

Ecole Technologique du RT Vide

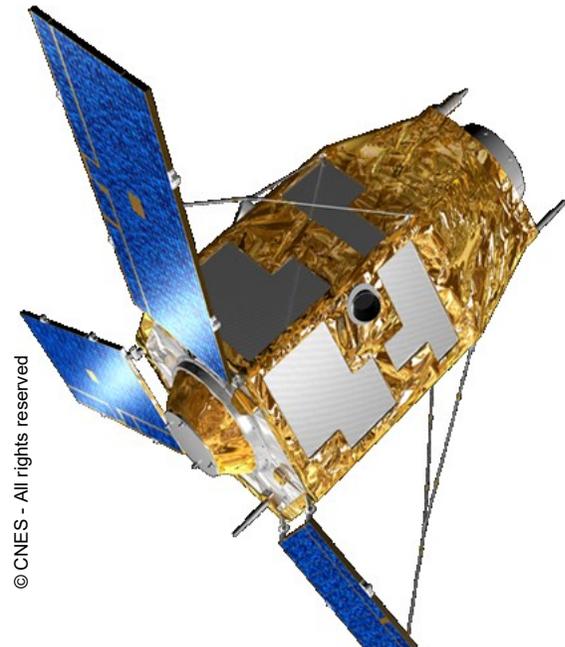


Cryogénie spatiale

Utilisation de contraintes orbitales pour le refroidissement de détecteurs



Jérôme ANDRE
Jerome.andre@cnes.fr
DTN/TVO/TH

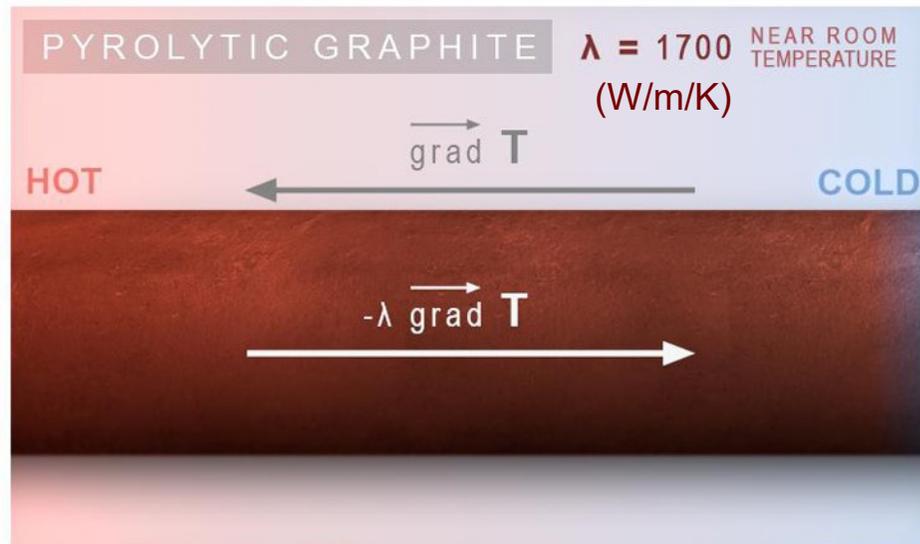
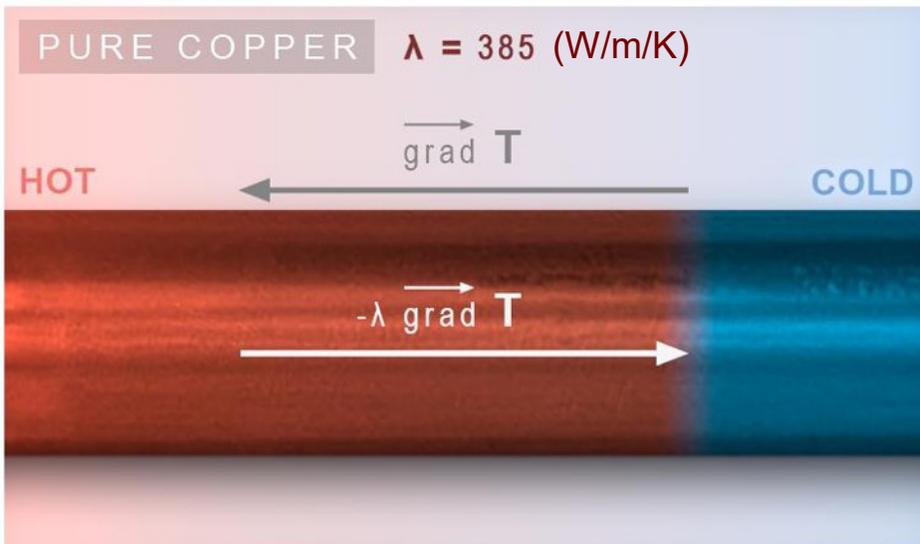
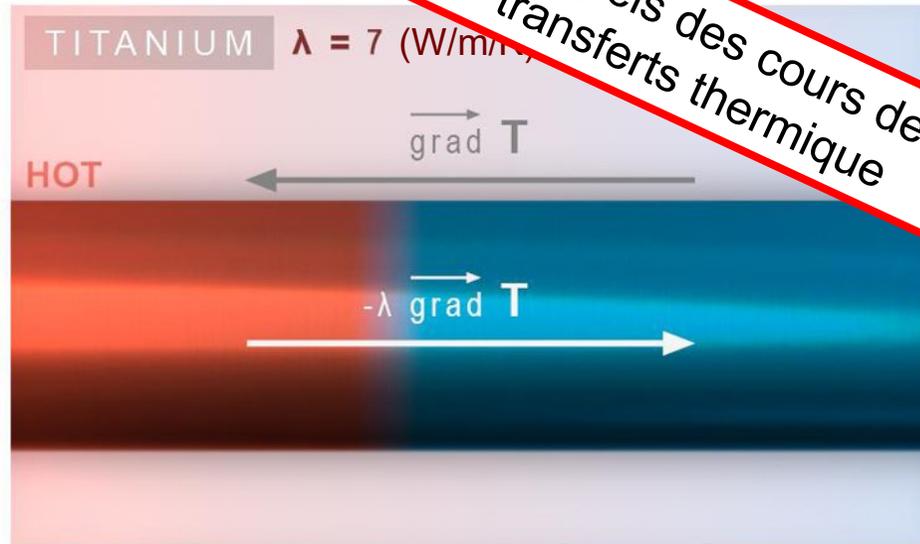
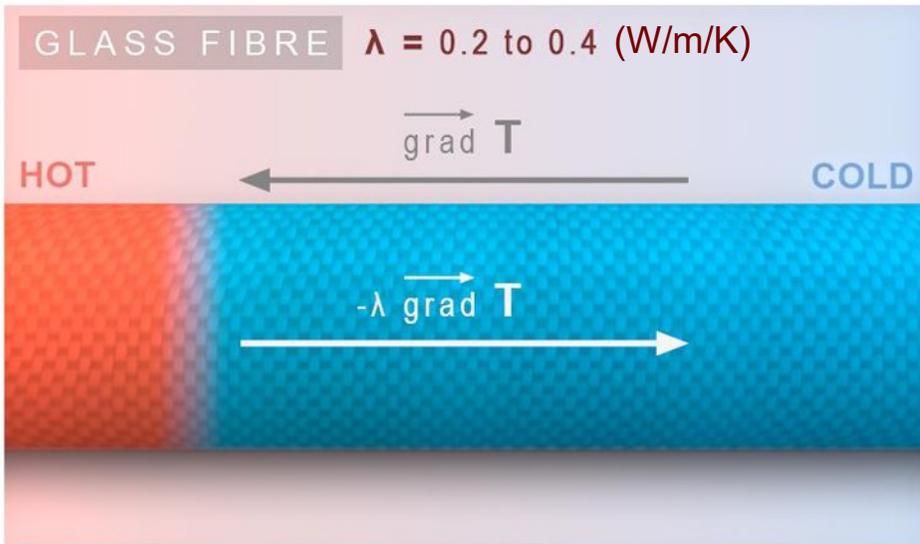


- Objective: cooling to cryogenic temperature (below 200 K)
- To reduce the "thermal" noise of detectors
 - Gamma Rays Detection: from 85 K to 100 K
 - SWIR Detection: from 120 K to 180 K
 - IR Detection: from 50 K to 100 K
 - FAR IR Detection and TES detector : from 0.05 K to 0.3 K
- To reach superconductive state of material (electrical resistance ≈ 0)
 - Superconductive IMUX/OMUX (Telecoms)
- Biological samples storage (e.g. ISS experiment)

Rappels des cours de transferts thermique



Rappels des cours de transferts thermique



Le but du vide d'isolation est d'annuler ce type d'échanges

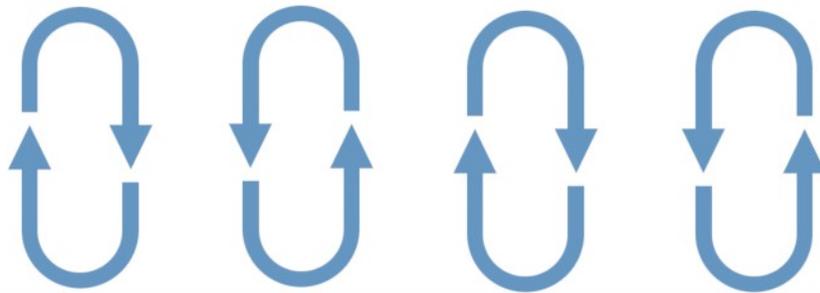
By convection

Rappels des cours de transferts thermique

Free convection

- Archimedes force induces fluid motion by density variation with temperature

L'absence de gravité impacte ces échanges



$$P_{\text{CONVECTIVE}} = h_{\text{TRANSFER}} \cdot S \cdot (T_{\text{FLUID}} - T_{\text{WALL}})$$

$$h_{\text{TRANSFER}} < 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

$\uparrow P_{\text{CONVECTIVE}}$

$T_{\text{FLUID}} < T_{\text{WALL}}$

T_{WALL}

Idem pas d'utilisation directe pour la cryogénie spatiale

Rappels des cours de transferts thermique

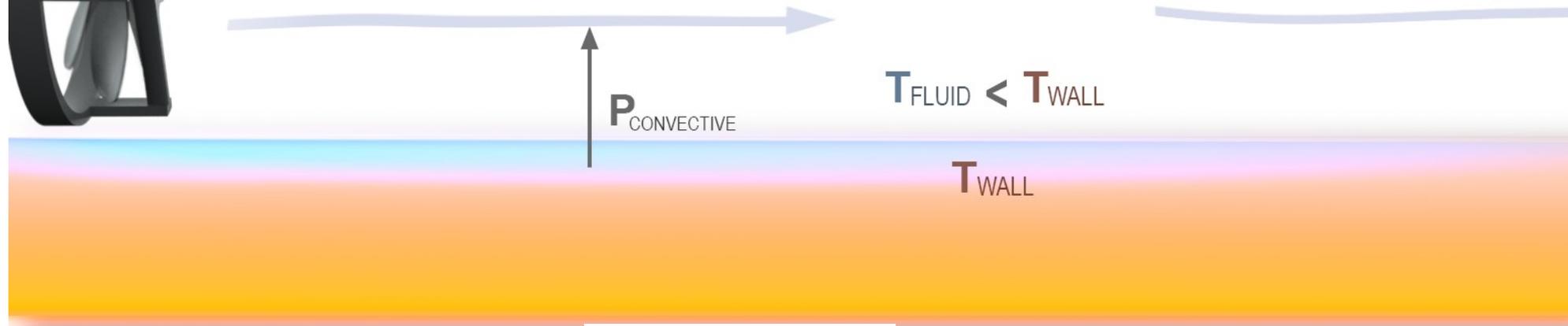
Forced convection

- Fluid motion is forced to extract heat



$$P_{CONVECTIVE} = h_{TRANSFER} \cdot S \cdot (T_{FLUID} - T_{WALL})$$

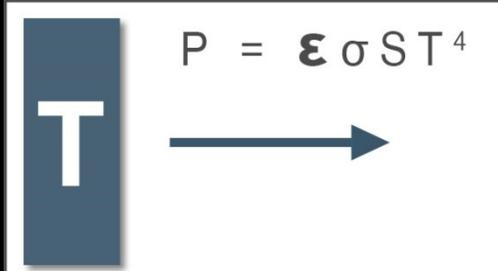
$$h_{TRANSFER} > 20 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$



By radiation under space vacuum and near Earth

- Definition

- An exchange of heat by absorption and emission of photons energy
- Emission is proportional to T^4


$$P = \epsilon \sigma S T^4$$

Rappels des cours de transferts thermique

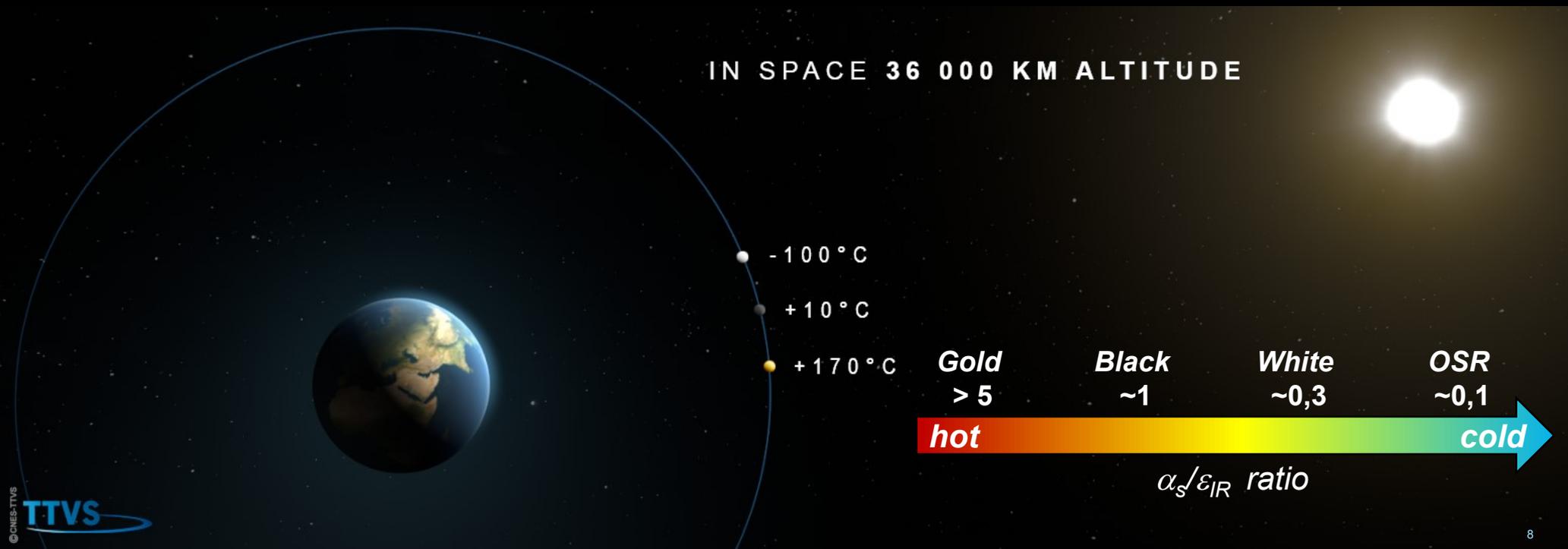


Radiation: a surface phenomenon

- Surface thermo-optical properties (all wavelengths and all directions)
 - Sun spectrum → total absorption → solar absorptivity = α_s
 - IR spectrum → total absorption = total emission → IR emissivity = ϵ_{IR}
 - At each wavelength, emission coefficient = absorption coefficient
 - Grey surface hypothesis: emission and absorption coefficients are not temperature dependent

↳ α_s/ϵ_{IR} ratio defines "hot" and "cold" coatings

↳ Under space vacuum, very high sensitivity to surface thermo-optical properties



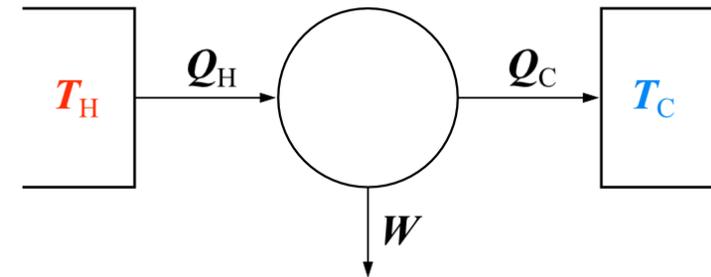


Partie théorique

■ Premier énoncé du second principe de la thermodynamique

- « *Il est impossible de construire un système, comme un moteur, qui décrit un cycle complet et qui convertit la chaleur en travail mécanique, à partir d'une seule source de chaleur* »

■ *Lord Kelvin*



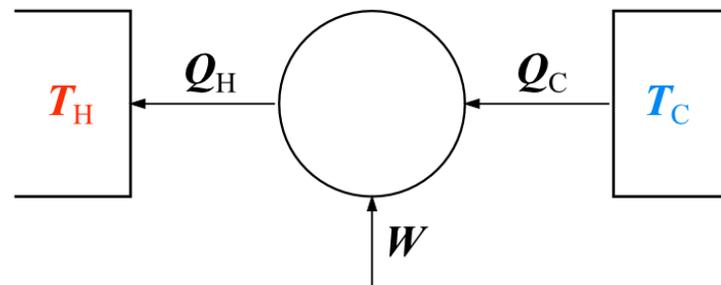
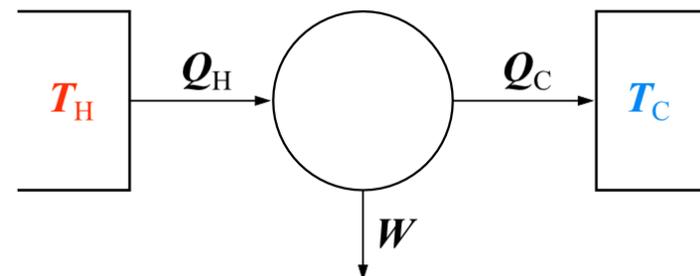
■ Fonctionnement d'un moteur

- Le transfert d'énergie d'une source chaude vers une source froide permet de créer du mouvement (travail)

■ Fonctionnement d'une machine à froid ou d'une pompe à chaleur

- Le mouvement (travail) permet de transférer de l'énergie d'une source froide (puissance froide) vers une source chaude

Pour faire du froid, il faut faire du chaud



Principe de base de la réfrigération

■ Efficacité théorique d'une machine frigorifique (Efficacité de Carnot)

- L'efficacité maximale théorique s'écrit:

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

- Avec:

- Q_f puissance froide
- W travail total sur le cycle
- T_f température de la source froide
- T_c température de la source chaude

- **Plus on descend en température, plus c'est complexe d'extraire de l'énergie**

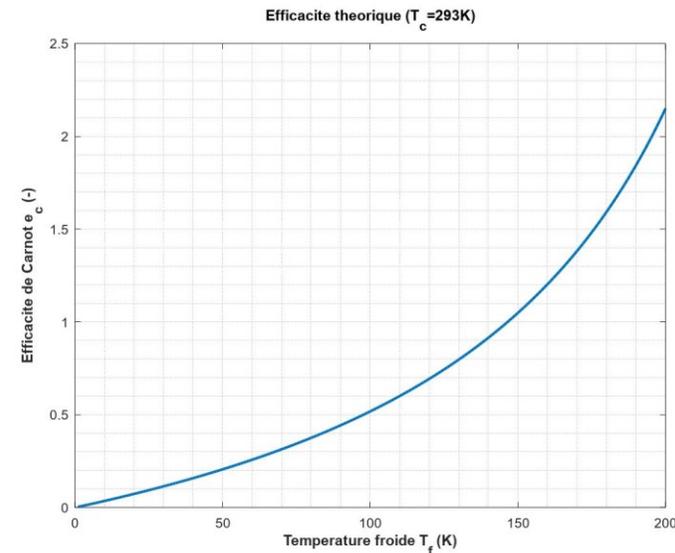
■ Impact sur l'architecture d'un cryostat

- Deux règles d'architecture en découlent directement :
 - Il faut éviter que la chaleur tombe sur la source froide

ISOLER AU MAXIMUM

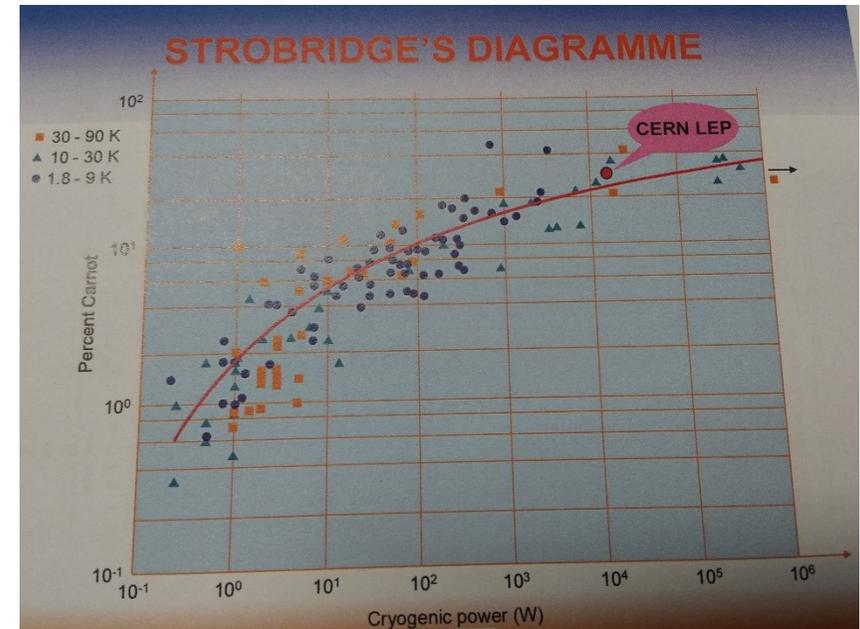
- Il faut extraire la chaleur à la température la plus haute possible

INTERCEPTER AU MAXIMUM



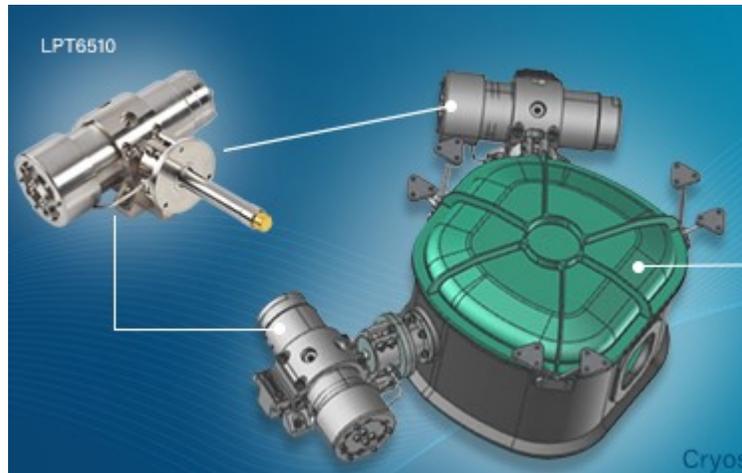
Impact de la taille

- Le diagramme de Strobbridge représente les différentes efficacités des cryoréfrigérateurs sol existants.
- Il montre que la taille des réfrigérateurs influence plus l'efficacité générale d'un réfrigérateur que la température limite
- **D'UN POINT DE VUE EFFICACITÉ, UNE MACHINE PUISSANTE EST PRÉFÉRABLE À PLUSIEURS PETITES MACHINES**



Redondance des machines froides

- Pour des raisons de fiabilité, la plupart des missions spatiale demande à redonder les machines froides, ou du moins éviter les points de panne unique. Cela entraine une contrainte énorme sur les budgets thermiques.
 - Pour des cryostat $\approx 80K$ >30% budgets thermiques
 - La plupart des sondes de mesures sont également redondés (pertes thermiques par conduction le long des fils)



Cryostats spatiaux

Règles d'architecture pour un cryostat

- **a) Identifier le juste besoin**
 - 1) Architecture dépend de la nature des phénomènes à observer (cryostat ouvert ou fermé)
 - 2) Température limite, cycle, duty cycle, contraintes électriques et magnétiques, stabilité thermique
- **b) Isoler**
- **c) Interceptor**
 - 1) Multiplier les étages (et les sources froides)
- **d) Prendre en compte les contraintes d'intégration et de testabilité au sol**
- **d.bis) prendre en compte les contraintes en vol**
- **e) Placer les sources froides au plus proche des sources de pertes thermiques**
- **f) Privilégier les architectures « robustes »**
 - 1) Éviter les éléments de design multi-contraints
 - 2) Éviter d'avoir des fournisseurs de machines avec un monopole (prise en compte des contraintes politico-techniques)
- **g) Prendre en compte les contraintes des politiques de redondance**



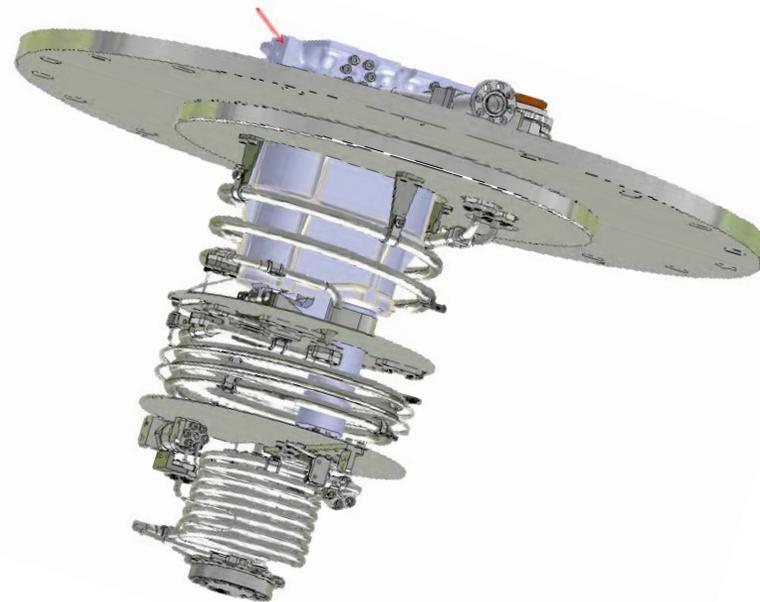
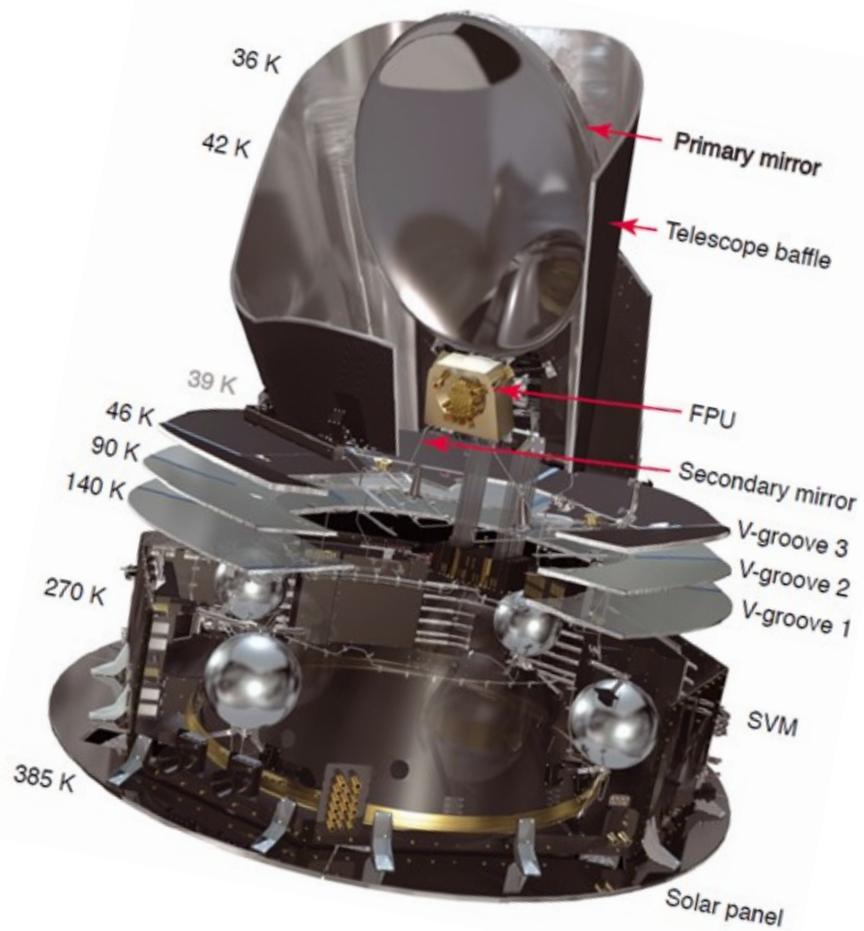
Particularités des applications spatiales

■ Les applications spatiales sont:

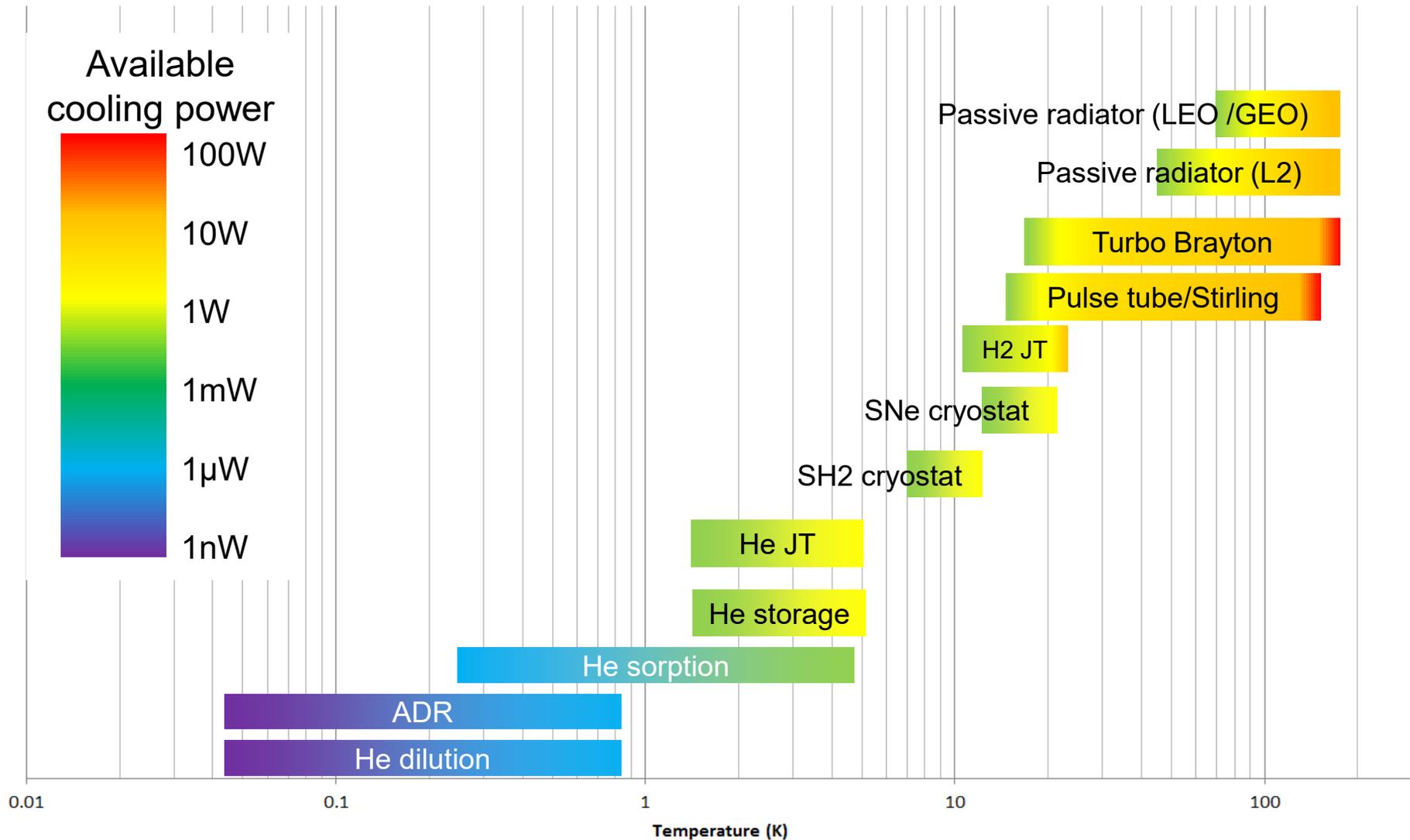
- Petites
 - (faible rendement)
- Compactes et contraintes mécaniquement
 - Fortes pertes par conduction dues aux supports mécaniques
- Redondées (pertes par les éléments redondants)
 - Pertes supplémentaires du aux éléments sols
- Sensibles aux microvibrations
- Sensibles au variation de champs magnétiques.
- Très fortement cablées (redondance et faible multiplexage des signaux)
- Limitées en ressources (puissance électrique et en chaleur évacuable)
- Doivent être testées au sols
 - Contraintes dans les tests (gravité, vide d'isolement, représentativité de l'environnement)

La conception des cryostat spatiaux est encore plus complexe qu'un cryostat « SOL » mais heureusement des solutions existent

Partie technologie



Cryogenic technologies versus temperature



■ Réservoirs cryogéniques

■ Principe de base

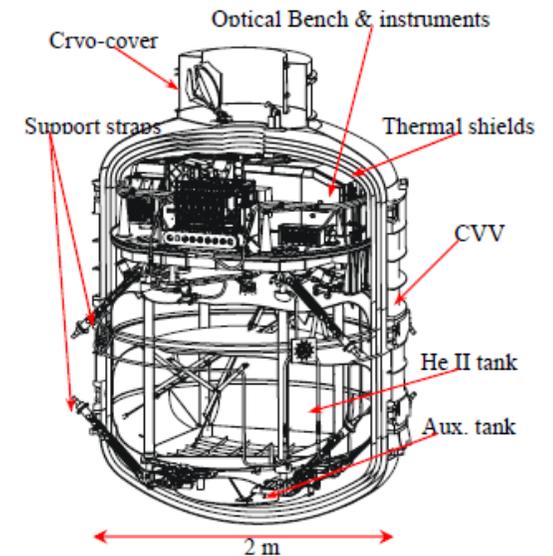
- *Les réservoirs cryogéniques utilisent la chaleur latente de sublimation/vaporisation (cryogène solide/liquide) d'un fluide pour maintenir les éléments à la température souhaitée.*

■ Avantages:

- Technique simple
- Pas de microvibrations induites

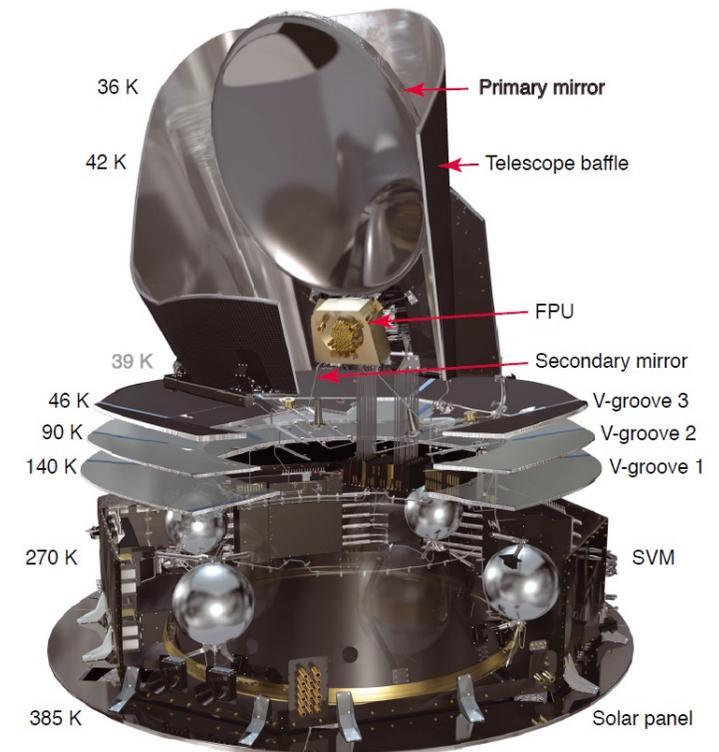
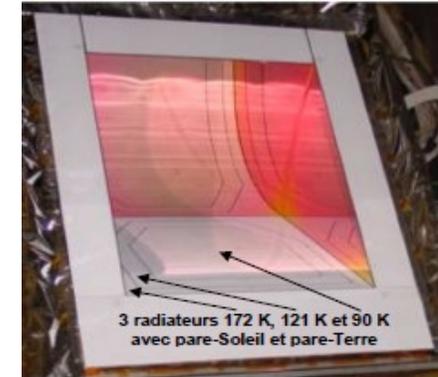
■ Principaux inconvénients

- Masse
- Volume important
- Durée de vie limitée (assèchement du réservoir)



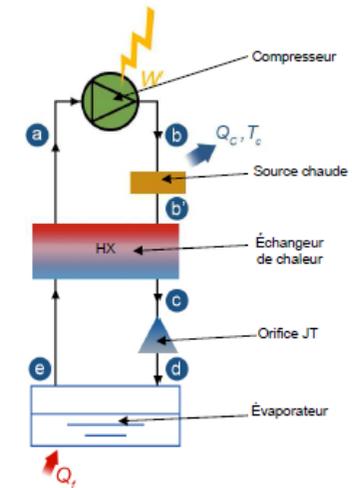
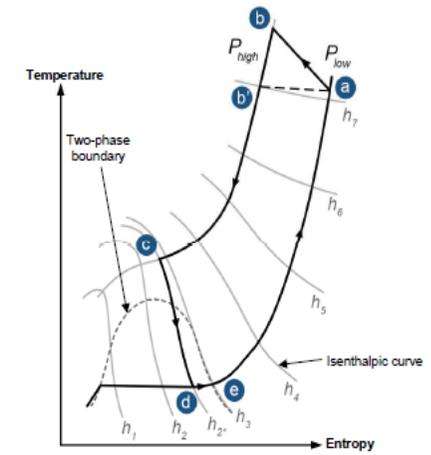
■ Radiateurs cryogéniques passifs

- Principe de base
 - *Le refroidissement est obtenu grâce à des échanges radiatifs vers des points plus froids de l'espace*
- On distingue deux types de radiateurs cryogéniques :
 - En orbite basse (missions d'observation de la terre), Le facteur de vue avec la Terre limite les performances et les tailles des radiateurs. Les températures ultimes atteignables : 80 K (Exemple : IASI)
 - Aux points de Lagrange ou en orbite très excentrique (missions d'astronomie), les structures de type V-grooves permettent d'atteindre des températures de 30 K
- Avantages:
 - Totalement passif
 - Pas de microvibrations induites
- Principaux inconvénients
 - Volume important
 - Puissance limitée notamment aux étages intermédiaires
 - Testabilité au sol



■ Cryorefroidisseurs mécaniques :

- Machines Joules-Thomson : principe de base *Cycle de compression/détente d'un écoulement fluide*
 - Fonctionnement complètement similaire à un réfrigérateur domestique
- Elles se composent d'au moins 5 éléments :
 - Une source de gaz haute pression (compresseur)
 - Un (des) puit(s) thermique(s) (source chaude)
 - Un (des) échangeur(s) à contre-courant
 - Une vanne ou orifice de détente. Cette détente brusque est théoriquement isenthalpique
 - Elle entraîne une chute de température et potentiellement la liquéfaction du fluide
 - Un évaporateur (partie froide du refroidisseur)
 - Equivalent d'un réservoir, fluide à l'équilibre diphasique. La chaleur évacuée par le doigt froid est la chaleur latente d'évaporation de la phase liquide.



■ Cryorefroidisseurs mécaniques

■ Machines Joule-Thomson

- La puissance de refroidissement étant due à un changement de phase :
- la température froide est naturellement stable
- la plage en température de fonctionnement dépend du fluide utilisé et peut être très restreinte.
- La plupart des JT spatiaux possèdent des points multiples de pré-refroidissements

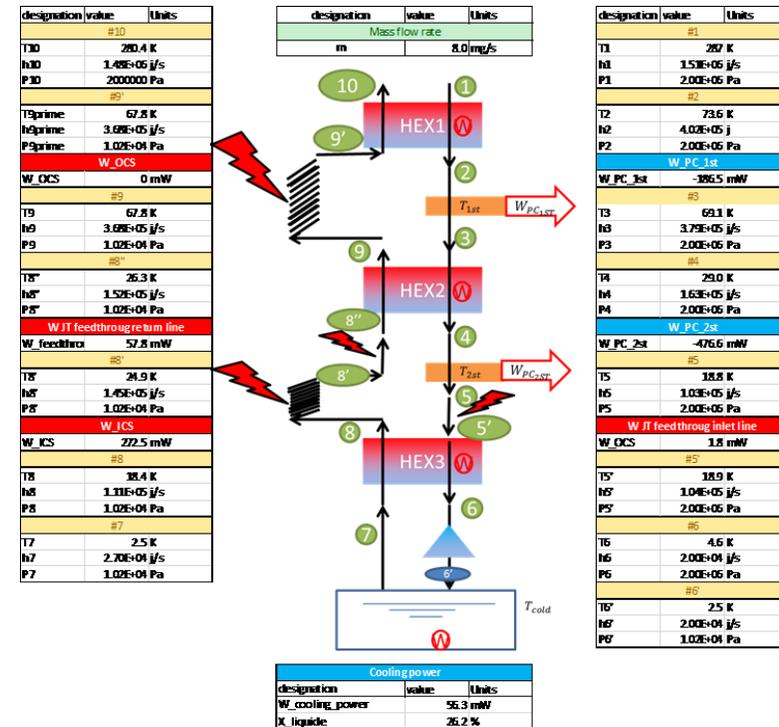
- Ils sont indispensables pour les JT fonctionnant avec des fluides à température d'inversion de Joule-Thomson plus basse que la température ambiante. la détente ne produit du froid qu'en dessous de cette température d'inversion

245 K pour dihydrogène

200 K pour néon

37 K pour Hélium 4

17K pour hélium 3



■ Cryorefroidisseurs mécaniques

■ Machines Joule-Thomson

■ Avantages

- Température stable
- Faible impact de la redondance
- Intégration relativement modulaire
- Relativement peu de vibrations au niveau du doigt froid

■ Inconvénients

- Faible intervalle de fonctionnement en termes de température en fonction des fluides utilisés
- Nécessite des points de prérefroidissement

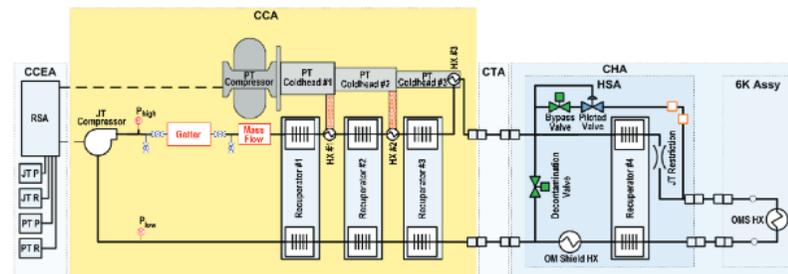
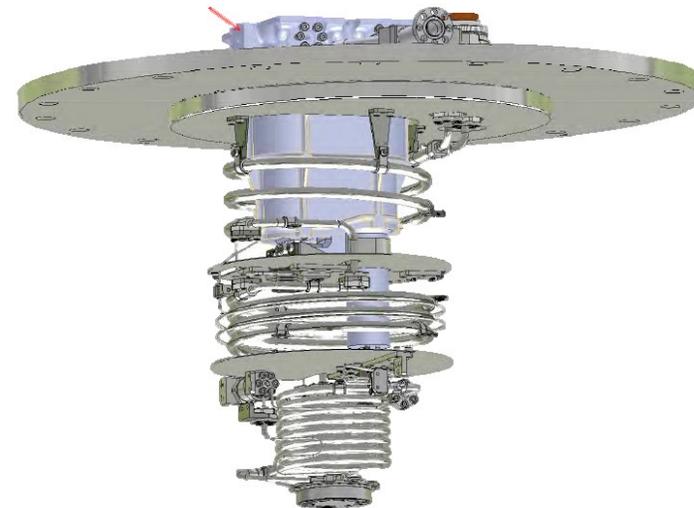


Figure 1. Functional block diagram of the entire MIRI Cryocooler system, highlighting the Cryocooler Compressor Assembly (CCA).

■ Machines cryogéniques

■ Machines Stirling et tubes à gaz pulsé

- *Machine basée sur un cycle de compression/détente d'un fluide oscillant*
 - *La détente est mécanique pour un stirling et pneumatique pour un pulse tube*

■ Avantages:

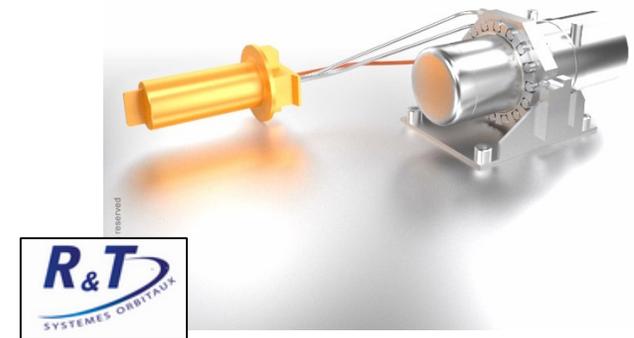
- Relativement efficace thermodynamiquement
- Démarrage depuis la température ambiante
- Large gamme de fonctionnement

■ Principaux inconvénients

- vibrations au niveau du compresseur et du doigt froid
- Sensible à la gravité (PT) pour les tests au sol
- Gros impact thermique en cas de redondance
- Intégration contrainte (distance compresseur-doigt froid)

■ Conseil d'utilisation

- En cas de redondance, travailler loin de la température limite du cryorefroidisseur



■ Cryorefroidisseurs mécaniques

■ Technologies non traitées

■ Machines Turbo-Brayton

- Manque de maturité

■ Refroidissement par effet Peltier

- Rendement insuffisant pour être intégrer à une chaine subkelvin

Technologies subkelvin

Réfrigération par désaimantation adiabatique

Principes de base

- *La réduction de champs magnétiques autour de sels paramagnétiques permet le refroidissement*

Avantages

Pas de limitations théoriques de la température de la source chaude
 Très grande efficacité thermodynamique (entre 30 et 50% du rendement de Carnot)

Inconvénients

Masse froide importante
 Champs magnétiques parasites, particulièrement durant les phases de recyclage
 Amenées de courant thermiquement pénalisantes sur les étages chauds
 Fonctionnement discontinu

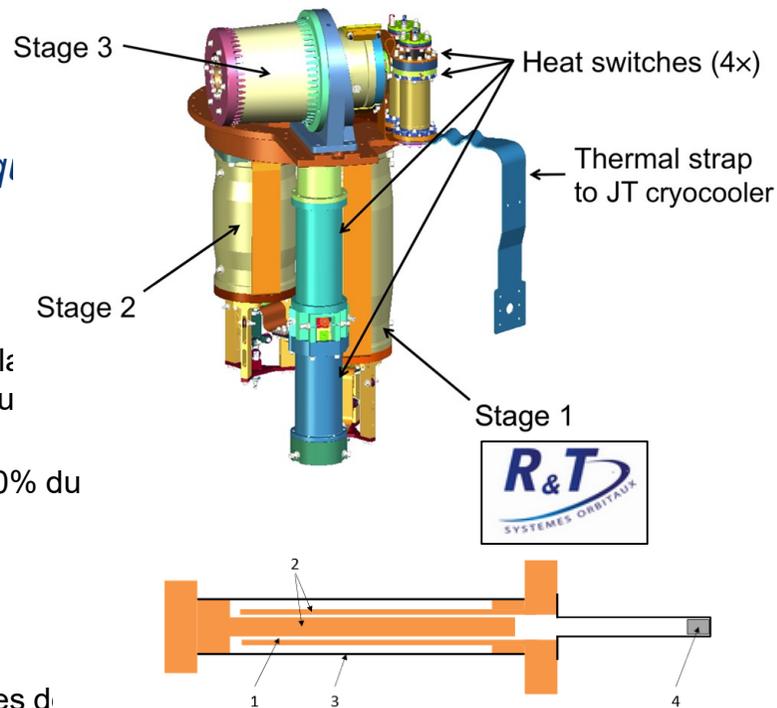
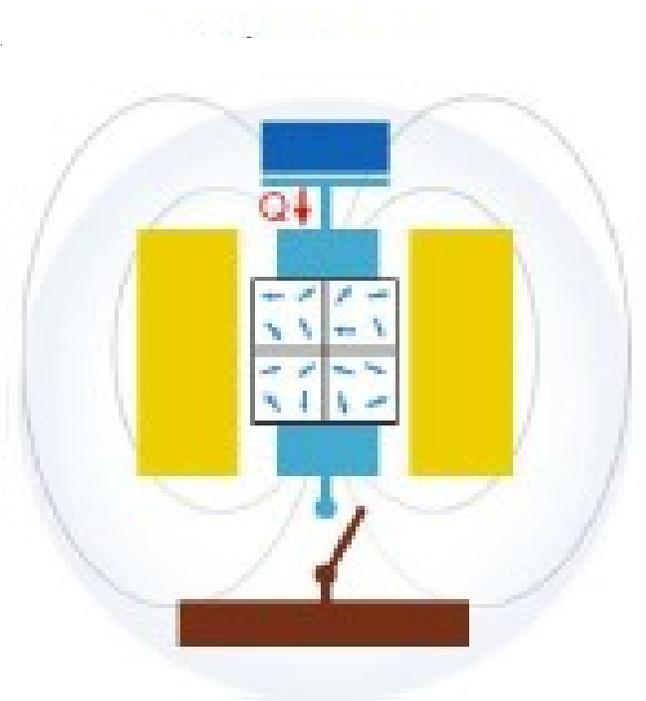


FIGURE 1.10 – Schéma d'un interrupteur thermique à gaz. 1 - gap, 2 - extrémités en cuivre, 3 - enveloppe isolant, 4 - mini-pompe avec chauffage.

Technologies subkelvin

■ Réfrigération par désaimantation adiabatique

- La désaimantation adiabatique est un transfert d'entropie "thermomagnétique"
- Le matériau réfrigérant est une collection de moments magnétiques (spins) orientés de façon aléatoire en champ magnétique nul (sels paramagnétiques).
- En augmentant le champ magnétique, les spins vont s'aligner dans le sens du champ. Cette opération est exothermique. Elle se fait à température constante (couplage à une source de température chaude).
- Les spins sont orientés. le champ magnétique est maximal on isole le matériau réfrigérant.
- On baisse le champ, les spins vont vouloir retourner à leur état d'orientation aléatoire.
- Les spins prennent de l'énergie du plan focal donc la température baisse.



Technologies subkelvin

■ Adsorption 3He ou 4He

■ Principe de base

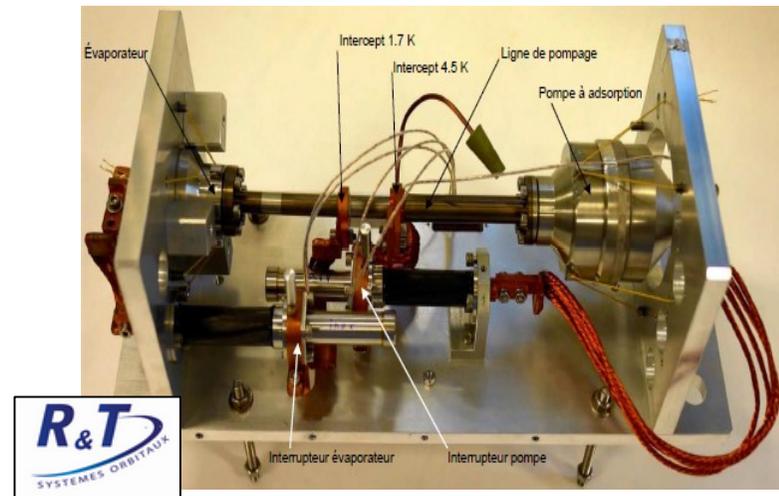
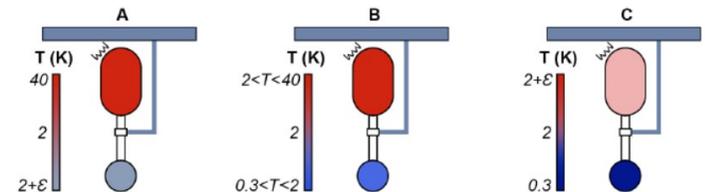
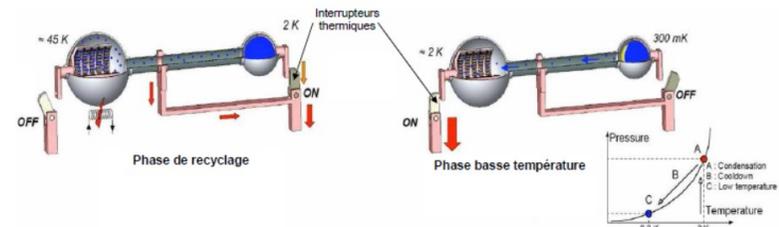
- *Refroidissement par pompage sur un volume fini d'un liquide par physisorption*

■ Avantages

Faible masse à froid
Pas de champs magnétiques parasites

■ Inconvénients

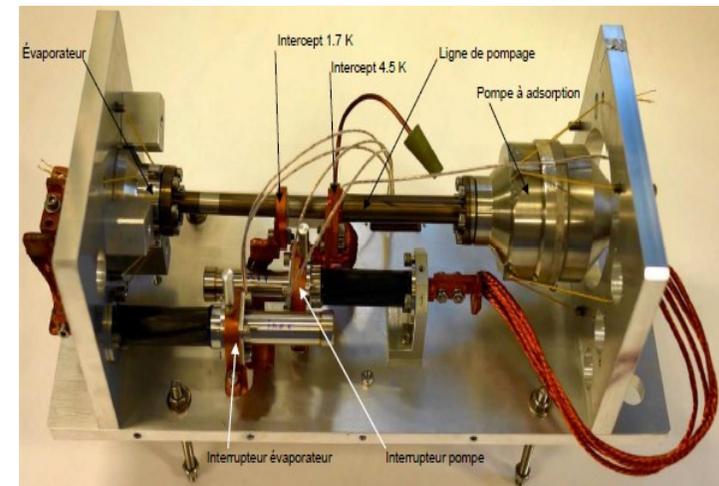
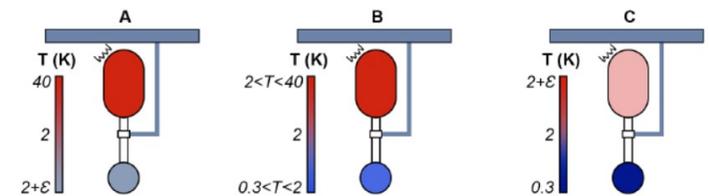
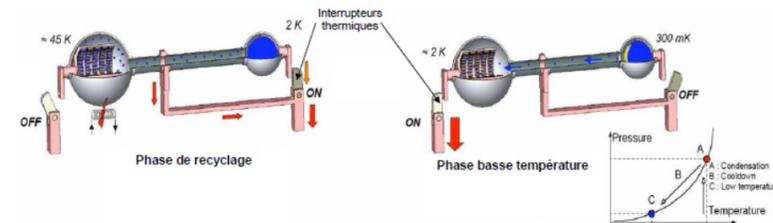
Nécessite une source chaude à une température inférieure à 3,2K (point critique de l'³He)
Fonctionnement discontinu
Température froide limitée (200-250mK)



Technologies subkelvin

■ Adsorption 3He ou 4He

- A l'équilibre diphasique, la température d'un liquide dépend de sa pression de vapeur saturante. En pompant cette dernière, le liquide refroidit.
 - Pour l'Hélium 4, on peut descendre jusqu'à environ 0.7 K.
 - Pour l'Hélium 3, on peut refroidir jusqu'à 0.2 K.
- Pour assurer le pompage, les refroidisseurs à adsorption tirent parti de la propriété des solides d'être capables de piéger des molécules de gaz à leur surface (à l'aide de charbons).
- Le refroidisseur décrit ici utilise la physisorption (en anglais, "Sorption cooler").



Technologies de refroidissement

Technologies subkelvin

Dilution spatiale en circuit fermé (CCDR)

Principe de base

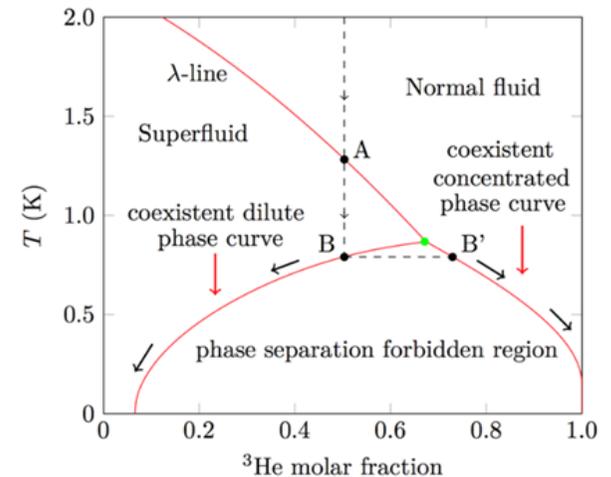
- *En dessous d'une certaine température, la dilution d'He3 dans l'He4 permet le refroidissement*

Avantages

Fonctionnement continu
 Possibilité d'intercepter les pertes à des températures supérieures
 Pas de champs magnétiques parasites
 Faible masse à froid
 Possibilité d'intercepter thermiquement les supports mécaniques entre 1,7K et la température minimale
 Technologies facilement exportable pour des puissances froides plus importantes (limitées uniquement par la capacité des compresseurs à chaud)

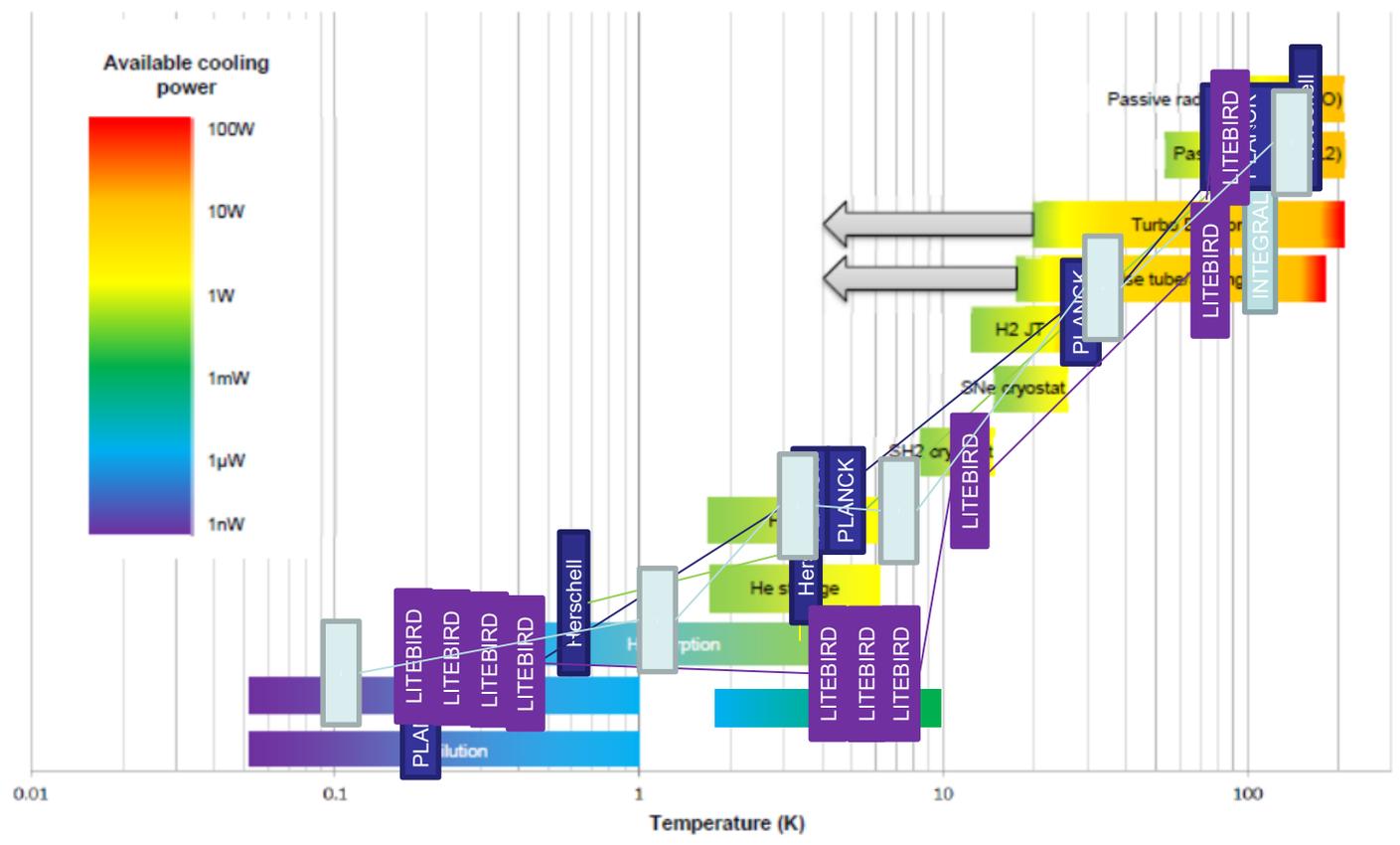
Inconvénients

Nécessite une source chaude à une température inférieure à 1,7K
 Faible maturité technologique
 Nécessite un compresseur basse pression à chaud



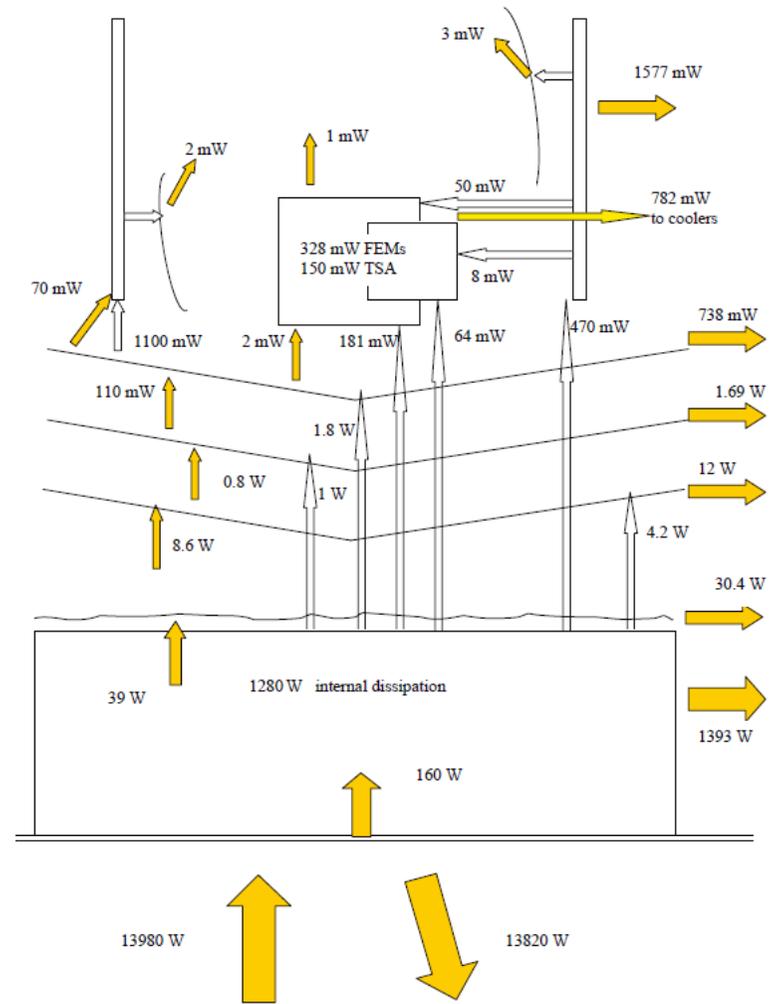
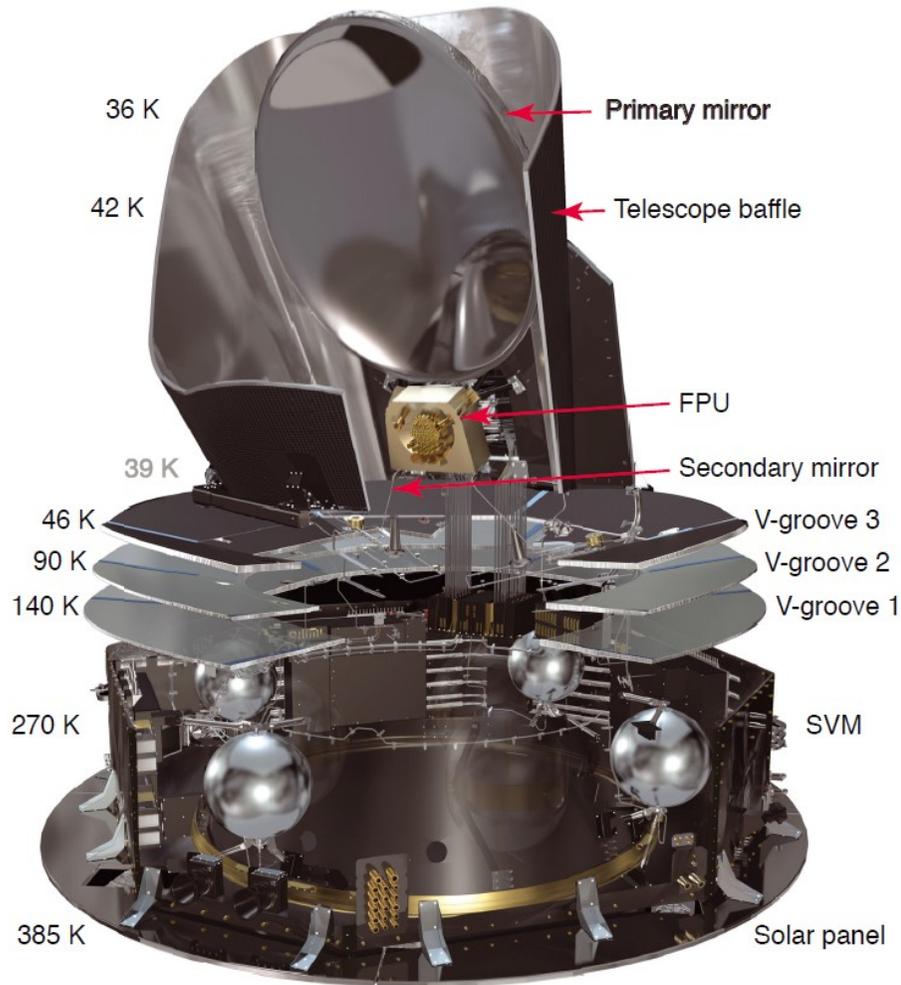
■ Exemples de chaînes cryogéniques

Cryogenic technologies versus temperature

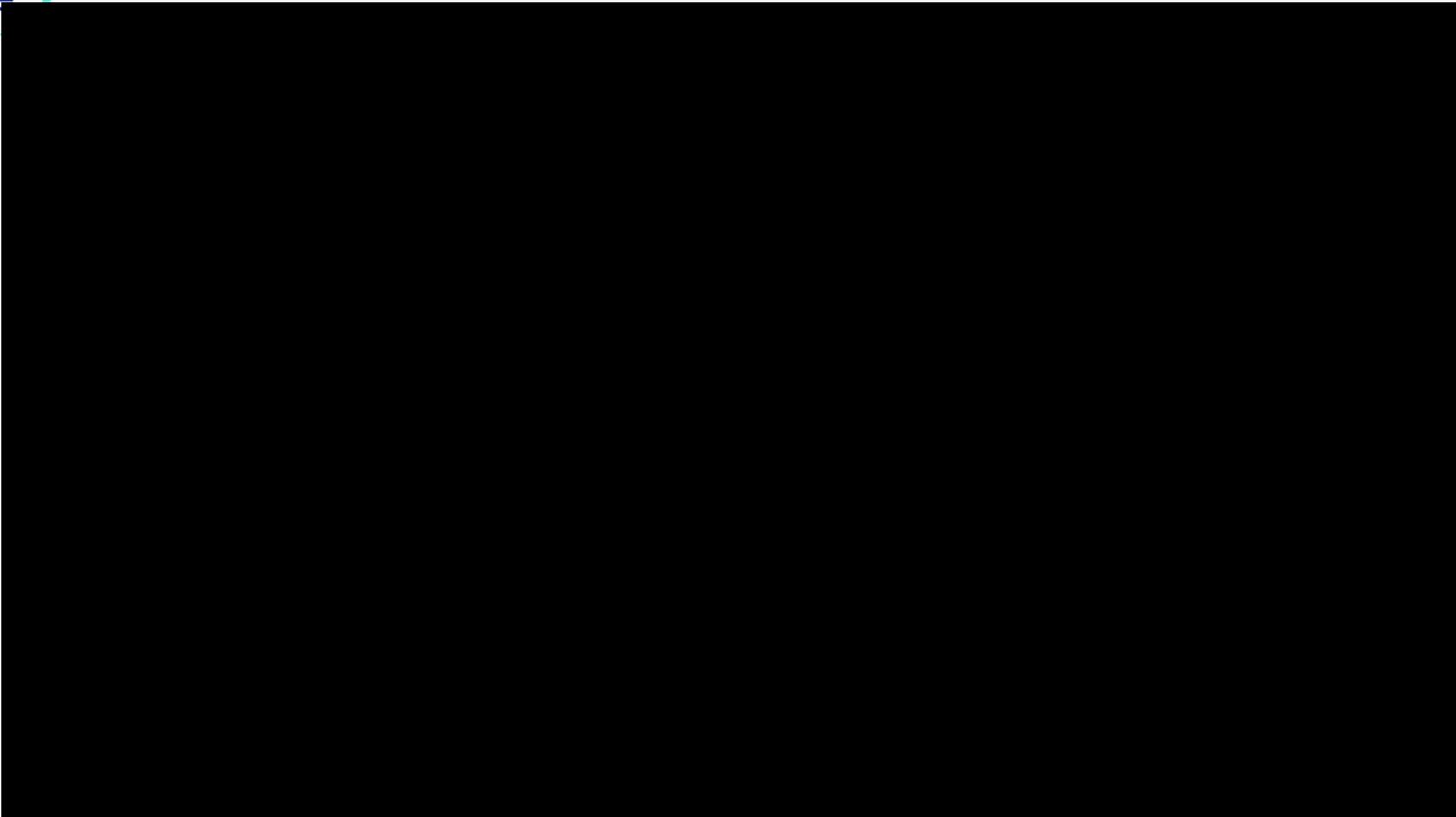


Mission planck : un cryostat purement spatial

- La mission qui tire le mieux parti des contraintes spatiales



Planck early results. II. The thermal performance of Planck[★]



<https://www.youtube.com/watch?v=I2NkTUnHaEI>