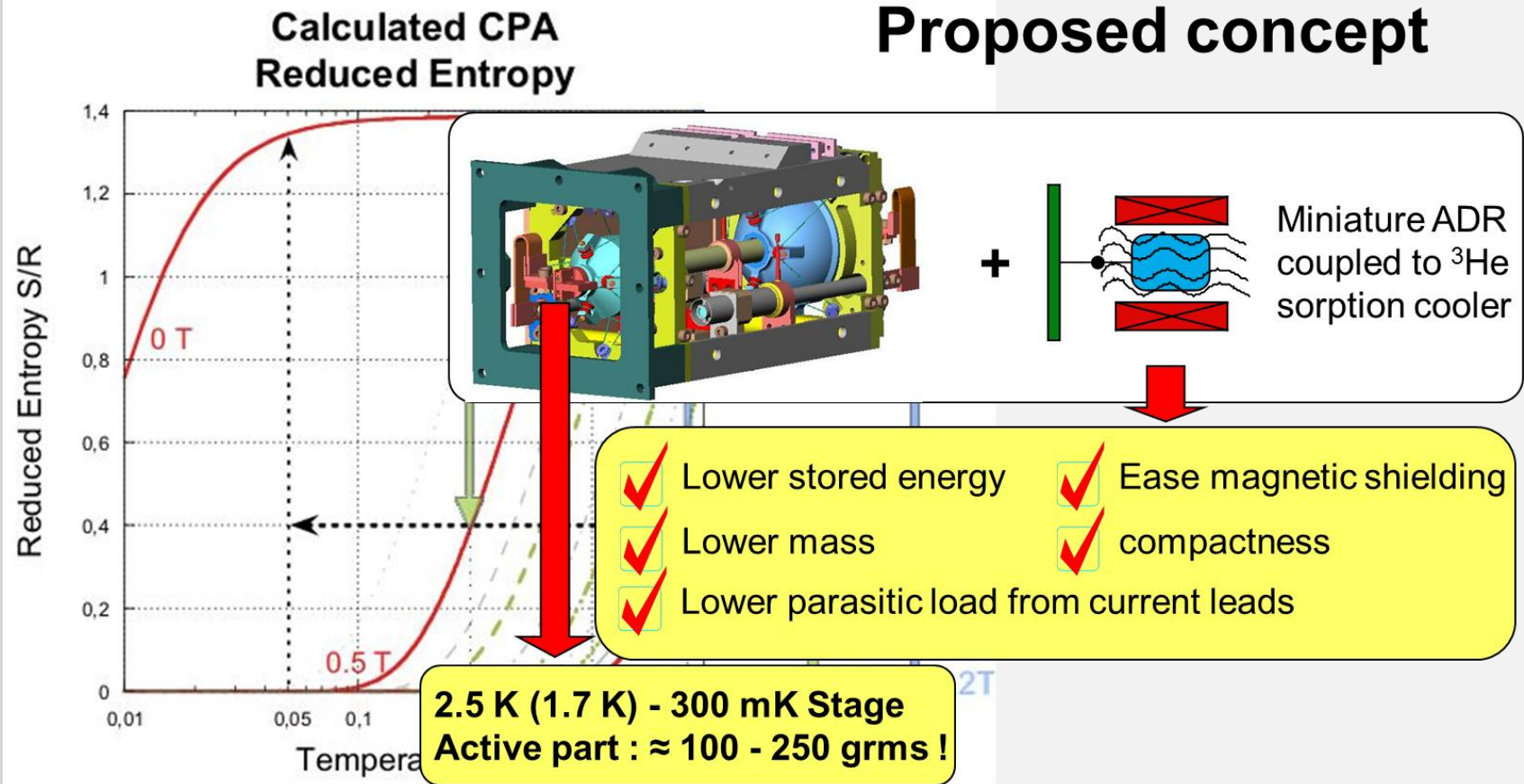


- Salts : DGG [4 - 0.6K] + CPA [0.6 - <0.1]
- ≈ Ø 90 mm x h 440 mm
- ≈ 45 kg
- ≈ 3 Tesla
- Operating T ≈ 0.1 K or less (target : 30 mK)

(courtesy of Ian Hepburn)

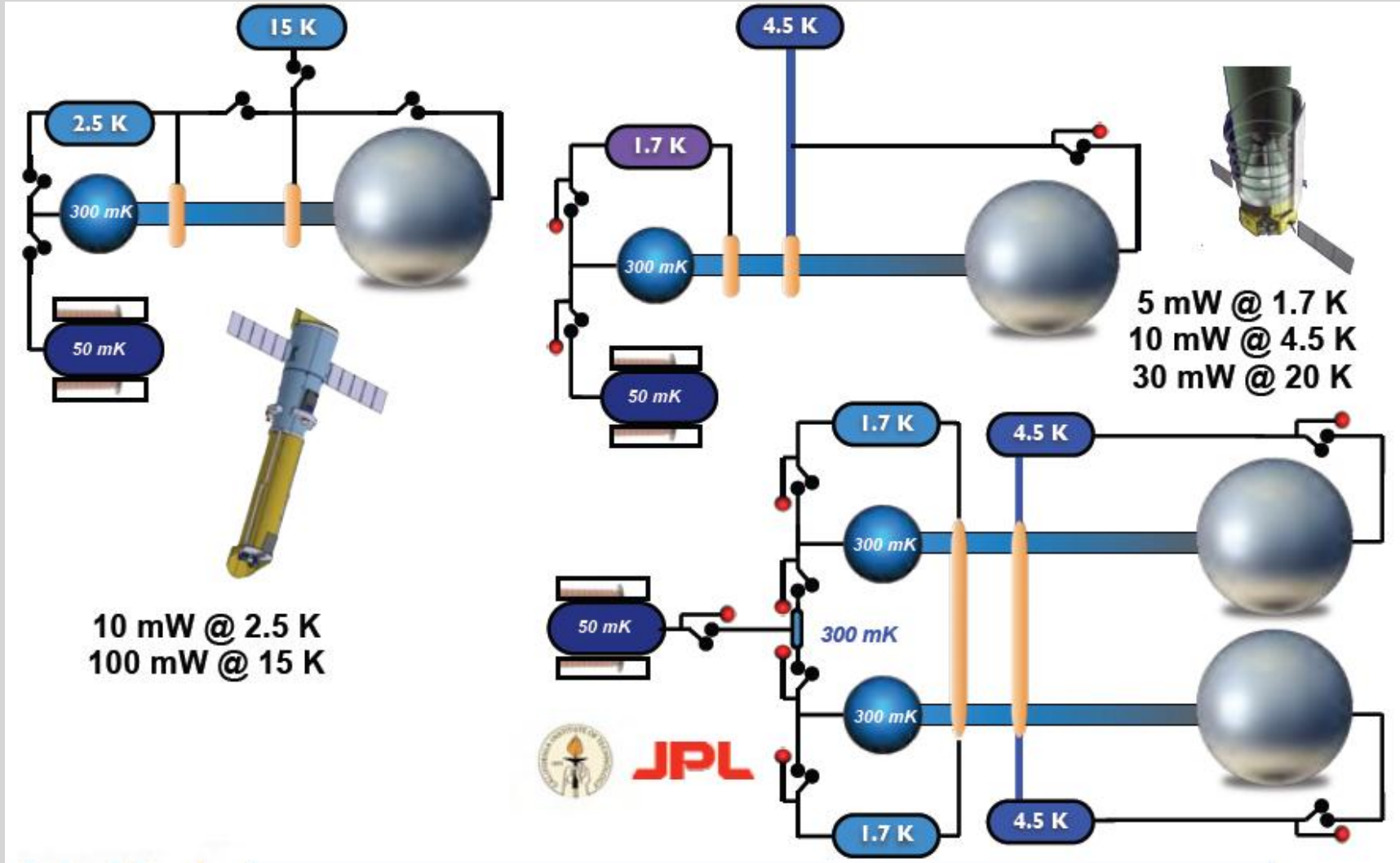
TBT : Couplage ADR + ³He

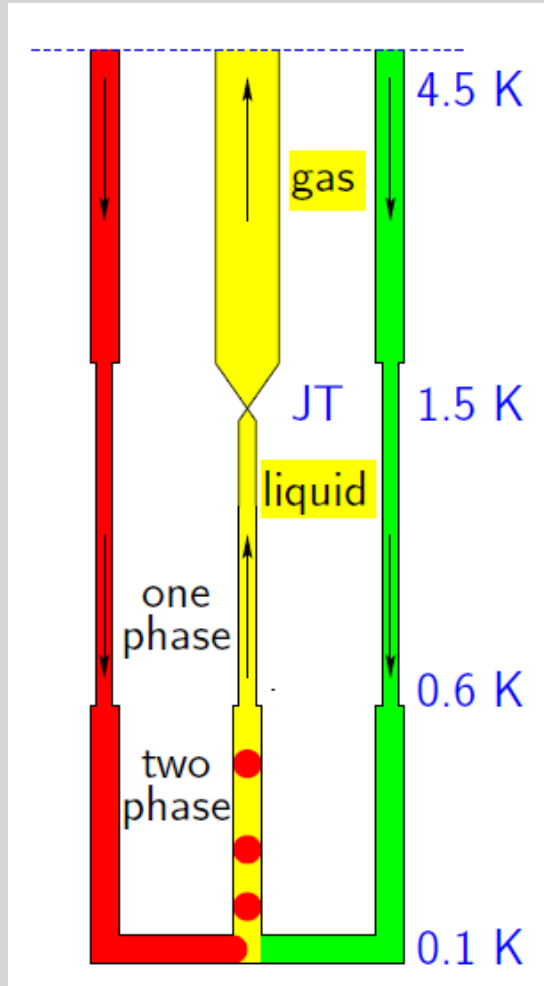
CPA entropy diagram (Chrome-Potassium-Alun)



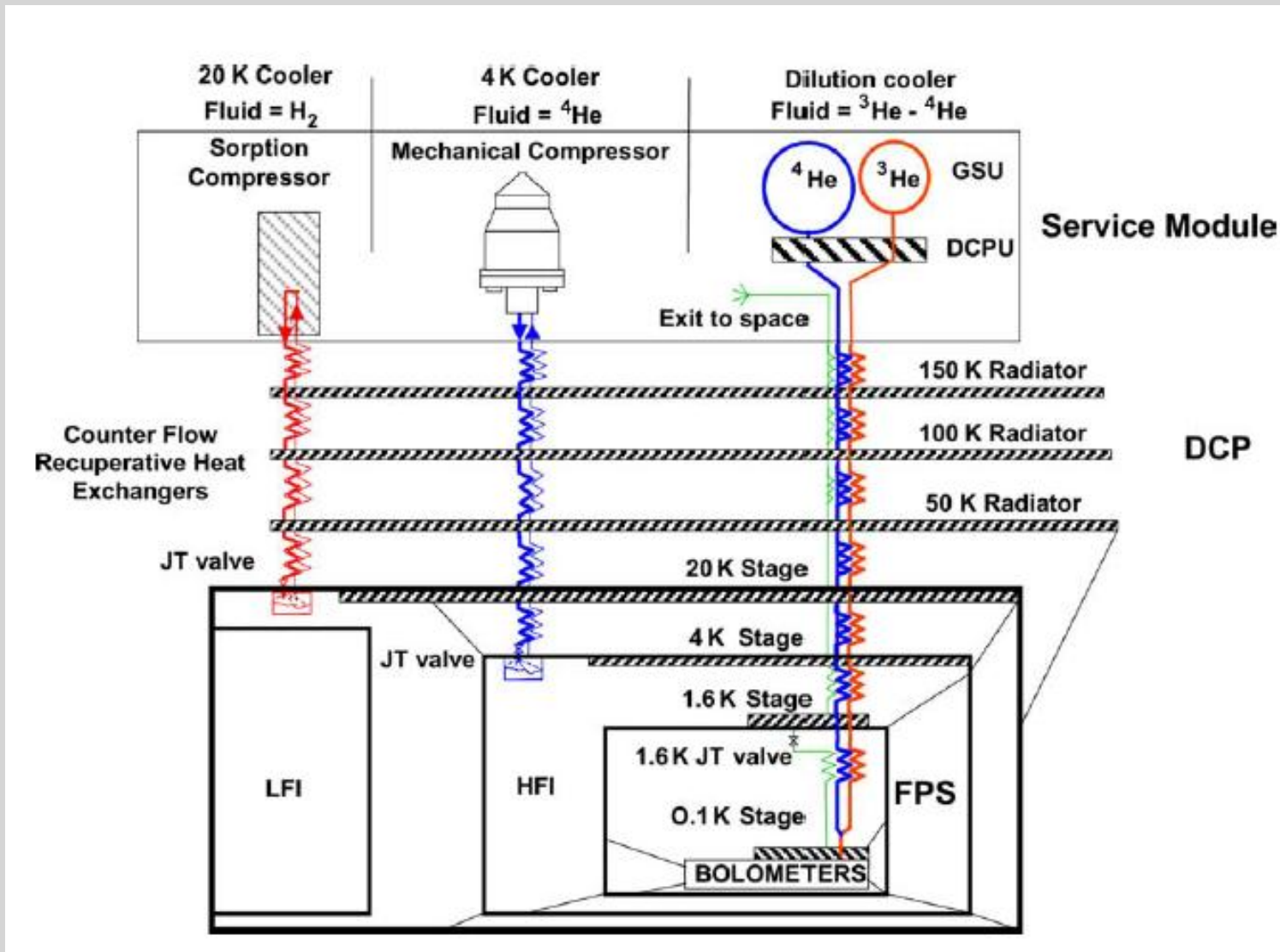
TRP ESA / SPICA, N. Luchier et al., Cryogenics (2010)

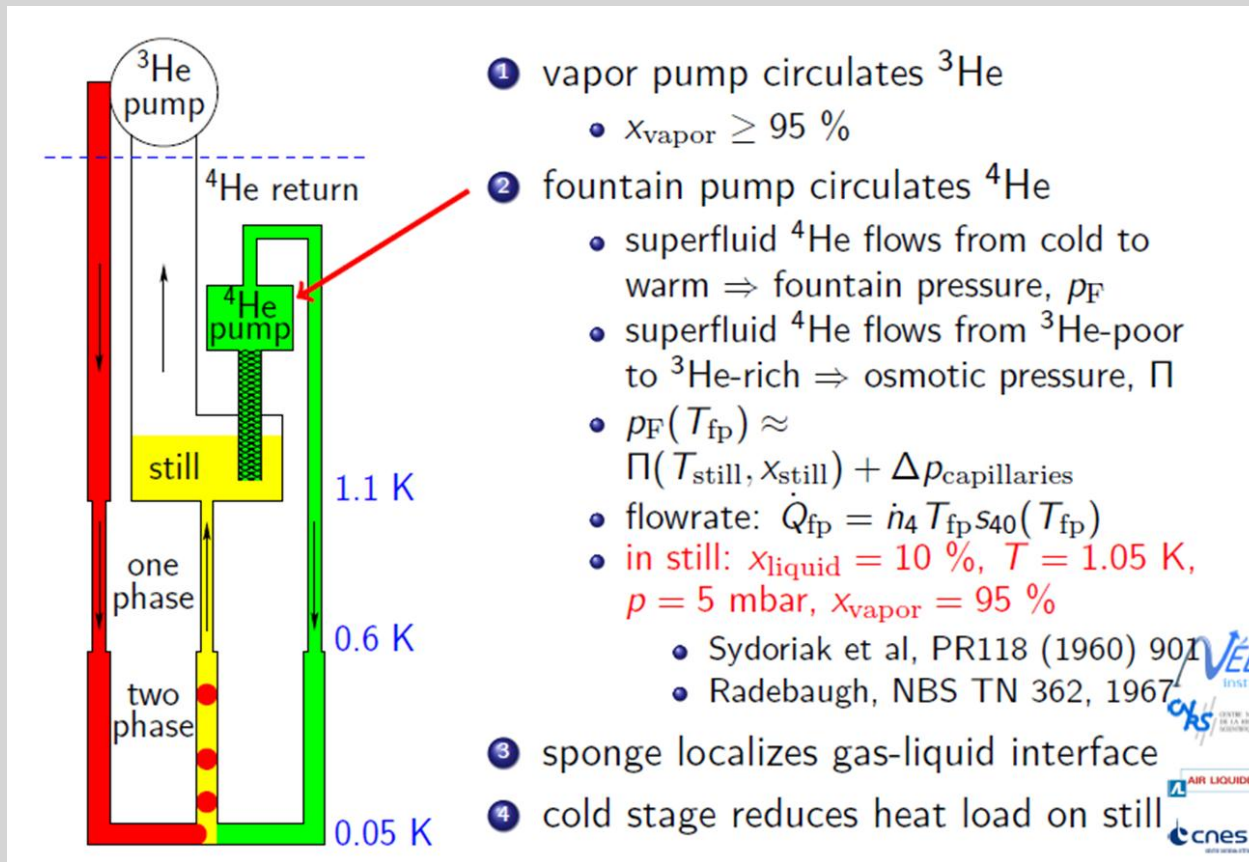
TBT : Couplage ADR + ³He





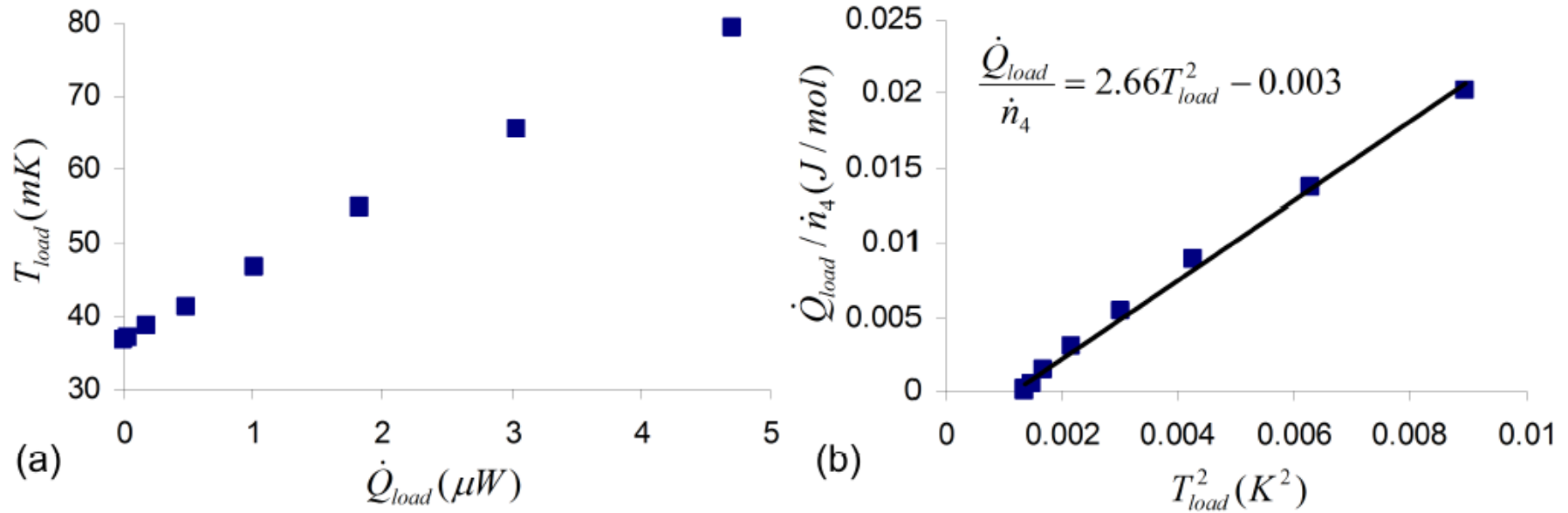
Refroidisseur en cycle ouvert de Planck



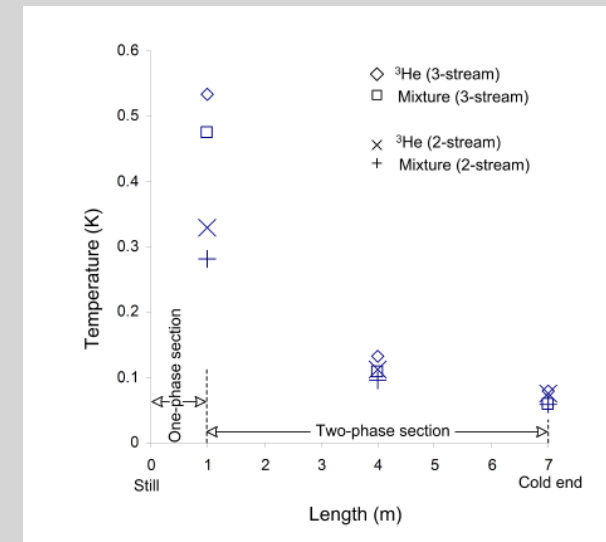


Le cycle fermé CCDR (R&T Cnes + ITI ESA)

- ✓ Performances démontrées : $1 \mu\text{W}@50\text{mK}$
- ✓ Démonstration de l'insensibilité à la gravité
- ✓ Plusieurs options pour la pompe...



Puissance froide mesurée $1 \mu W$ @ 45 mK
avec $400 \mu mol/s$ 4He



Chaundhry et al, Cryogenics (2012)

Conclusions

- Un aperçu des cryo-machines disponibles
- Elles continuent à bénéficier des efforts de développement pour améliorer les performances et la fiabilité
- Le domaine 1K-4K reste difficile d'accès en laboratoire même si des démonstrateurs existent (JT3He, PT3He), Stirling superfluide, ADR
- Dans le domaine spatial, des chaînes complètes jusqu'à 1.7K sont acquises (?)

- Le domaine spatiale est un moteur pour des machines miniatures et performantes (PT haute fréquences...)
- Turbo Brayton à surveiller (performances, souplesse)
- Il existe d'autres approches : effet peltier, thermoacoustique,...
- Pour les basses températures, les désaimantations adiabatiques sont appelées à un nouvel essor (pénurie ^3He , recherche PAC magnétiques)

Références

- Revues Cryogenics, JLTP
- Cryogénie : ses applications en supraconductivité, Institut International du Froid, Techniques de l'ingénieur Edt. (1995) ISBN 2 903 63377 0
- S.W.Van Sciver, Helium Cryogenics, Plenum Press (1986)
- Handbook of Cryogenic Engineering, J.G. Weisend Edt
- A.T.A.M. de Waele, Basic Operation of Cryocoolers and Related Thermal Machines, JLPT (2011) 164:179-236