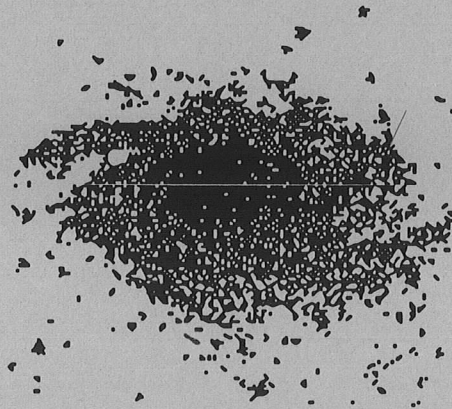


Machines cryogéniques

A. Ravex



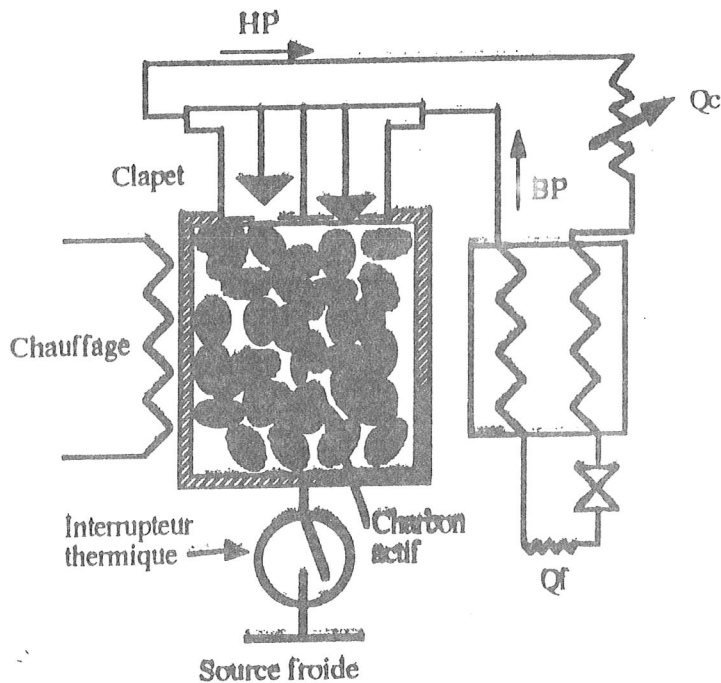
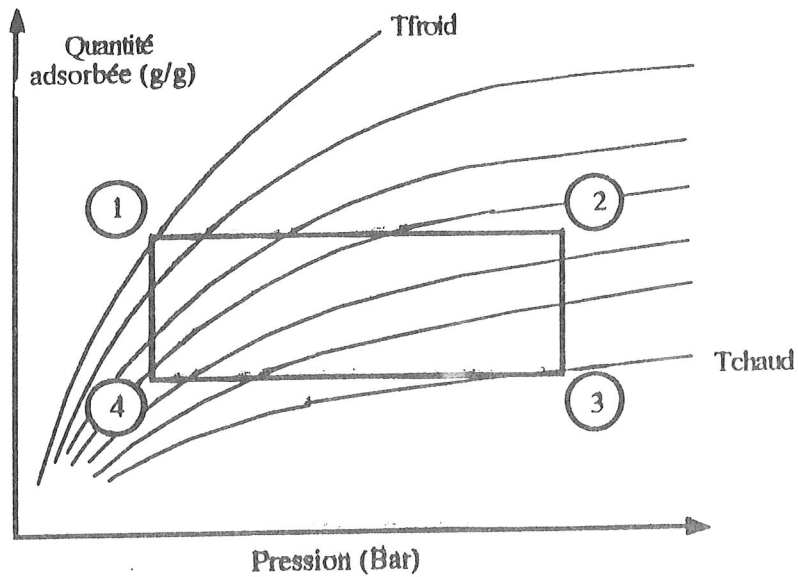
DRTBT 1992 - 17.

Machines cyodéniques

A. Beyer

DRIT 1005 - 17

• Compresseur thermique à adsorption / désorption pour cycle de Joule Thomson



Intérêt:

- pas de pièce mobile (ni à chaud, ni à froid)
- adapté aux faibles puissances

Inconvénients:

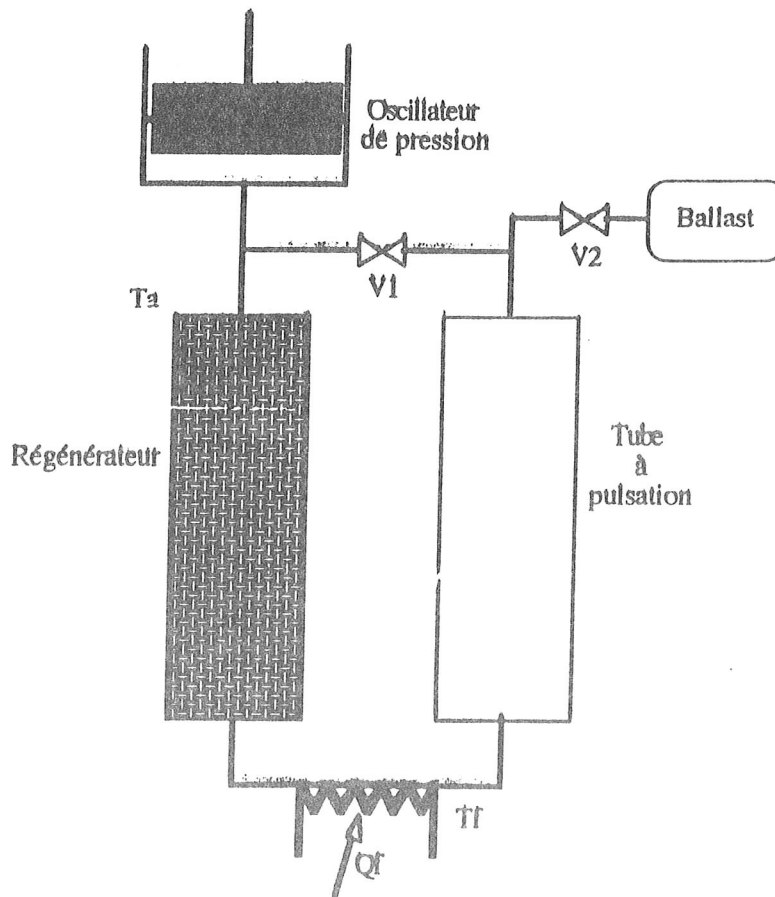
- température de désorption (500/700 K)
- efficacité

Développements en cours pour le spatial:

- USA (Jet Propulsion Lab., Aerojet), FRANCE (CEA/SBT)

TECHNOLOGIES ALTERNATIVES EN COURS DE DEVELOPEMENT

• Réfrigérateur à tube pulsé



Intérêt:

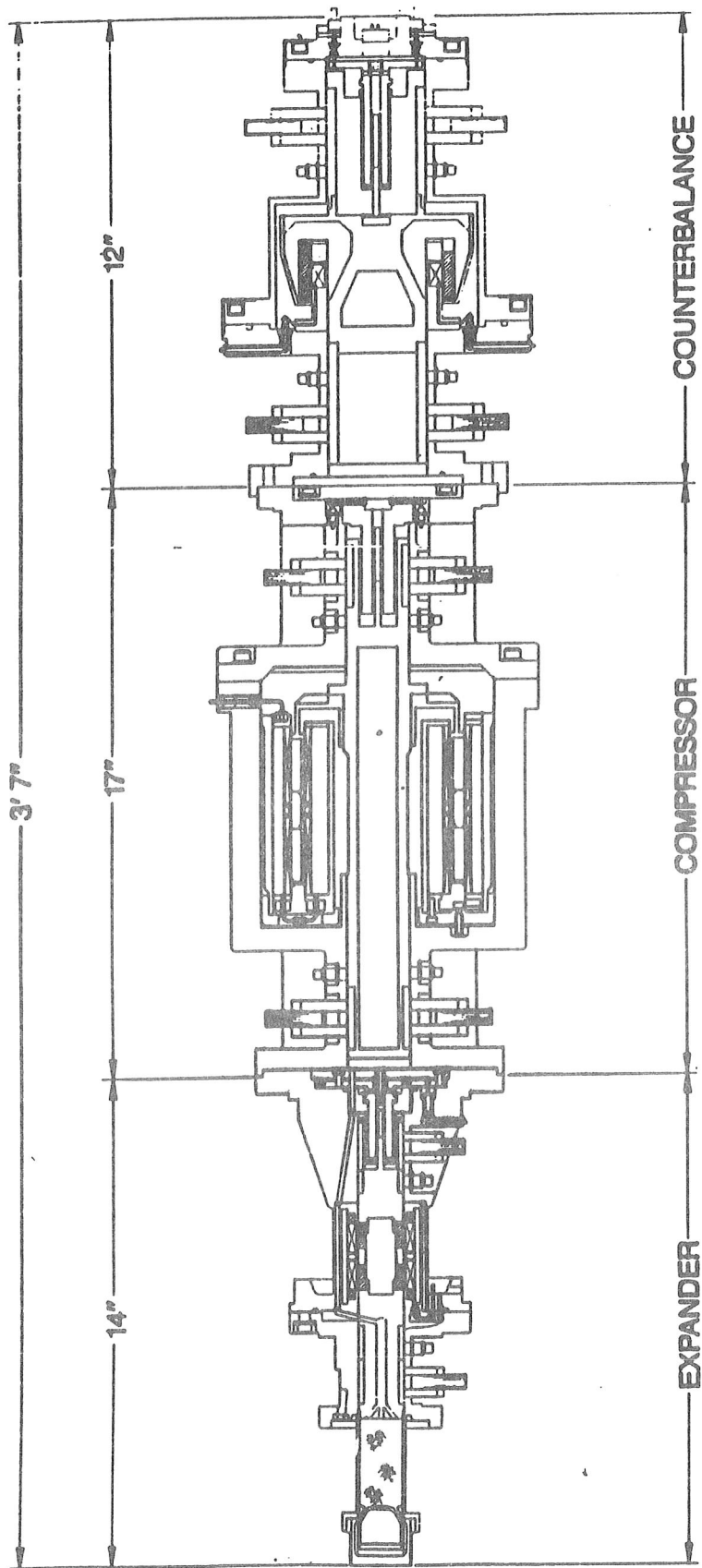
- pas de pièce mobile à froid \Rightarrow fiabilité
- reprend technologie oscillateur Stirling

Inconvénient:

- diminution efficacité par rapport au cycle de Stirling

Développements en cours pour le spatial:

- USA (TRW, ?), FRANCE (CEA/SBT)



Philips/NASA Stirling Refrigerator.

MACHINE STIRLING PHILIPS / USA

cadre:

- Contrats NASA
- Développements effectués par Philips Lab.

Spécifications (caractéristiques de la machine de développement)

- 5 Watts à 65 K
- Puissance électrique consommée:
 - moteurs: 160 Watts
 - électronique: 90 Watts
- Masse: 84 Kg (hors électronique)
- Fréquence de fonctionnement: 18 Hz
- Contraintes de lancement prises en compte: 3g en continu et 5.4g à 7 Hz

Choix technologiques:

- Paliers magnétiques actifs
- E'anchéité par jeu réduit
- Machine monobloc, mono étagée
- Equilibrage actif

Etat d'avancement:

- Début des développements: 1972
- Modèle de développement achevé en 1982, testé durant 5 ans
(38 000 heures de fonctionnement sans panne ni dégradation de performances)
- Modèle de vol prenant en compte les contraintes de lancement en 1988
tests en cours

80K SPLIT STIRLING CYCLE COOLER

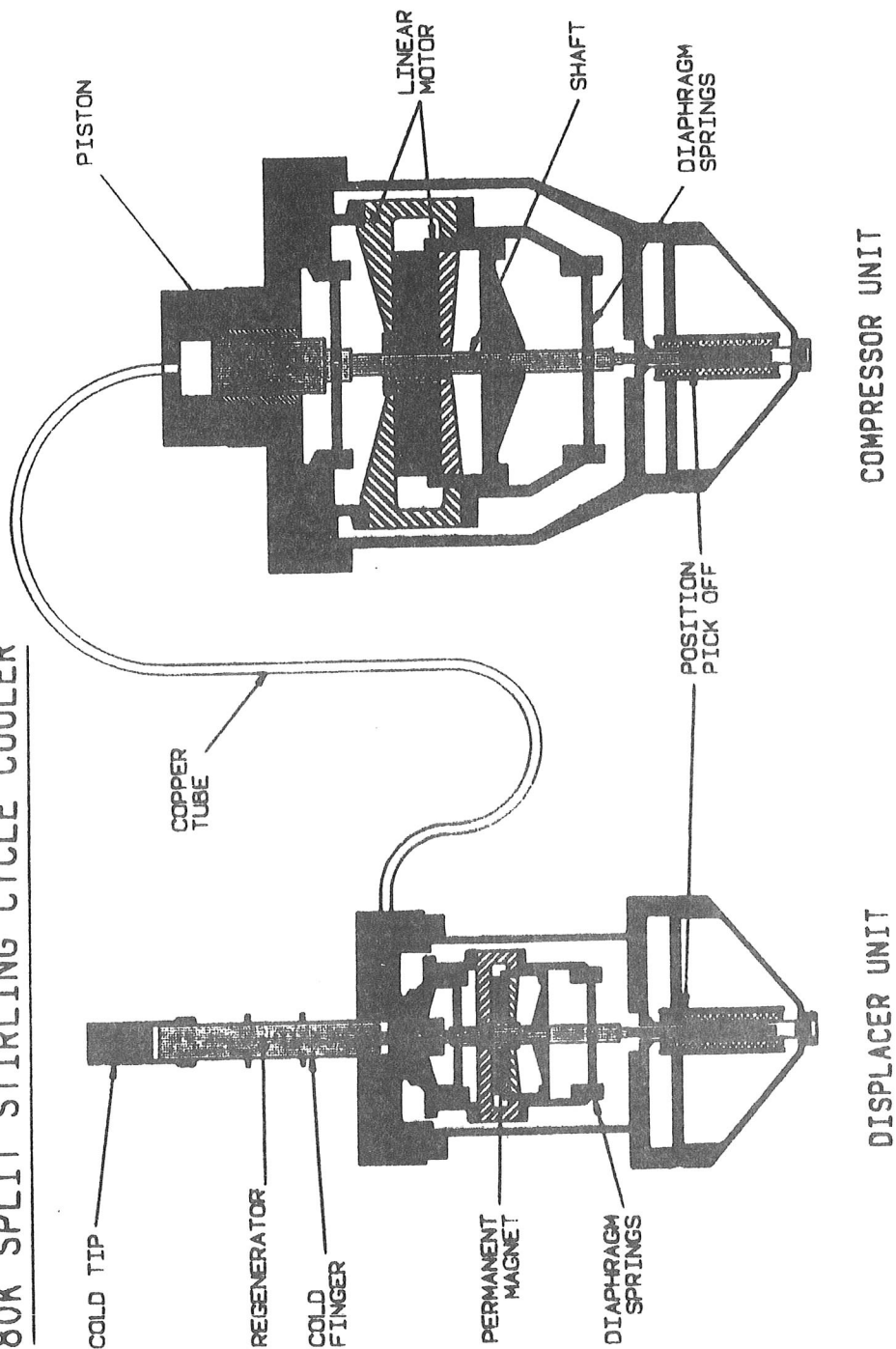


FIGURE 1-1 80K SPLIT STIRLING CYCLE COOLER SCHEMATIC

MACHINE STIRLING OXFORD/BAE

Cadre:

- Contrats ESA
- Développements effectués par OXFORD
Transfert de technologie → BAE (TRW aux USA)
- Industrialisation également par LUCAS associé à LOCKHEED
- Développements aux USA par CREARE sur concept voisin

Spécifications:

- 800 mW à 80 K
- Puissance totale consommée: 35 Watts
- Masse totale (compresseur + doigt froid + électronique): 8.5 Kg
- Fréquence nominale: 40 Hz

Choix technologiques:

- Paliers à membranes métalliques déformables
(concept mis au point par RAL/Oxford en 1970)
- Etanchéité par jeu réduit
- Machine splittée, mono étagée
- Compresseur monocylindre → nécessité d'utiliser deux machines pour équilibrage

Etat d'avancement:

- Prototypes ont cumulé plusieurs dizaines de milliers d'heures de fonctionnement
- Tests de qualifications (vibrations, EMI, etc... en cours /ESA, USA)
- Lancement en Septembre 1991 (Upper Atmosphere Research Spacecraft)

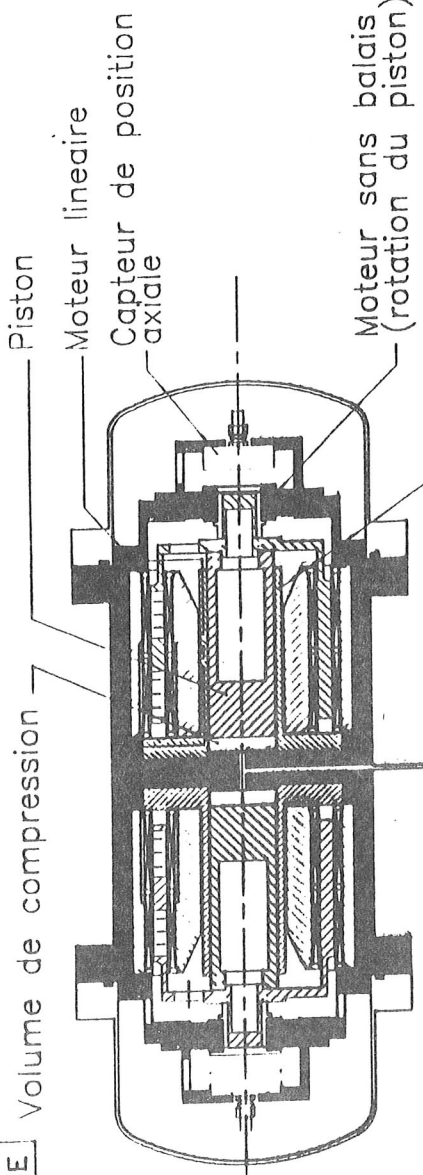
Développements en cours:

- Asservissement de phase et de courant d'alimentation des moteurs linéaires pour réduire les vibrations induites
- Machine bi étagée: (60 mW à 20 K, 100 Watts électrique, 13.5 Kg)
- Machine bi étagée + cycle de Joule Thomson: compresseur JT à deux étages (technologie oscillateur Stirling + clapets) / quelques milliwatts à 4.2 K

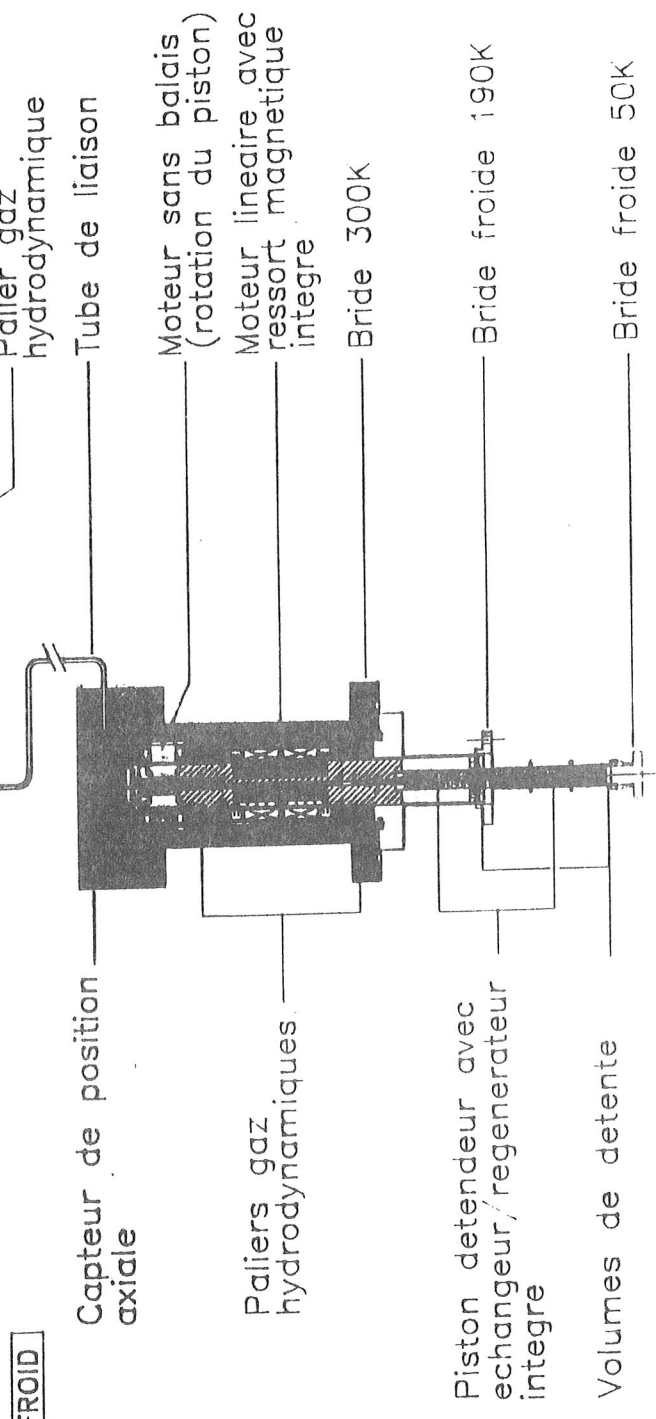


CRYOREFRIGERATEUR SPATIAL A CYCLE STIRLING

OSCILLATEUR BICYLINDRE

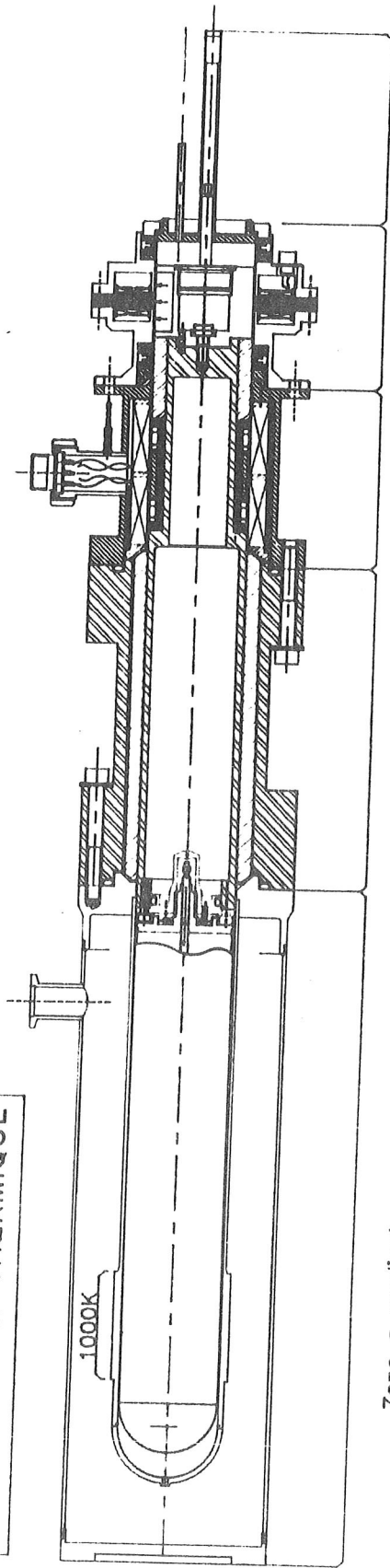


DOIGT FROID



Bride froide 50K

COMPRESSEUR THERMIQUE



Zone a gradient

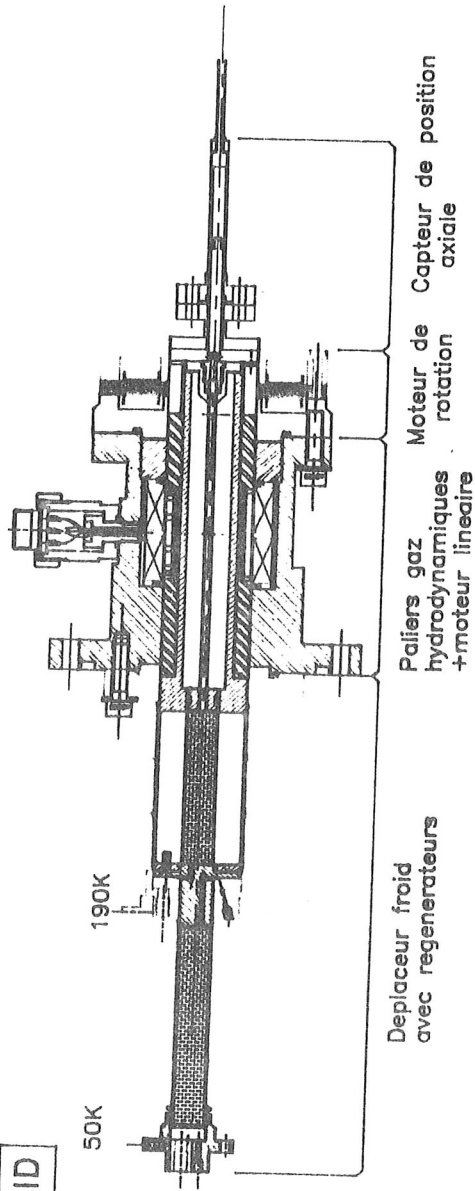
Palier gaz hydrodynamique

Moteur lineaire

Moteur de rotation

Capteur de position axiale

DOIGT FROID



Deplaceur froid avec regenerateurs

Paliers gaz hydrodynamiques + moteur lineaire

Moteur de rotation

Capteur de position axiale

CRYOREFRIGERATEUR SPATIAL A CYCLE VUILLEUMIER

DEVELOPPEMENTS EN COURS EN FRANCE

Cadre:

- Contrats & DGA (machine à cycle de Stirling)
- Développements effectués par CEA/SBT en collaboration avec L'Air Liquide et Aerospatiale.

Spécifications:

- 1 Watts à 50 K et 5 Watts à 190 K
- Puissance électrique consommée < 150 Watts
- Durée de fonctionnement sans panne > 20 000 heures
- Masse et encombrement à minimiser

Choix technologiques:

- Paliers gaz hydrodynamiques
 - simplicité technologique
 - fiabilité
- Etanchéité par jeu réduit (intégré au palier)
- Machines splittées pour faciliter l'intégration
- Machines à doigt froid bi étage
- Motorisations linéaires
- Fonctionnement à résonance
 - magnétique (Vuilleumier) ≈ 5 Hz
 - pneumatique (Stirling) ≈ 40 Hz
- Equilibrage dynamique des masses mobiles (Stirling)

Etat d'avancement:

- | | | |
|------------|---|---|
| 1988 - 90: | Etude / Faisabilité concepts | { paliers gaz
motorisation (rotation/linéaire)
ressorts (magnétique/gaz)
four 1000 K |
| 1990 - 92: | Maquettes de faisabilité des machines complètes | |



CONTRAINTES LIEES A L'APPLICATION SPATIALE

- Durée de vie (5 / 10 ans)
 - Fiabilité
- } supprimer les pièces en frottement



Paliers et Etanchéité sans contact

- | | | |
|-----------------------|--|--------------------------|
| <u>Paliers</u> | • magnétiques actifs (Phillips/USA) | <u>Etanchéité</u> |
| | • gaz hydrodynamiques (CEA/AL/France) | par jeu réduit |
| | • membranes déformables (OXFORD/BAE/ESA) | (clearance seal) |

- Contraintes de lancement
 - supporter les vibrations sans dégradation des performances mécaniques (paliers, étanchéité, etc...) et cryogéniques

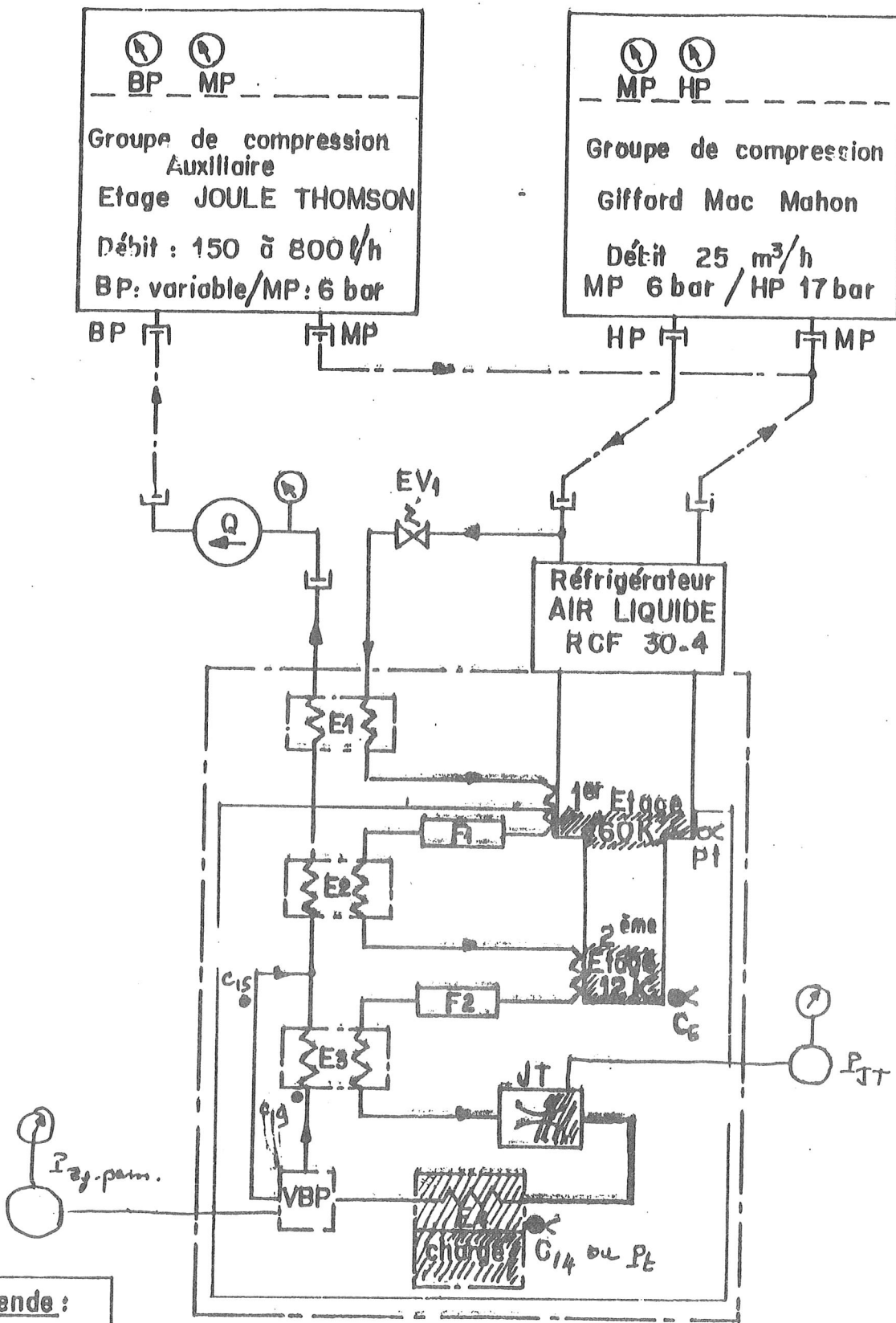
⇒ systèmes de blocage
⇒ asservissement des pièces mobiles

- Interface avec le satellite et les instruments

- minimiser $\left\{ \begin{array}{l} \text{masse} \\ \text{volume} \\ \text{consommation électrique} \\ \text{rejet thermique} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Cycles efficaces}$

- minimiser les vibrations induites ⇒ équilibrage des masses mobiles
- E.M.I (moteurs)
- thermophonie

SCHEMA DE PRINCIPE



Légende :

- Tuyauteries souples de raccordement
- |— Raccords "Aéroquip"

E1	E2	E3	E4	Echangeurs	JT Vanne de détente JOULE THOMSON	< Sonde PI
F1	F2			Filtres	VBP Vanne by-pass	< Sonde C

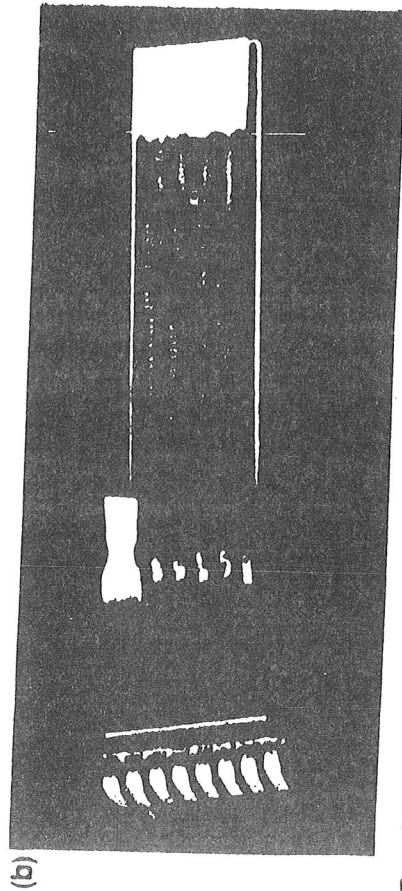
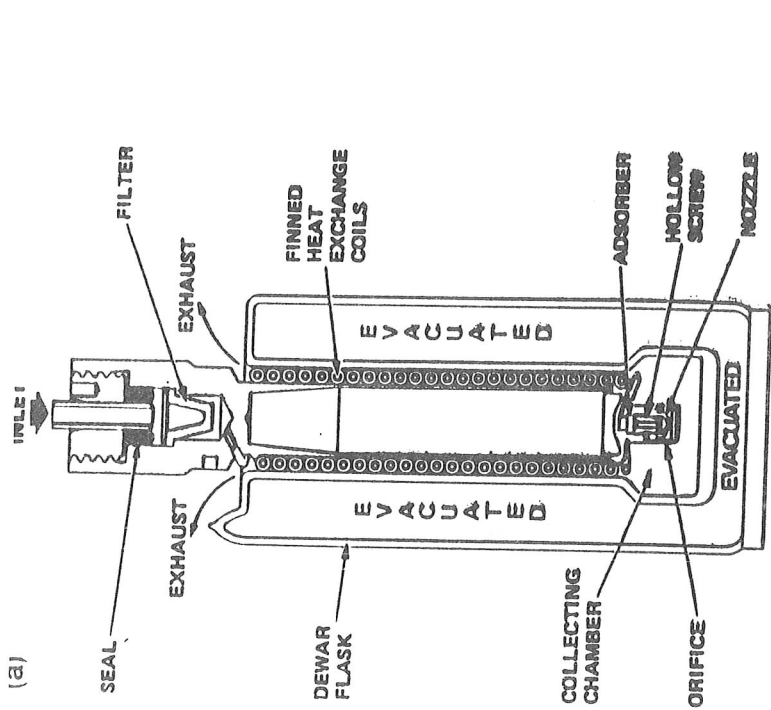


FIG. 2.1. (a) Miniature Joule-Thomson expansion unit with coil-tube Giaque-Hampson heat exchanger in insulated glass dewar vessel. (Courtesy Hymatic Engineering Co.) (b) Planar microminiature Joule-Thomson expansion unit fabricated using a photo lithographic process. (Courtesy MMR Technologies Inc.)



FIG. 2.4. Family of Joule-Thomson expansion nozzles with associated heat exchangers. (Courtesy Hymatic Engineering Co.)

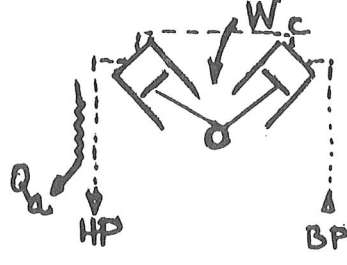
CYCLE JOULE THOMSON

- 27 -

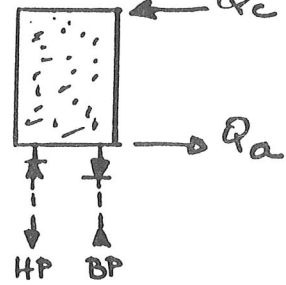
stockage sous pression



compression mécanique

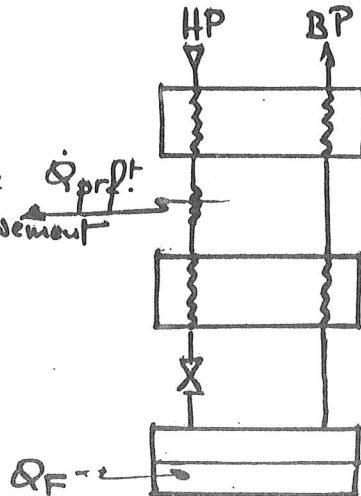


compression thermique (adsorption/désorption)



- ≤ 80K LHe₂
- ≤ 20K LHe₄
- ≤ 4,2K LHe₃

source auxiliaire \dot{Q}_{prf} prérefroidissement



- Pas de pièces mobiles à froid
mais micro-orifices de détente
- Taux de compression élevés → Pb. compresseurs
- efficacité insensible à taille → miniaturisable

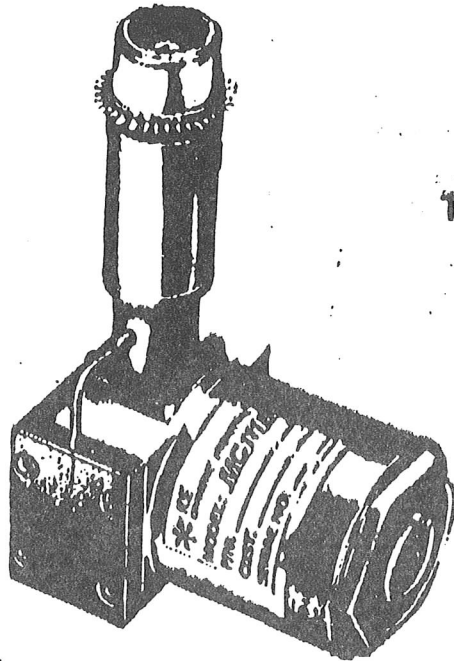
MC111B

Vibrationless Stirling Microcooler System



ICE

International
Cryogenic
Enterprises



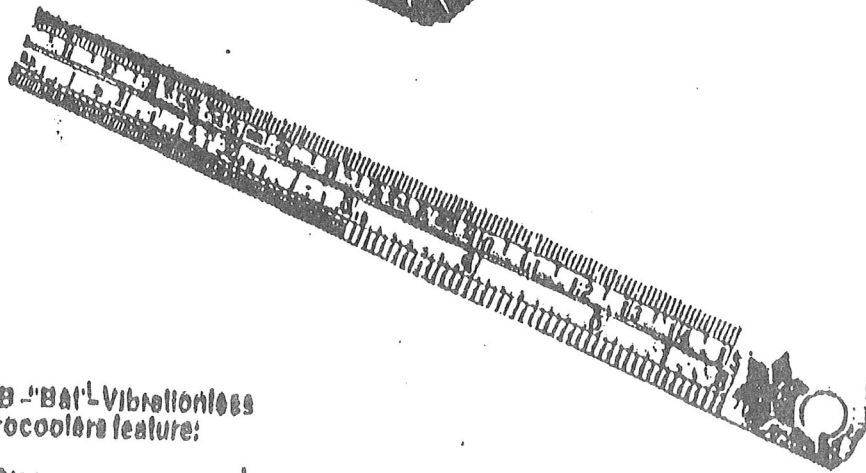
The "Bat"

150 mW / 80K

< 6W electric

300K - 85K : 4'

MTBF ~ 2000 h.

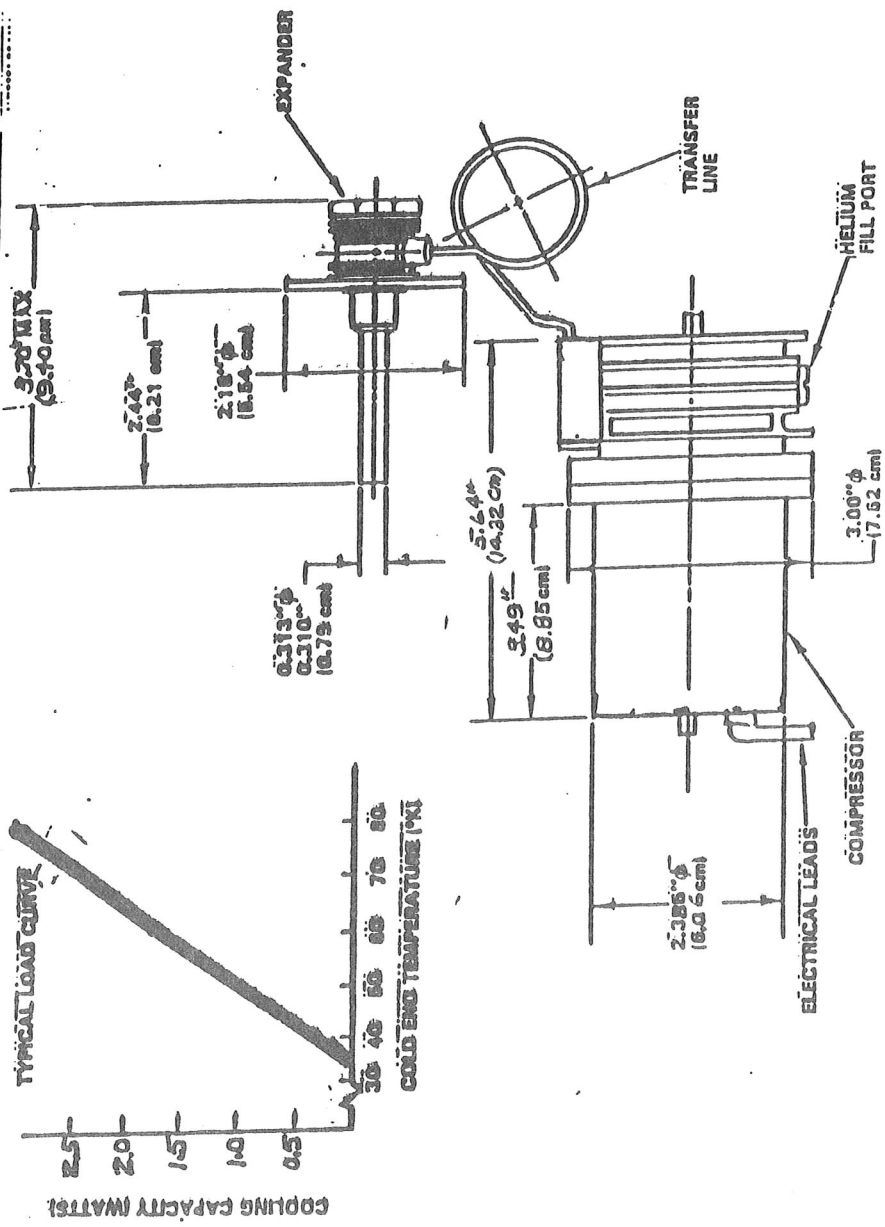


ICE MC111B "Bat" Vibrationless
Stirling Microcoolers feature:

- Compact size
- Low weight
- High efficiency
- Rapid cooldown time
- Reliability — maintenance free operation
- Durability — built to last
- Very low acoustic noise
- Patented clearance seal technology
- Vibration-free detector plane
- Closed Cycle Temperature Control (Demand Refrigeration)
- Virtually no EMI
- Custom modification capability

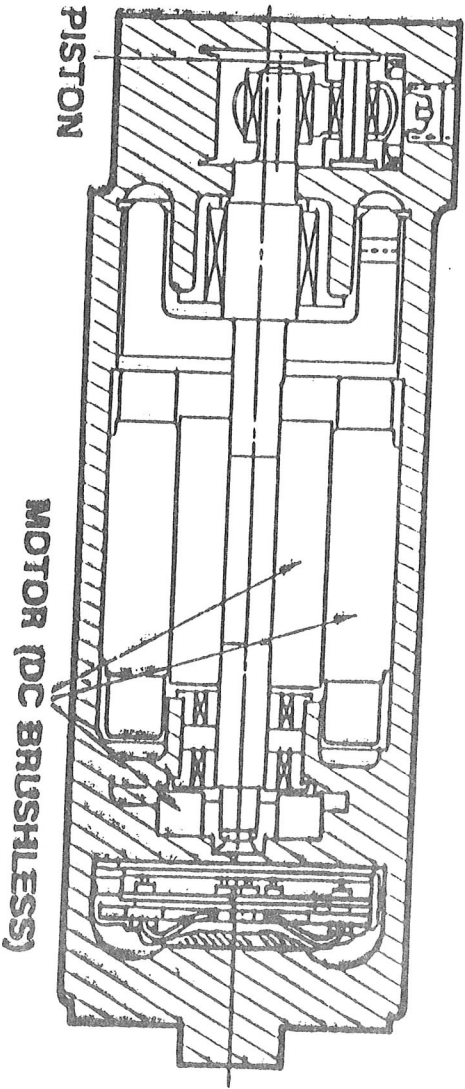
The "Bat", a complete miniaturized Cryocooling system, is ideal for inclusion in guided and hand-held munitions as well as laser range-finding equipment. ICE has miniaturized the advanced technology of its Stirling Cryocoolers in an ultra-compact, lightweight and vibration-free unit, while incorporating a detector directly into the coldfinger. The cost-effective MC111B requires low power input, exhibits very low acoustic noise and features patented clearance seal technology. Its flexible design allows the unit to be reconfigured to fit almost any system.

2 1/2 WATT SPLIT-STIRLING COOLER

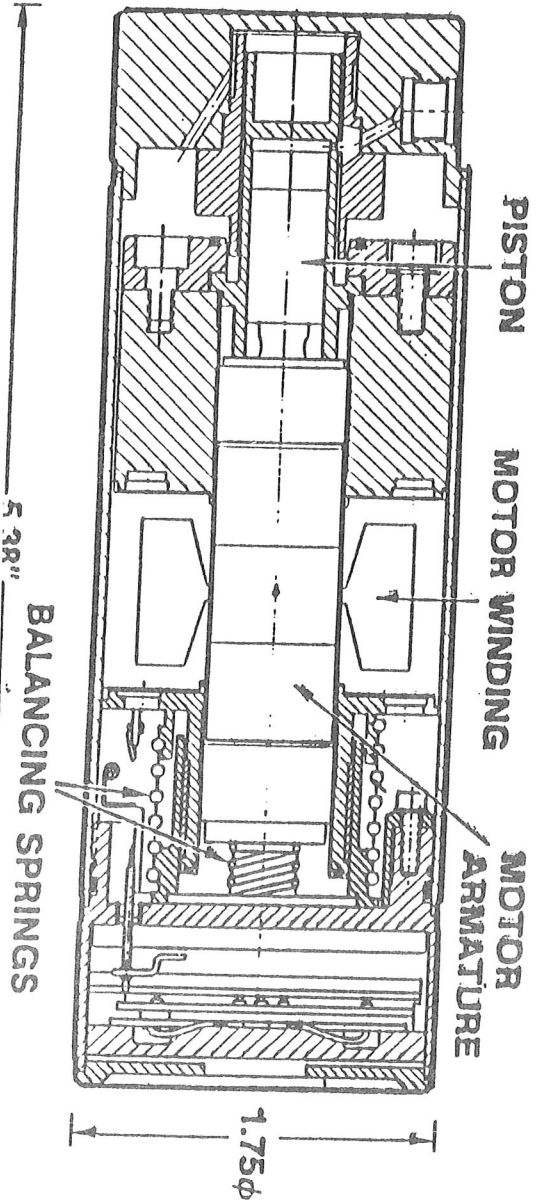


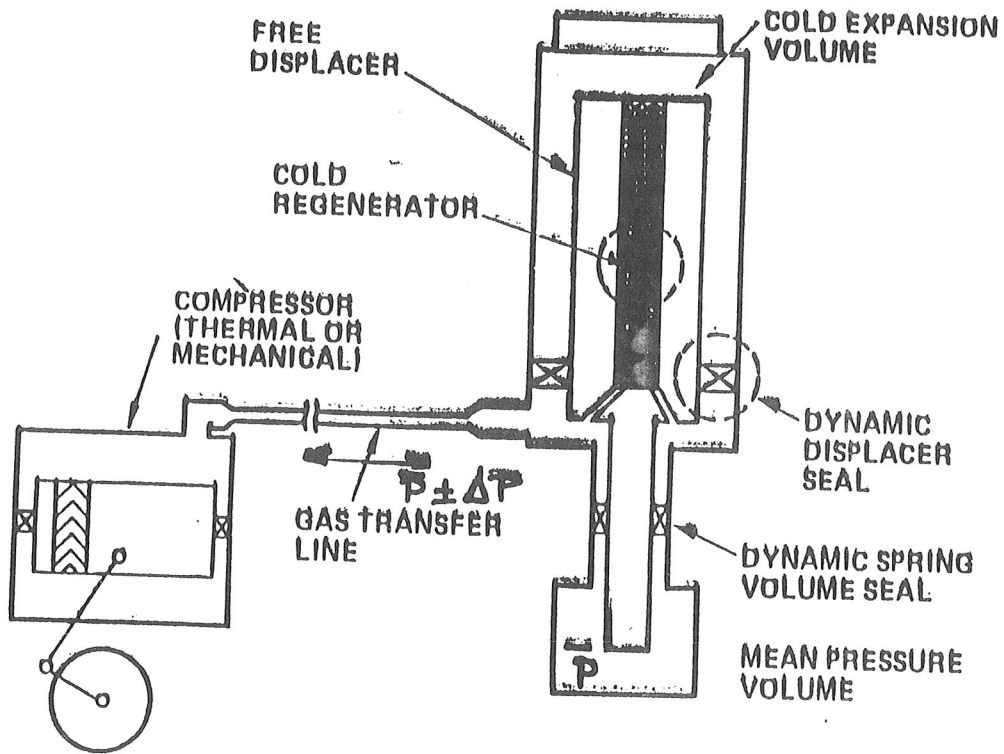
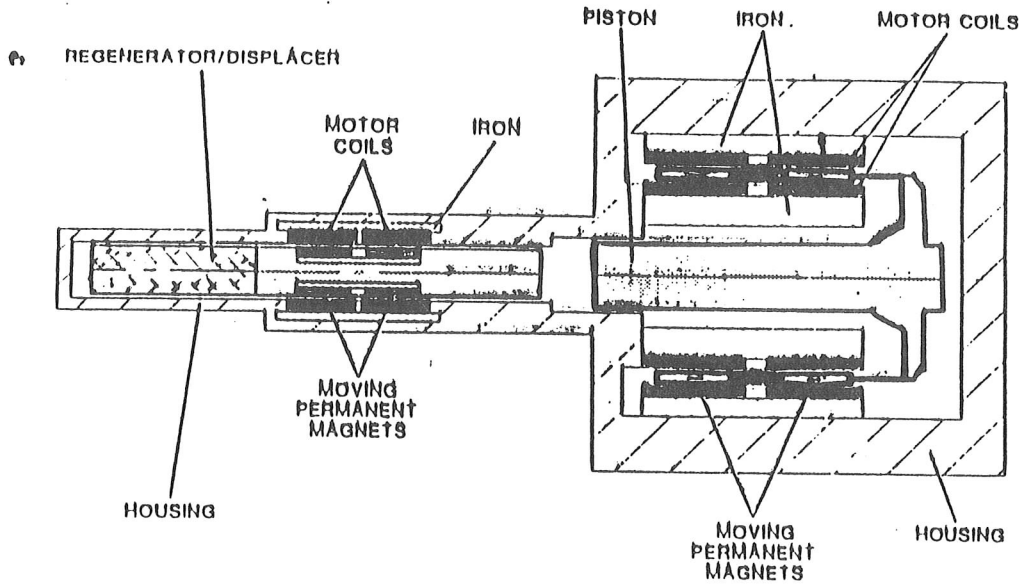
CRYOGENIC COOLER TECHNOLOGY LINEAR VS. ROTARY

ROTARY
COMPRESSOR

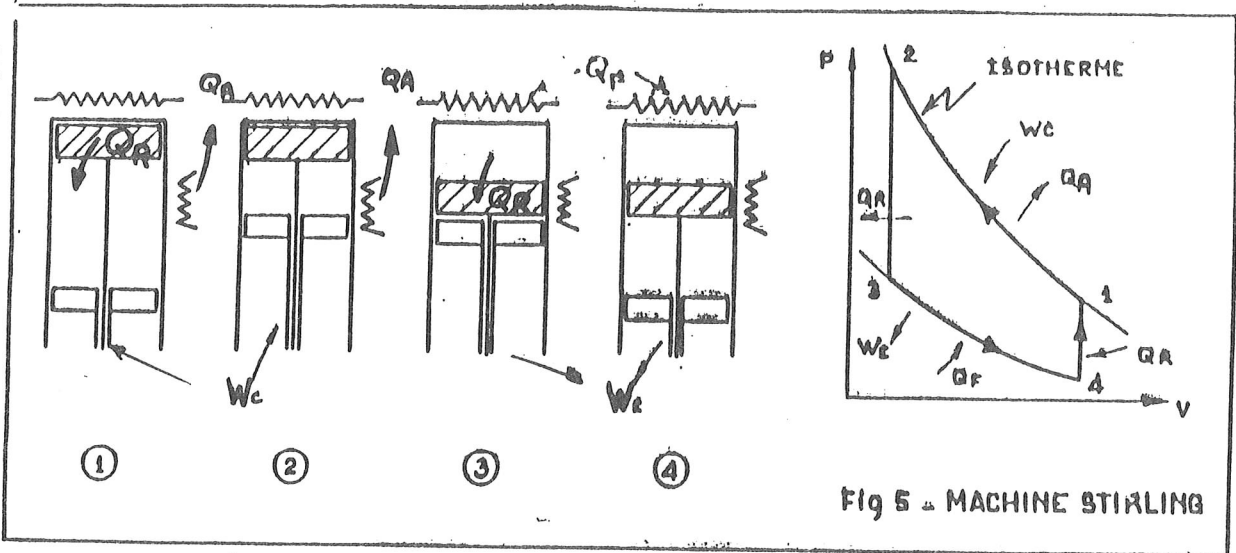


LINEAR
COMPRESSOR





Realisation pratique du cycle isochore - isotherme



exemple : PHILLIPS - FGH 2st 50W/20K
150W/80K

PHILLIPS (Rhombic Drive)

Machines faible puissance

applications : refroidissement détecteurs infrarouges } observation
vision nocturne

250 mW à 1 W à 60-80K pour \approx 30 Watts consommés
fonctionnement sans intervention \approx 1000 heures

particularités :

- oscillateur piston et déplacement régénérateur froid découplés mécaniquement
- oscillateur de pression $20 \text{ bars} \pm 5 \text{ bars}$
 - ↳ mécanique (bielle-manivelle)
 - ↳ linéaire résonnant (type haut parleur) 20-40 Hz
- doigt froid
 - ↳ libre : entraîné pneumatiquement par onde pression de l'oscillateur
 - ↳ moteur linéaire synchronisé p/r oscillateur
- paliers et étanchéité par frottements secs
- compacts ou splités

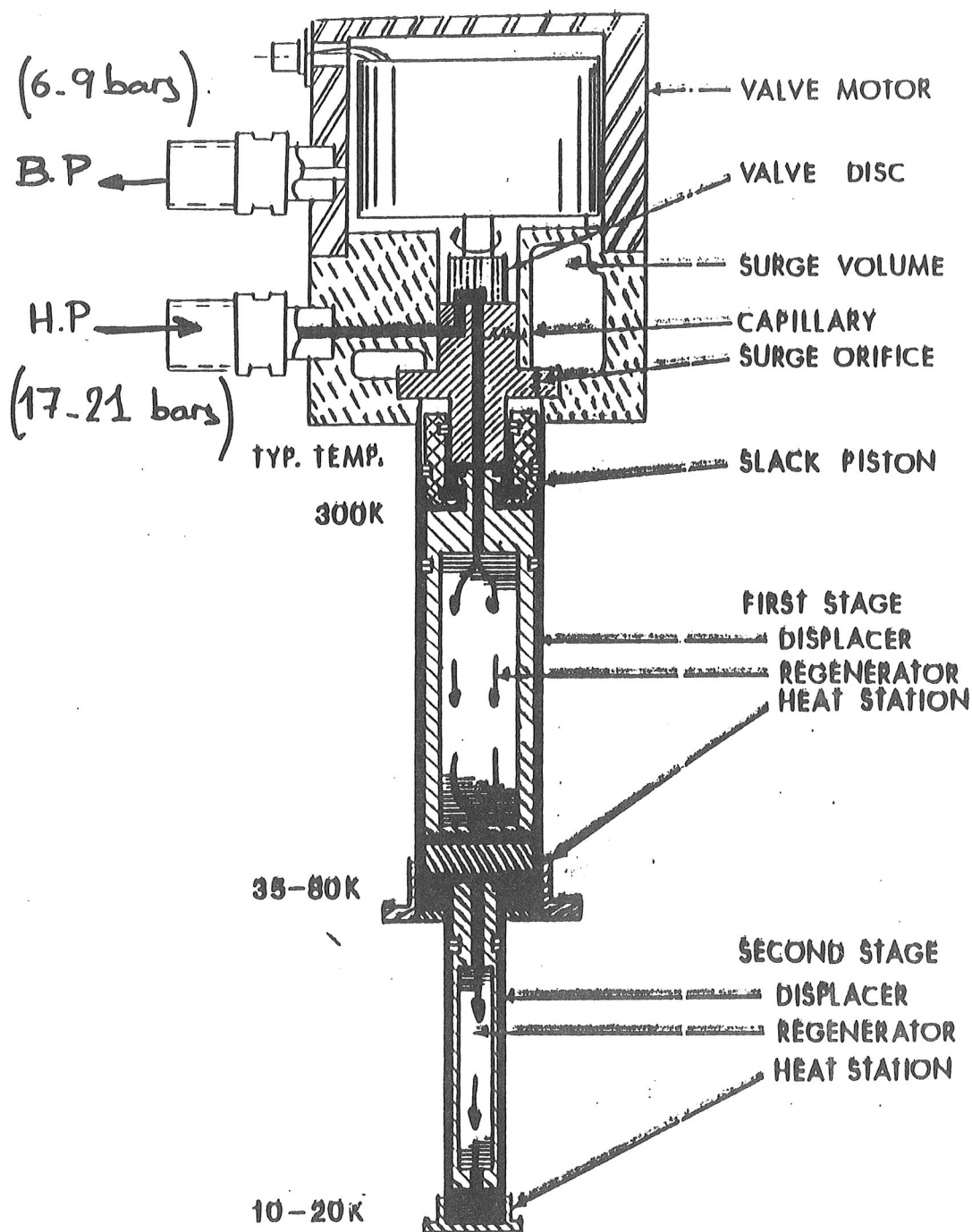


Figure 7 DE-202 expander cross section schematic.

caracteristiques

- simplicité technologique → fiabilité
- separation des fonctions compression / production du froid sans limitation distance
- deshuilage → changement cartouche charbon actif ~ 10.000 heures
- limitation temperature à $T_F \sim 10K$ par inefficacité regeneration:
 - volumes morts
 - capacité calorifique volumique materiau regenerant / Helium

applications

- cryopompage
- refrigeration pour experimentation
- refroidissement écrans thermiques (stockage He, bobines supra, etc...)
- pre-refroidissement refrigerateur à cycle J.T ($\rightarrow 4K$)

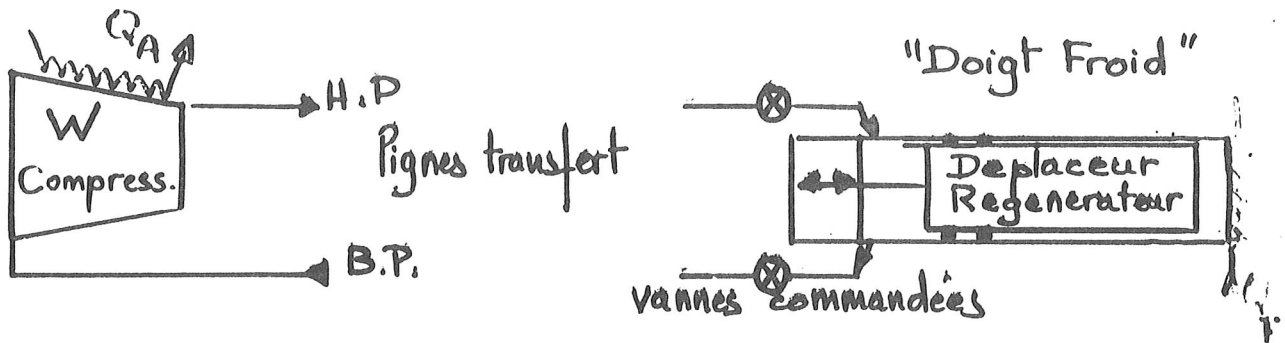
disponibilité

L'AIR LIQUIDE - C.T.I - A.P.D Cryogenics - LEYBOLD
EDWARDS

2 "gammes" :

Q_F (20K)	Q_F (80K)	W (compresseur)
3-7 W	15-35 W	2-4 KW
5-10 W	30-80 W	6-8 KW

Realisation pratique du cycle isobare - isotherme



Compresseur :

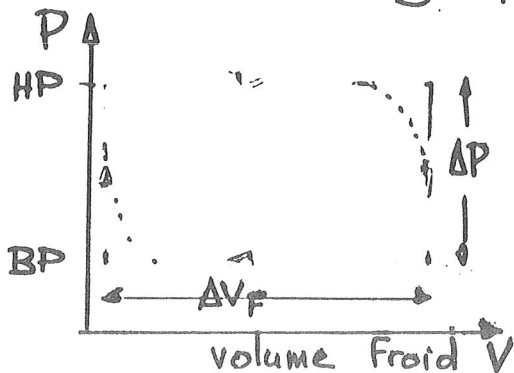
- issu industrie frigorifique (piston ou rotatif)
- adapte' Helium : injection huile → deshuileage
- refroidi (eau ou air) Q_A

Doigt Froid :

- systeme entrainement independant compresseur (meccanique ou pneumatique) avec commande vannes (1 ou 2 Hz)
- materiau regenerateur

2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025

Puissance Frigorifique Q_{12}

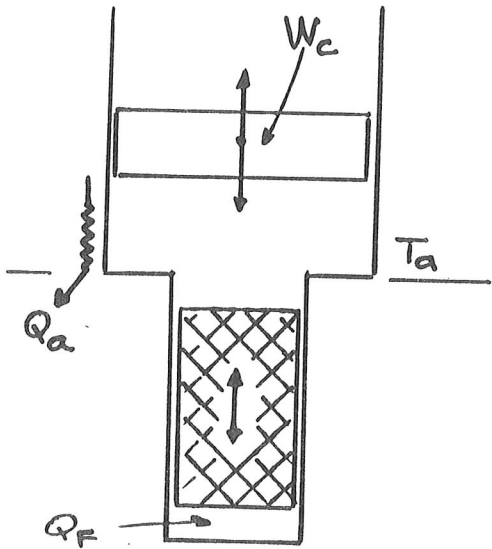


$$Q_{12} = \Delta H = \Delta T$$

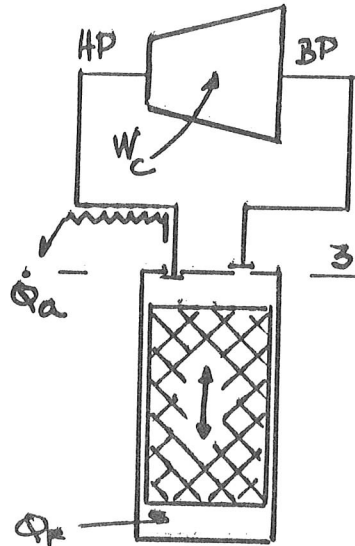
CYCLES A REGENERATION

-14-

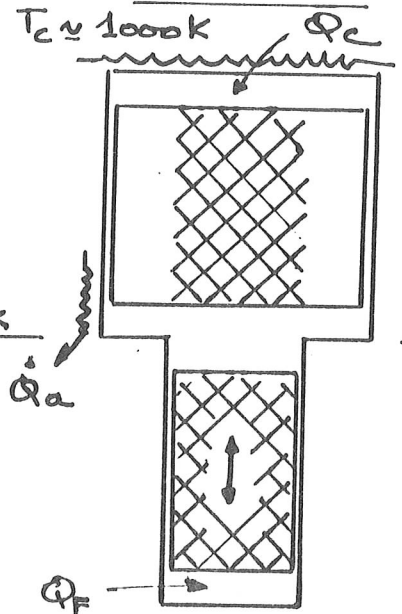
STIRLING



GIFFORD M^C MAHON



VUILLEUMIER



T_F : 1 étage (50 → 100K) 2 étages (10 → 30K)

Piston resonant sur ressort gaz
 $F \approx 20 \text{ à } 50 \text{ Hz}$

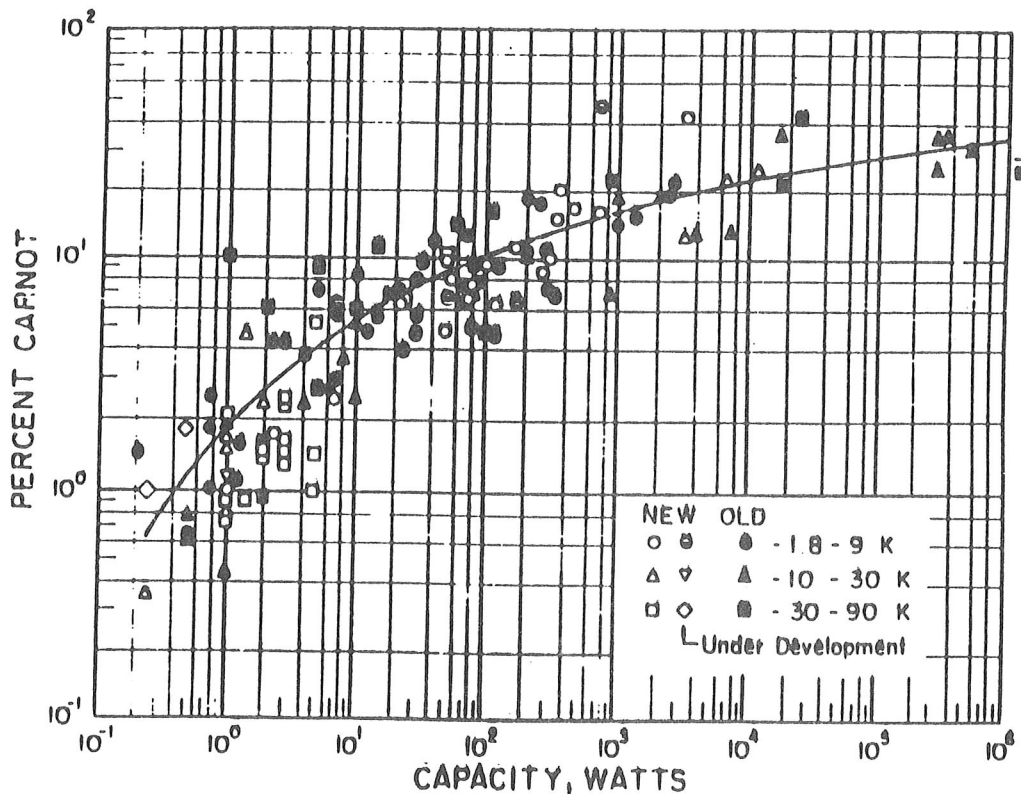
Compresseur standard
(piston ou rotatif)
+ deshuileage
+ clapets commandés
 $F \approx 1 \text{ à } 2 \text{ Hz}$

Compression Thermique
(piston déplacé)
 $F \approx 1 \text{ à } 10 \text{ Hz}$

Cycle	Applications sol	Potentialités Spatiales
Gifford Mac Mahon	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Cryopompage ◦ Refroidissement échantillons pour physiciens 	<p><u>peu adapté:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ faible efficacité pratique ◦ fréquence de fonctionnement basse (1 à 2 Hz) → masse et encombrement élevés ◦ clapets commandés et taux de compression élevé: → fiabilité faible
Stirling	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Liquéfaction de l'air ◦ Refroidissement détecteurs IR 	<p><u>Très bonnes:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ efficacité élevée ◦ fréquence de fonctionnement élevée (ressort gaz ≈ 40 Hz) → masse et encombrement réduits <p><u>Inconvénients:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ pièces mobiles à froid → fiabilité, vibrations induites sur détecteur <p><u>Solution alternative:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ Tube à pulsation
Vuilleumier	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Très peu d'applications sol 	<p><u>Intérêt:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ faible charge sur paliers → bonne fiabilité ◦ compression thermique: possibilité sources énergétiques autres que l'électricité <p><u>Inconvénient</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ présence four → perte d'efficacité ◦ faible fréquence → masse et encombrement élevés
Brayton	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Réfrigération ◦ Liquéfaction (N₂, H₂, He) 	<p><u>Intérêt:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ efficacité pour fortes puissances ◦ possibilité suppression des mouvements alternatifs (utilisation de turbocompresseur et détenteur) <p><u>Inconvénients:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ difficilement miniaturisable (efficacité des turbines compression / détente)
Joule Thomson	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Refroidissement rapide de détecteurs (boucle ouverte) à 80 K ◦ Réfrigération (bobines supraconductrices, échantillon) à 4.2 K 	<p><u>Intérêt:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ miniaturisation possible sans détérioration efficacité ◦ pas de pièces mobiles à froid <p><u>Inconvénients:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ taux de compression élevé et débits faibles → fiabilité faible <p><u>Solution alternative:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ◦ Compression thermique par adsorption/désorption

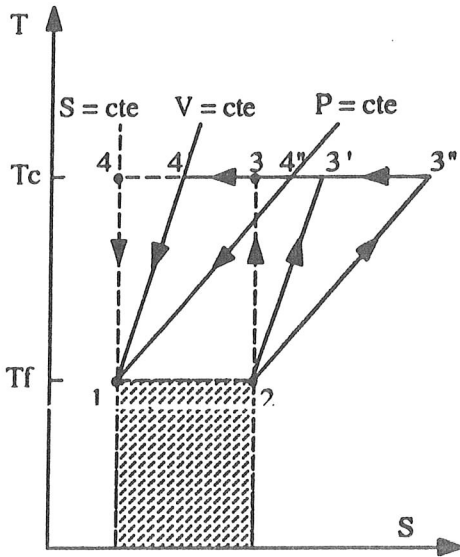
EFFICACITE PRATIQUE DES CRYOREFRIGERATEURS

[D'après Strobridge]

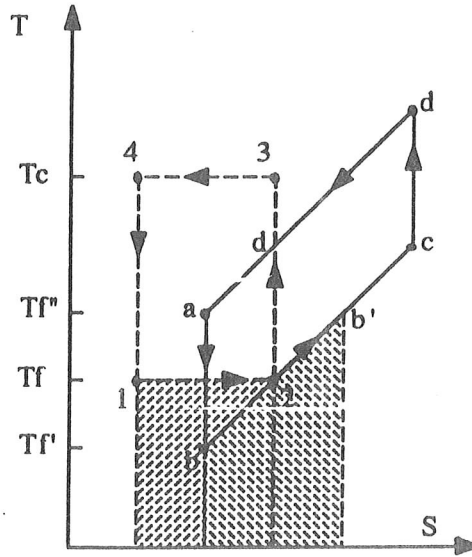


CYCLES PRATIQUES

• Cycles équivalents au cycle de Carnot

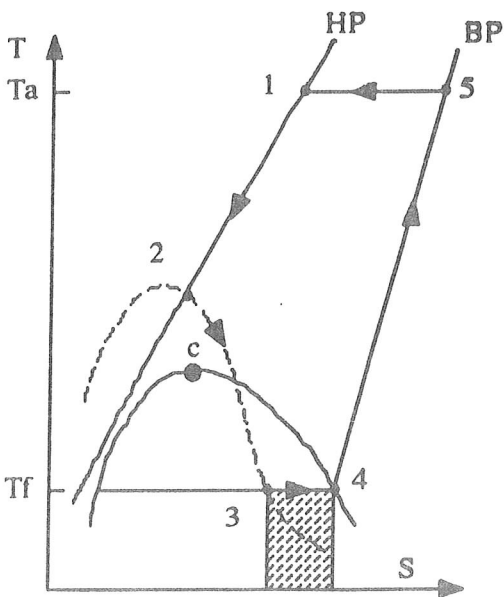


1-2-3-4: Carnot (Isotherme - isentropie)
 1-2-3'-4': Stirling (Isotherme - isochore)
 1-2-3''-4'': Ericsson (Isotherme - isobare)



1-2-3-4: Carnot
 a-b-c-d: Brayton (Isentropie - isobare)
 : puissance frigorifique Qf
 : travail de compression W

• Cycle à détente isenthalpique (Joule Thomson)



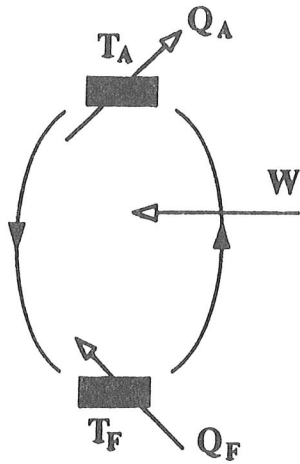
coefficient de détente:

$$\mu = \frac{\partial T}{\partial P} = \frac{1}{C_p} \left[\frac{1}{T} \frac{\partial v}{\partial T} - v \right]$$

Température d'inversion	
Oxygène	800 K
Azote	620 K
Néon	260 K
Hydrogène	205 K
Hélium	50 K

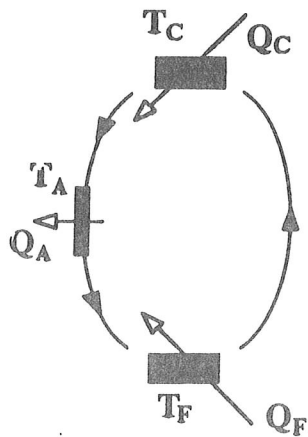
CYCLES THERMODYNAMIQUES

Produire du froid



• Cycles dithermes à compression mécanique
(Gifford Mac Mahon, Stirling, Brayton, Joule Thomson)

$$\left. \begin{array}{l} \text{1er Principe:} \\ W + Q_A + Q_F = 0 \\ \text{2nd Principe:} \\ \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \end{array} \right\} \frac{Q_F}{W} \leq \frac{T_F}{T_A - T_F}$$



• Cycles trithermes à compression thermique
(Vuilleumier)

$$\left. \begin{array}{l} \text{1er Principe:} \\ Q_C + Q_A + Q_F = 0 \\ \text{2nd Principe:} \\ \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0 \end{array} \right\} \frac{Q_F}{Q_C} \leq \frac{T_F}{T_C} \frac{T_C - T_A}{T_A - T_F}$$

Efficacité de Carnot:

$$\varepsilon = \frac{Q_F}{W} = \frac{T_F}{T_A - T_F}$$

Pour $T_A = 300 \text{ K}$

$T_F \text{ (K)}$	200	100	50	20	4
$\varepsilon \text{ (W/W)}$	2	0,5	0,2	0,07	0,015

