



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **BE9817 V1**

Réfrigération aux températures inférieures à 1 K

Date de publication :
10 avril 2015

Date de dernière validation :
28 mai 2021

Cet article est issu de : **Énergies | Froid industriel**

par **Lionel DUBAND, Philippe CAMUS**

Mots-clés

Refroidissement actif |
Cryogénie | Subkelvin |
Applications spatiales et sols |
Évaporation-adsorption |
Dilution | Désaimantation
adiabatique

Résumé Les développements en cryogénie ont été longtemps motivés par la recherche fondamentale : diminuer la température pour réduire l'agitation des atomes et avoir accès à des phénomènes autrement masqués. L'avènement d'applications « pratiques », avec comme moteur fort pour la cryogénie appliquée les applications spatiales, notamment dans le domaine subKelvin, a motivé la plupart des avancées technologiques. Cet article discute les trois technologies subKelvin majeures, le refroidissement par évaporation, le refroidissement magnétique et la dilution.

Keywords

active cooling | cryogenic |
subkelvin | space and ground
applications | evaporative
cooling-sorption | dilution |
adiabatic demagnetization

Abstract For decades technological developments at low temperature have been impelled by fundamental research: lowering temperature to reduce average kinetic energy of molecules and gain access to a variety of otherwise hidden phenomena. The advent of "practical" applications, particularly for space in the sub-Kelvin domain, has boosted most of the recent technological advances. This article focuses on the three main sub-Kelvin cooling solutions: evaporative cooling, adiabatic demagnetization and dilution refrigeration.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com

Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **07/06/2022**

Pour le compte : **7200048087 - ecole normale superieure de lyon // 140.77.179.219**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Réfrigération aux températures inférieures à 1 K

par **Lionel DUBAND**

*Directeur du Service des Basses Températures (SBT)
Université Grenoble Alpes, CEA INAC-SBT*

et **Philippe CAMUS**

*Ingénieur de recherche
Institut Néel – CNRS/UJF UPR 2940*

1. Évaporation hélium 4 ou hélium 3	BE 9 817 - 2
1.1 Principe physique	– 2
1.2 Dimensionnement	– 3
1.3 Systèmes multi-étagés	– 7
1.4 Applications particulières : le spatial	– 7
2. Désaimantation adiabatique	– 8
2.1 Principes physiques.....	– 8
2.2 Dimensionnement	– 9
2.3 Applications.....	– 10
3. Cryostat à dilution	– 11
3.1 Principes physiques.....	– 11
3.2 Architecture des cryostats à dilution.....	– 14
3.3 Réfrigérateur à dilution spatial : exemple du satellite Planck	– 17
4. Conclusion	– 18
Pour en savoir plus	Doc. BE 9 817

Une tendance forte dans les basses températures est la suppression des réservoirs de liquide cryogénique au profit des cryoréfrigérateurs mécaniques. Cette rupture technologique permet un gain de place, de masse, ne nécessite pas de fluides cryogéniques en termes de consommable et par conséquent, surtout pour le spatial, accroît considérablement la durée de vie des missions. Pour des températures extrêmement froides, plusieurs systèmes doivent être associés en cascade pour couvrir l'intégralité de la gamme de température. Les cryoréfrigérateurs mécaniques sont alors utilisés comme moyens de prérefroidissement et amènent des spécificités et contraintes supplémentaires : les puissances frigorifiques sont limitées et certains systèmes nécessitent par exemple une gestion des charges thermiques (pics de puissance). Par ailleurs, le froid est en général produit localement sur une interface en cuivre et des moyens de distribution de ces « Joules froides » peuvent être nécessaires. Enfin, les vibrations induites doivent être considérées pour éviter des échauffements aux très basses températures.

Cette tendance motive des développements sur tous les éléments de la chaîne cryogénique. On note de plus que cette approche s'applique aux besoins sur sites isolés pour lesquels la disponibilité de fluides cryogéniques comme l'azote liquide et a fortiori l'hélium liquide est difficile et/ou extrêmement coûteuse.

Cet article est limité au **domaine subkelvin**, c'est-à-dire aux systèmes capables de refroidir un objet à des températures inférieures à 1 K ($-272,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le refroidissement par boucle Joule Thomson hélium 3, qui permet en effet d'obtenir des températures sensiblement inférieures au kelvin, est également volontairement omis. Son principe est identique à une boucle fonctionnant avec l'isotope hélium 4 classique et la différence de performance provient des caractéristiques physiques particulières de l'hélium 3 (se reporter à l'article « Liquéfaction de l'hélium et réfrigération à l'hélium de moyennes et fortes puissances » [BE 9 816]). L'excursion en température se limite également à la **dizaine de millikelvin**. Les températures inférieures concernent le domaine des ultrabasses températures, un domaine a priori limité à quelques laboratoires dans le monde, et qui nécessiterait un article à lui seul tant les techniques utilisées sont complexes et difficiles à mettre en œuvre.

En pratique, trois technologies ou méthodes émergent :

- le **refroidissement par évaporation** utilisant les isotopes de l'hélium ;
- le **refroidissement magnétique** (désaimantation adiabatique) ;
- la **dilution** (propriété de la séparation de phase des deux isotopes de l'hélium).

Les deux premières méthodes sont des techniques dites *one shot* qui permettent d'obtenir de la puissance frigorifique à très basse température pendant une durée donnée. Au terme de cette durée, le système doit être recyclé à nouveau. L'efficacité est toutefois excellente en général, et le rapport durée à froid sur durée totale du cycle approche les 98 %, voire les 99 %. On peut cependant imaginer des arrangements qui permettent d'obtenir un fonctionnement en continu. Par exemple, en associant deux systèmes en parallèle, ou bien en série et en utilisant dans ce cas un des étages comme volant thermique pendant que l'autre étage est recyclé. Il est d'ailleurs possible de combiner les deux techniques. La dilution, quant à elle, est continue.

1. Évaporation hélium 4 ou hélium 3

1.1 Principe physique

Le refroidissement par évaporation est sans doute la technique la plus répandue : c'est une méthode universelle, pratiquée par tous les êtres humains et bon nombre d'espèces animales. En effet, il s'agit du même mécanisme physique qui nous permet de réguler la température de notre corps, la transpiration. Dans ce cas, le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur requiert de l'énergie ; en l'absence de source extérieure, cette énergie est ponctionnée directement sur l'agitation thermique des atomes et par conséquent, ce processus induit un refroidissement. Cette propriété s'étend quasiment à tous les fluides et, utilisée avec de l'hélium, elle permet d'obtenir des températures inférieures à 1 K. Évidemment, afin d'améliorer l'efficacité du processus, le taux d'évaporation est augmenté par pompage. La physique en jeu est liée aux états du fluide, qui dans sa phase liquide n'existe à l'équi-

libre que pour des couples pression-température bien définis, ce que l'on appelle le diagramme de phase et la courbe de pression de vapeur saturante. Tout écart à cette courbe se traduit par une augmentation ou une baisse de température (ou inversement de pression). Notons qu'il est possible d'obtenir des états hors équilibre (hélium supercritique ou sous critique par exemple) mais ils nécessitent une action extérieure (source froide, augmentation de pression).

Dans le cas qui nous intéresse, l'abaissement de pression au-dessus d'un bain hélium conduit à une évaporation et donc à un refroidissement. Qui dit évaporation dit perte de matière, et par conséquent une partie du bain va être consommée dans ce processus. La température ultime que l'on peut obtenir dépend des conditions finales de pression au-dessus du bain. Les courbes de pression de vapeur saturante des deux isotopes de l'hélium (figure 1) permettent de déterminer ces états d'équilibre. On constate que les deux héliums ont des propriétés différentes. En particulier à pression équivalente, l'hélium 3 liquide est sensiblement plus froid que l'hélium 4. Son utilisation permet donc d'obtenir des températures beaucoup plus basses. En pratique, ces températures sont limitées à environ 750 et 240 mK respectivement pour l'hélium 4 et 3.

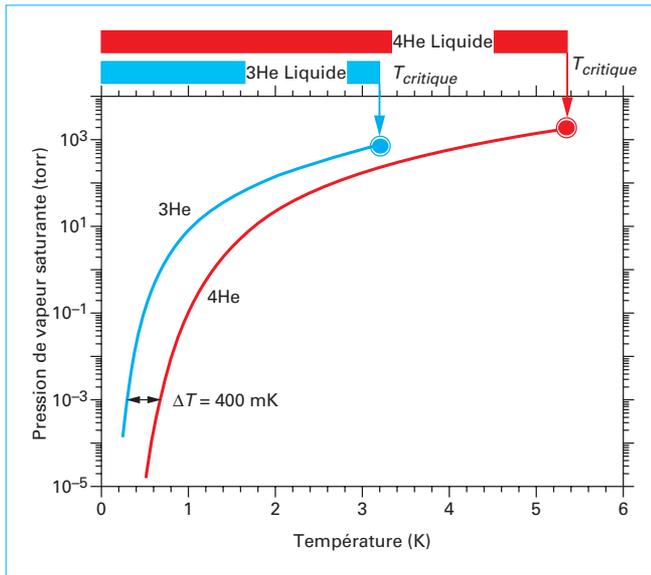


Figure 1 – Pression de vapeur saturante de 4He et 3He

1.2 Dimensionnement

1.2.1 Quantité d'hélium et fraction perdue lors du pompage

L'état initial du système est une masse m d'hélium liquide à une température T_i , avec un objectif de descente en température à T_f . La température T_f doit nécessairement être inférieure à la température critique afin que la phase liquide existe (figure 1, 5,2 et 3,32 K, respectivement pour l'hélium 4 et 3). On s'intéresse dans un premier temps à l'évolution du bain lors du pompage. Les équations associées sont simples : chaque quantité de matière dm qui s'évapore requiert une énergie Ldm , où L en J/kg est l'enthalpie d'évaporation massique à la température considérée ($dm \ll m$). Cette énergie est prise sur le bain et conduit à un abaissement de sa température suivant $mC_p dT$, où C_p en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ est la capacité thermique massique de l'hélium liquide à la température considérée.

On a ainsi :

$$Ldm = mC_p dT$$

que l'on réécrit :

$$\frac{dm}{m} = \frac{C_p}{L} dT$$

soit

$$R_{T_f}(T_i) = \frac{m_{T_f}}{m_{T_i}} = \exp \left[\int_{T_i}^{T_f} \frac{C_p}{L} dT \right] \quad (1)$$

avec $R_{T_f}(T_i)$ (%) quantité résiduelle de liquide.

Attention, les autres capacités thermiques (mC_p) mises en jeu (matériaux cryostat, expérience à refroidir, etc.) sont négligées par rapport à celle de l'hélium, et par ailleurs le temps de refroidissement (pompage) et/ou les pertes propres du système, sont suffisamment petites pour négliger le terme associé. Ces deux hypothèses sont en général correctes au premier ordre.

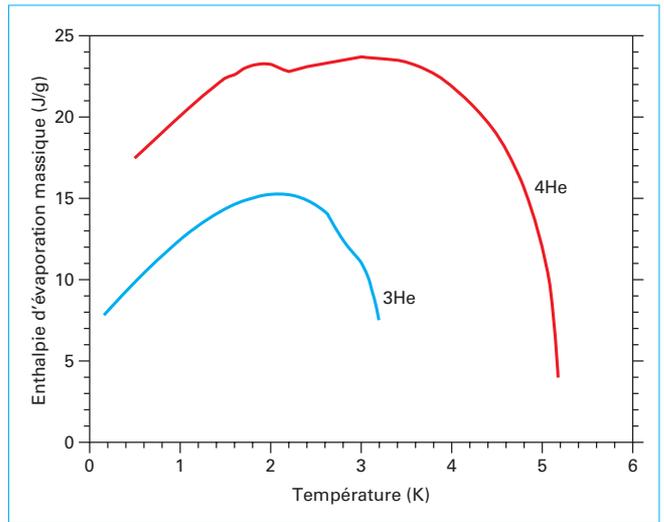


Figure 2 – Enthalpie d'évaporation massique de 4He et 3He

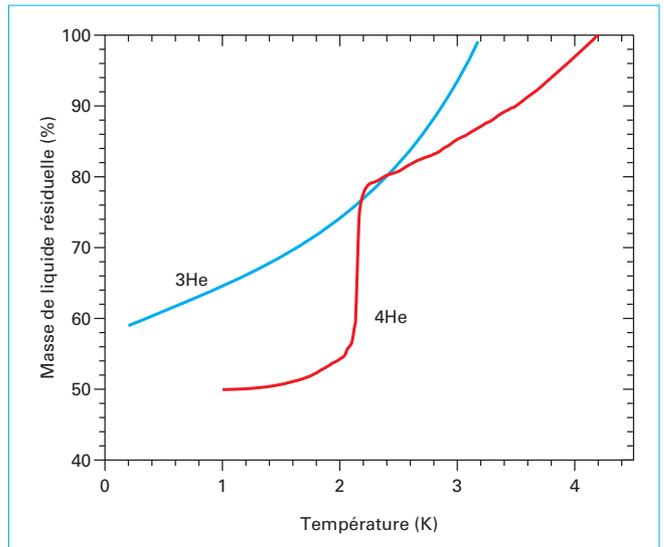


Figure 3 – Masse résiduelle de liquide après pompage d'un bain 4He ou 3He à partir de la température d'ébullition

Les enthalpies d'évaporation et capacités thermiques massiques des deux héliums sont connues (figure 2). On peut en produire une description mathématique, et par conséquent, l'équation précédente s'intègre entre la température initiale T_i et la température finale T_f .

On peut ainsi déterminer la **quantité résiduelle de liquide $R_{T_E}(T)$ à la température T pour des températures initiales correspondant à la température d'ébullition sous pression atmosphérique** (respectivement 3,2 et 4,2 K) (figure 3). Pour une température initiale plus basse (T_B), il est aisé à partir de ces courbes de déterminer la quantité résiduelle à une température T en écrivant simplement :

$$R_{T_B}(T) = \frac{R_{T_E}(T)}{R_{T_E}(T_B)} \quad (2)$$

Tableau 1 – Propriétés des isotopes de l’hélium

Propriété	4He	3He
Température d’ébullition à P_n (K)	4,2	3,2
Point critique..... (K/10 ⁵ Pa)	5,2/2,23	3,32/1,16
Enthalpie d’évaporation massique à $T_{éb}$ (J/g)	21	8,44
Enthalpie d’évaporation massique..... (J/g)	18,7 à 750 mK	8,3 à 240 mK
Masse volumique du liquide à $T_{éb}$(g/cm ³)	0,125	0,058
Viscosité du gaz à $T_{éb}$(μPa · s)	1,3	1,2

$T_{éb}$: température d’ébullition.
 P_n (pression normale) = 1 atm.

On remarque la forme particulière de la courbe 4He, pour laquelle la perte subite de liquide correspond à l’anomalie de capacité thermique massique associée à la transition superfluide à 2,17 K. L’obtention de températures inférieures à 2 K à partir d’un bain à pression atmosphérique (4,2 K) consomme pratiquement la moitié de ce bain.

On obtient ainsi la masse de liquide après pompage et donc la quantité d’énergie disponible pour les expériences à mener. La connaissance du flux thermique Q (pertes propres et dissipations en watt) sur le bain permet de déterminer son autonomie t :

$$t = \frac{mL}{Q} \tag{3}$$

Quelques valeurs numériques utiles sont reportées dans le tableau 1.

Une fois encore, il faut considérer le cas particulier de l’hélium 4 pour lequel, au-dessous de 2,17 K, apparaît une phase superfluide aux propriétés étonnantes [BE 9 812]. Une propriété en particulier peut impacter le dimensionnement des bains pompés. En effet, au-dessous de 2,17 K, apparaît un film d’hélium **superfluide**, connu sous le nom de **film de Rollin**, qui a la propriété de monter le long des parois du cryostat et de la ligne de pompage, pour s’évaporer lorsque la température devient supérieure à 2,17 K. Évidemment une fois évaporé, l’hélium s’évacue au travers de la ligne de pompage et conduit donc à une perte en masse continue sur le bain. Ce terme ne doit pas être négligé et peut contribuer de façon dramatique aux pertes, puisque l’enthalpie d’évaporation associée est perdue. On dispose fort heureusement de solutions techniques pour en limiter les effets. La plus répandue consiste à intégrer dans la ligne de pompage un diaphragme. En effet, l’épaisseur du film de Rollin est sensiblement constante et on comprend alors que le débit est proportionnel au périmètre mouillé. Un diaphragme permet de le réduire, tout en limitant la perte de charge dans la ligne.

Cette remarque nous amène naturellement à considérer la température minimale accessible. Elle est conditionnée :

- en premier lieu, par la pression au-dessus du bain (P_{bain}), et donc par la performance de la ligne de pompage et de la pompe ;
- en second lieu, par la résistance thermique entre le liquide et les parois du récipient (en général du cuivre).

Cette résistance, notée **résistance de Kapitza**, introduit un gradient de température et peut conduire à des écarts significatifs entre la température du liquide et la température pratique accessible à l’utilisateur.

1.2.2 Ligne de pompage

Cet article n’a pas vocation à développer la physique des écoulements gaz et les équations de pertes de charge. Nous pouvons

cependant établir quelques formules simplifiées qui vont nous permettre d’obtenir une valeur approchée de la température que l’on peut obtenir par pompage. Considérons une ligne de pompage de longueur L et diamètre ϕ . La charge thermique sur le bain génère un débit-masse \dot{m} et la **perte de charge** ΔP en Pa induite par la ligne est donnée par :

$$\Delta P = \frac{\dot{m}P}{\rho C} \tag{4}$$

avec C ($m^3 \cdot s^{-1}$) conductance de la ligne de pompage,
 ρ ($kg \cdot m^{-3}$) densité.

Le libre parcours moyen λ des molécules de gaz définit **trois régimes** :

- **moléculaire** si λ est très supérieur au diamètre de la ligne ;
- **visqueux** s’il est très inférieur ;
- **intermédiaire** entre les deux.

Dans l’hypothèse d’un gaz parfait (raisonnable aux basses pressions) et en prenant une température moyenne pour la ligne, on peut montrer que la pression sur le bain s’écrit (en unité SI) :

– pour le régime moléculaire :

$$P_{bain} = \frac{7\dot{m}L}{\phi^3} \sqrt{\frac{T}{M}} + P_0 \tag{5}$$

– pour le régime visqueux :

$$P_{bain} = \sqrt{\frac{0,4115 \dot{m}L\eta T}{\phi^4 M} + P_0^2} \tag{6}$$

avec P_0 (Pa) pression en bout de ligne côté pompe,
 η ($Pa \cdot s^{-1}$) viscosité du gaz,
 M ($kg \cdot mol^{-1}$) masse molaire.

En pratique, le régime est en général intermédiaire ou visqueux. On constate que la perte de charge augmente avec la température, et par conséquent pour des systèmes avec pompage à température ambiante, on réalise une **succession de tronçons de diamètres croissants**.

Ces équations permettent d’obtenir des valeurs de température relativement proches de résultats issus de modèles prenant en compte les gradients thermiques et l’intégration par sections de ligne successives. Une des raisons provient également du fait que la pression de vapeur saturante varie exponentiellement avec la température : une erreur sur la valeur de P conduit à une erreur minime sur T . Inversement, au fur et à mesure que la température diminue, un gain ΔT additionnel sur la température nécessite un gain sur la pression de plus en plus conséquent.

En pratique, les températures minimales accessibles sur un système optimisé sont de 750 et 240 mK, respectivement pour 4He et 3He. On peut montrer que la température ultime serait de l'ordre de 160 à 180 mK pour 3He ; à ce niveau de température, la désaimantation adiabatique ou la dilution sont des solutions plus adaptées et en pratique les plus basses températures obtenues expérimentalement avec des systèmes à évaporation sont 237 mK [1] et 204 mK [2]. Obtenir ce niveau de performance nécessite d'avoir une pompe extrêmement efficace. Cela peut être obtenu avec des **pompes à adsorption utilisant du charbon actif** [3]. On bénéficie alors de deux facteurs, une capacité de pompage excellente (P_0 faible) et un fonctionnement de la pompe à température cryogénique, typiquement 5 K pour l'hélium, qui permet de réduire considérablement les pertes de charge [équations (5) et (6)]. La géométrie de l'ensemble se réduit à son expression la plus simple, une pompe, un condenseur, un évaporateur et une ligne reliant ces éléments. Aucune tuyauterie externe n'est requise et le système est simplement piloté grâce à une résistance électrique qui permet de chauffer la pompe à adsorption pour désorber l'hélium et le condenser une fois que la pression de vapeur saturante à la température du condenseur est atteinte (figure 4, point A). L'hélium tombe par gravité dans l'évaporateur et peut être ensuite pompé en refroidissant simplement la pompe à adsorption grâce au lien thermique qui la relie à la source froide (figure 4, point B-C). Ce type de système peut donc être extrêmement compact et facile à intégrer.

1.2.3 Pompage par adsorption

La capacité d'adsorption des charbons actifs est en général décrite par les isothermes d'adsorption : pour différentes températures, on reporte la quantité de gaz adsorbé par gramme de charbon en fonction de la pression. Il existe de multiples théories permettant de les prédire mais en pratique, et pour l'hélium, on utilise les travaux de P. Roubeau [4] sur les isothermes d'adsorption. Il propose la description mathématique suivante :

$$\lg P = [153 \lg (C + 112) - 450] \left(\frac{1}{T} - 0,016 \right) + 1,9 + \lg C \quad (7)$$

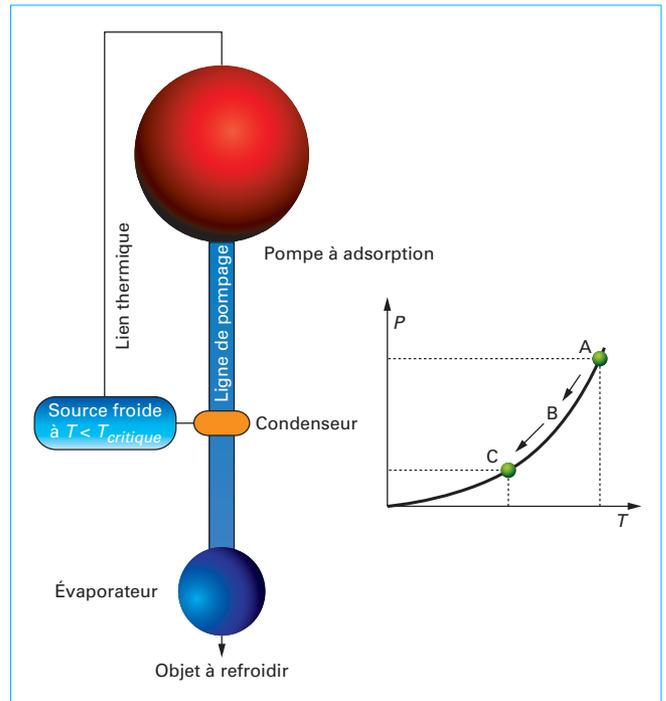


Figure 4 – Principe d'un réfrigérateur hélium à adsorption

où P la pression est en torr (mmHg) et C , la quantité adsorbée, en cm^3 TPN d'hélium par gramme de charbon actif.

Nota : les conditions normales de pression et température TPN sont $T = 0^\circ\text{C}$ et $P = 1 \text{ atm}$.

Le cycle décrit au paragraphe précédent est représenté sur la figure 5 (tireté vert).

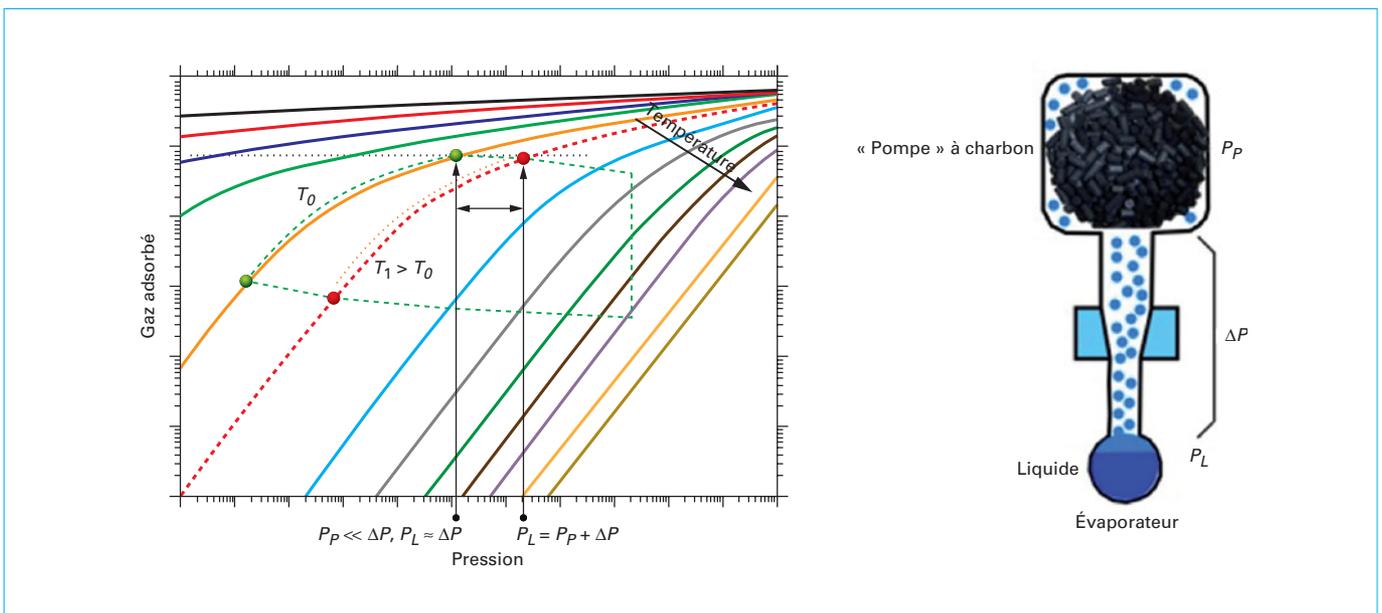


Figure 5 – Cycle d'un réfrigérateur à adsorption

Le dimensionnement de la pompe à adsorption doit être réalisé pour qu'en première approximation, on puisse considérer que sa pression interne P_0 est nulle, ou en tout cas très inférieure à la perte de charge ΔP due à la ligne, et ce, quel que soit le taux de remplissage des charbons actifs. C'est d'ailleurs un critère de bon dimensionnement du système, qui permet de garantir la stabilité en température (figure 5).

Dans un cycle idéal, lorsque la dernière goutte de liquide est évaporée, la pression dans la pompe reste très inférieure à ΔP . Lorsque l'adéquation quantité de gaz, masse de charbon n'est pas correcte, la pression dans la pompe en fin de cycle devient du même ordre de grandeur que ΔP , par conséquent la pression au sein de l'évaporateur croît et la température dérive à la hausse (figure 5, tireté rouge). Ce comportement peut être utilisé pour réguler la température de l'évaporateur. Cette régulation peut être faite en appliquant directement de la puissance sur l'évaporateur, au détriment bien sûr de l'autonomie du système, et par ailleurs sur une gamme de température limitée (au-delà de laquelle les puissances requises deviennent prohibitives pour le fonctionnement du système), ou bien justement en augmentant la pression dans la pompe par simple chauffage de cette dernière. Le bénéfice est double puisqu'outre une absence d'impact sur l'autonomie – qui en réalité augmente puisque l'enthalpie d'évaporation de l'hélium croît – cette méthode permet de réguler sur une gamme étendue.

Une caractéristique importante du pompage par adsorption est son caractère exothermique (perte de degrés de liberté des molécules piégées). Chaque quantité de gaz évaporée puis adsorbée au sein des charbons actifs va générer un échauffement et donc un transfert de chaleur entre la pompe et sa source froide. L'énergie associée représente en réalité une des contributions majeures au bilan thermique et donc au calcul de rendement de ces machines. Cette chaleur d'adsorption peut être extraite des isothermes d'adsorption [3] en utilisant une **équation de type Clausius-Clapeyron** (unités SI) :

$$L_a = -R \left(\frac{\partial (\ln P)}{\partial (1/T)} \right)_C \quad (8)$$

avec L_a (J/mol) chaleur molaire d'adsorption isostérique (C constant),

R ($J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) constante molaire des gaz.

Au fur et à mesure que les sites les plus énergétiques au sein du charbon actif se peuplent, la chaleur d'adsorption décroît. L'accord entre cette chaleur calculée à partir des isothermes d'adsorption et les mesures expérimentales est relativement bon. D'un point de vue pratique et sous réserve que l'on soit dans le premier tiers du cycle, on peut utiliser le résultat expérimental suivant : chaque μW dissipé sur l'évaporateur hélium 3 (300 mK) génère environ $45 \mu W$ au niveau de la pompe. Dans le cas d'un système hélium 4, ce chiffre est de l'ordre de 14. Cette caractéristique peut être mise à profit pour obtenir une estimation des **pertes thermiques propres du système**. En effet, en mesurant la chaleur dissipée à la pompe, on peut directement en déduire la chaleur dissipée sur l'évaporateur. Pour obtenir une valeur plus approchée des pertes propres, on réalise plusieurs mesures d'autonomie sous différentes charges appliquées, dans les mêmes conditions de recyclage (figure 6).

1.2.4 Résistance de Kapitza

À basse température, on constate une différence de température entre l'hélium liquide et la paroi soumise à un transfert de chaleur. On appelle **résistance de Kapitza** (en $K \cdot W^{-1}$) le rapport :

$$R_K = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (9)$$

La théorie de Khalatnikov [5] explique cette discontinuité de la température par la désadaptation des impédances acoustiques entre les deux milieux. Pour les faibles différences de températures, elle prédit une dépendance de la résistance en T^3 . La surface d'échange S intervient également et on peut écrire :

$$R_K S T^3 = R_{Km} \quad (10)$$

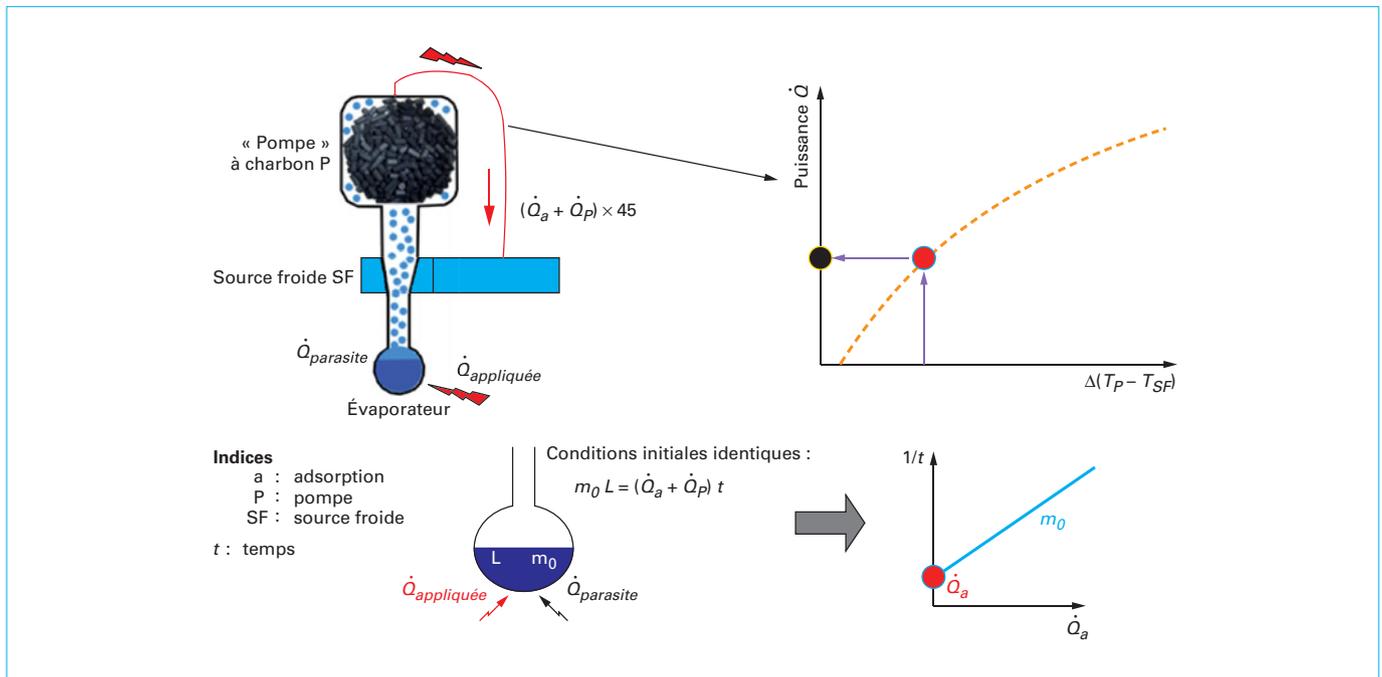


Figure 6 – Détermination des pertes parasites

R_{Km} ($K^4 \cdot m^2 \cdot W^{-1}$) est une constante qui dépend des matériaux en contact et de l'état de surface. Les mesures ne confirment pas quantitativement cette théorie. Néanmoins, l'évolution en loi de puissance est confirmée dans de nombreux cas. On veille donc à maximiser la surface S pour limiter ΔT .

1.3 Systèmes multi-étagés

Pour un système 3He, la nécessité d'avoir une source froide à une température inférieure à 3,2 K peut être un facteur limitant. Cette température est à la limite des capacités des cryoréfrigérateurs mécaniques actuels et ne peut être obtenue essentiellement qu'à partir d'un bain 4He pompé. On peut toutefois utiliser une architecture thermique simple en associant un **premier étage 4He** qui peut fonctionner à partir de 5,2 K, et qui permet de fournir une température inférieure à 2 K pour un second étage 3He (figure 7).

Des systèmes ont aussi été déclinés en **tri-étagés** suivant 4He/3He/3He (figure 8) pour disposer d'un dernier étage dont les pertes thermiques par conduction sont écartées par les étages supérieurs et permettre ainsi l'obtention de température proche de 200 mK. La contribution majeure aux pertes thermiques est en général la ligne de pompage. Son dimensionnement conditionne la taille du système pour l'autonomie recherchée. Il faut alors trouver le compromis entre une ligne de petit diamètre, de faible épaisseur de parois et de bonne longueur induisant *de facto* des pertes de charge et donc une température limite plus élevée, ou son contraire.

1.4 Applications particulières : le spatial

1.4.1 Contraintes spécifiques

À l'environnement spatial sont associées des contraintes spécifiques dont la résistance mécanique liée au décollage, l'absence de gravité et la fiabilité sont parmi les plus critiques. En particulier pour satisfaire la contrainte de fiabilité ou la nécessité de garantir des fonctionnements sans panne sur des durées typiquement de 5 à 10 ans, la solution est si possible de développer des systèmes dotés de pièces mobiles sans frottement, voire dépourvus de pièces en mouvement. Le choix des pompes à adsorption s'impose alors naturellement. Par ailleurs, la microgravité nécessite une gestion appropriée des phases liquides. En pratique, condenseur et évaporateur sont confondus et le confinement du liquide est assuré par attraction capillaire dans un matériau poreux au sein de l'évaporateur. La double fonction condenseur-évaporateur requiert un interrupteur thermique qui va permettre le couplage thermique avec la source froide (condenseur) et ensuite le découplage (évaporateur). Un autre interrupteur est en général également utilisé sur la pompe pour améliorer l'efficacité thermodynamique du cycle (figure 9).

Cette architecture thermique a été utilisée sur le **satellite HERSCHEL** de l'agence spatiale européenne. Cet observatoire spatial destiné à étudier la naissance des étoiles et l'évolution des galaxies, a embarqué trois instruments scientifiques dont deux, PACS et SPIRE, étaient équipés d'un système adsorption 3He pour le refroidissement des détecteurs bolométriques à 300 mK (figure 10) [6]. Ces deux systèmes ont fonctionné sans panne et de manière reproductible pendant la durée de vie de la mission, soit quasiment 4 années en orbite.

1.4.2 Interrupteur thermique à gaz d'échange

Différents types d'interrupteur thermique peuvent être utilisés et l'interrupteur à gaz d'échange reste le plus communément employé en raison de sa simplicité et de son absence de pièce mobile. Il est constitué de deux pièces en cuivre séparées par un

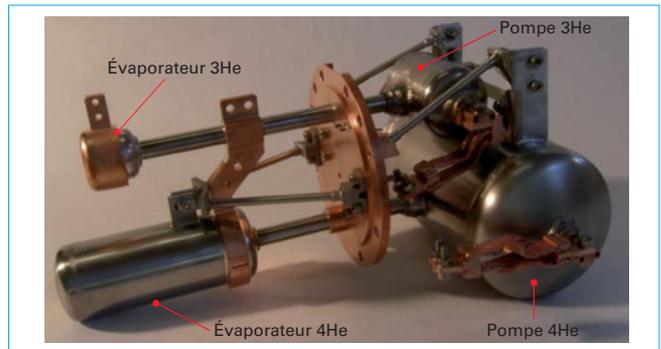


Figure 7 – Système bi-étagé installé sur la caméra ARTEMIS du télescope APEX (Atacama Chili) (doc. INAC/SBT CEA Grenoble)



Figure 8 – Système tri-étagé 240 mK installé sur l'expérience BICEP2/KECK pour le refroidissement de bolomètres, pour la détection des ondes gravitationnelles (Base Amundsen-Scott – Antarctique) (doc. INAC/SBT CEA Grenoble)

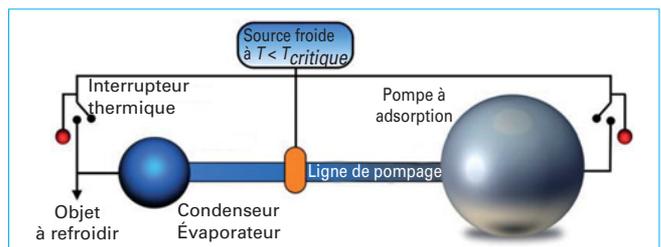


Figure 9 – Schéma de principe d'un système adsorption spatial

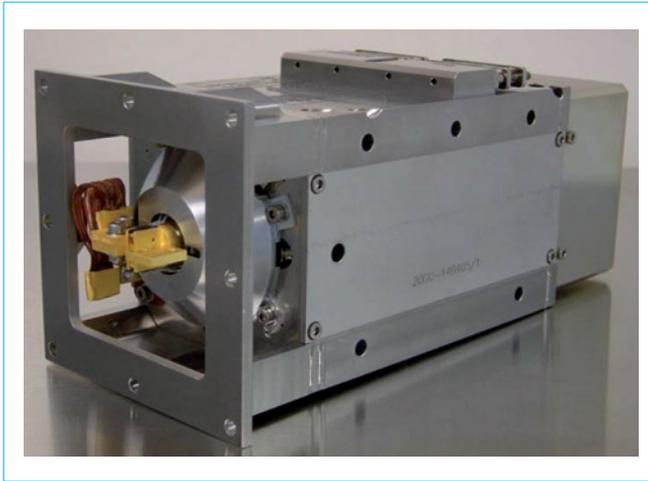


Figure 10 – Cryoréfrigérateur 300 mK. Instruments SPIRE et PACS du satellite HERSCHEL (doc. INAC/SBT CEA Grenoble)

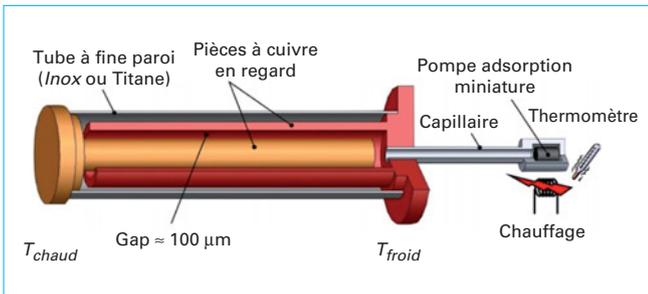


Figure 11 – Schéma de principe d'un interrupteur thermique à gaz d'échange, avec pompe miniature à adsorption

espace limité, par exemple un barreau cylindrique et un tube imbriqués l'un dans l'autre (géométrie la plus répandue). Les deux pièces ne se touchent pas directement et sont maintenues entre elles par un tube fine paroi constitué d'un matériau très mauvais conducteur de la chaleur (acier inox, titane allié, composite...). En position ouverte, le transfert de chaleur entre les deux pièces cuivre s'effectue au travers du tube fine paroi : la géométrie et le choix du matériau limitent ce transfert. On note d'ores et déjà que cette solution présente l'inconvénient d'avoir une position ouverte non nulle ; toutefois dans la plupart des cas, elle est acceptable. Pour basculer l'interrupteur en position fermée, on introduit du gaz entre les deux pièces cuivre : le transfert de chaleur va donc s'effectuer *via* ce gaz d'échange. Dans le régime le plus favorable, c'est-à-dire visqueux, le transfert est proportionnel à la surface d'échange et inversement proportionnel à la distance séparant les deux pièces (d'autres termes interviennent bien sûr dans ce transfert, mais la distance ou gap est le paramètre critique). Typiquement, cette distance est de l'ordre de 100 μm ou moins. La présence ou l'absence de gaz est gérée par une minipompe à adsorption (figure 11).

À titre d'exemple, pour un interrupteur de diamètre 8 mm et de longueur 60 mm, les conductances ON/OFF (fermé/ouvert) sont typiquement de 40 mW/K et 5 $\mu\text{W/K}$ à 2 K respectivement.

On note l'intérêt d'utiliser de l'hélium 3 comme gaz d'échange, qui présente une conductivité thermique bien supérieure à celle de l'hélium 4 dans cette gamme.

2. Désaimantation adiabatique

2.1 Principes physiques

La réfrigération peut être approchée en termes de processus de réduction d'entropie. L'entropie est une fonction monotone de la température et d'autres paramètres variables. Notons par exemple X un tel paramètre. On constate sur la courbe ci-après (figure 12) que l'on peut imaginer une succession de processus qui va permettre d'abaisser la température. On remarque sur cette courbe que, en accord avec le troisième principe de la thermodynamique, l'entropie tend vers zéro lorsque la température tend vers le zéro absolu, ce qui illustre la difficulté à produire des très basses températures.

Cette approche prend tout son sens pour la réfrigération magnétique où le paramètre X est le **champ magnétique**. Considérons un **sel paramagnétique**, composé qui contient des ions possédant un moment magnétique lié à leur spin (remplissage incomplet des dernières couches électroniques). Bien au-dessus de sa température de Néel, les interactions magnétiques entre les ions sont beaucoup plus faibles que les fluctuations thermiques, et l'absence d'ordre conduit à une absence d'aimantation spontanée. On comprend d'emblée le sens de la **température de Néel** : à l'approche de cette température, les interactions magnétiques prennent le pas sur l'agitation thermique, les dipôles s'ordonnent et le matériau ne peut plus être utilisé pour les besoins de la réfrigération subkelvin.

En revanche, au-dessus de $T_{Néel}$, l'application d'un champ magnétique extérieur va ordonner les moments et par conséquent réduire l'entropie magnétique. Si le sel est isolé thermiquement, son entropie globale doit rester constante et nous avons ainsi un transfert entre l'entropie magnétique, qui diminue, et l'entropie thermique, qui forcément s'accroît. En d'autres termes, le sel s'échauffe (effet magnétocalorique). Si le sel est couplé thermiquement à une source froide, cette chaleur est évacuée à température constante. Si ensuite, on isole thermiquement le sel et que l'on diminue le champ magnétique, on obtient l'effet inverse : les dipôles reprennent des orientations aléatoires sous l'effet de l'agitation thermique, l'entropie magnétique augmente et *de facto* l'entropie thermique diminue. On obtient ainsi un abaissement de la température. C'est ce que l'on appelle une **désaimantation adiabatique**. Ce cycle est représenté sur la figure 13 où sont reportées en fonction de la température, les courbes d'entropie pour différents champs magnétiques. L'entropie réduite est une quantité adimensionnelle donnée par le rapport S/R ou R est la constante des gaz parfaits.

Nota : le champ magnétique est le champ B exprimé en Tesla (T) ; stricto sensu, il s'agit de l'induction magnétique mais pour des raisons de clarté, nous utilisons la dénomination « champ magnétique ».

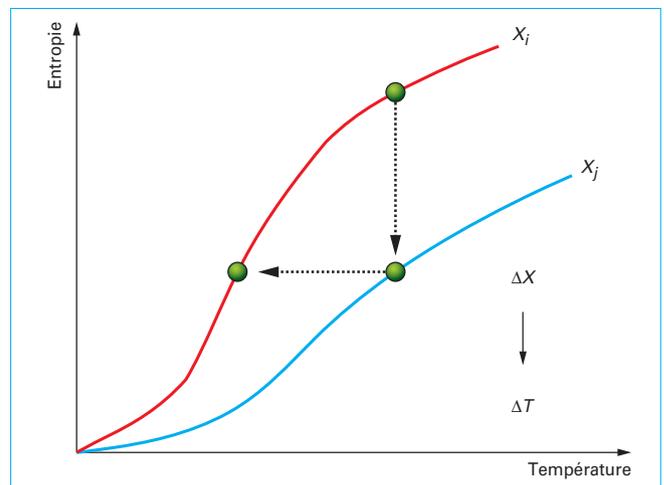


Figure 12 – Réduction d'entropie et processus de réfrigération

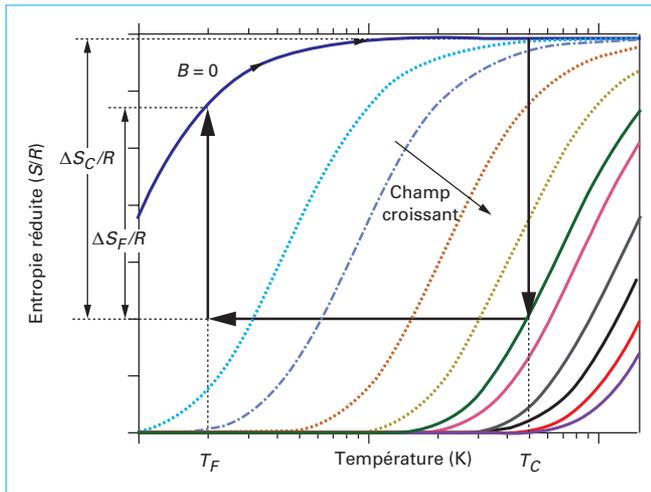


Figure 13 – Cycle de désaimantation adiabatique et diagramme entropie-température

De la description précédente, on comprend également que, au fur et à mesure que la température augmente, il faut des champs de plus en plus grands pour prendre le dessus sur l'agitation thermique et obtenir un ordre magnétique. En pratique et dans une hypothèse adiabatique, le champ requis varie en proportion directe avec la température, et par conséquent un sel donné ne peut être utilisé que sur une gamme limitée au-dessus de sa température de Néel. On note également que le cycle impose l'utilisation d'un **interrupteur thermique** (couplage et découplage thermique avec la source froide). C'est d'ailleurs cet interrupteur thermique qui va introduire l'essentielle des irréversibilités et réduire l'efficacité thermodynamique du cycle.

Un système de désaimantation adiabatique est constituée d'un nombre réduit de composants (figure 14) :

- une bobine de champ (en général supraconductrice) ;
- un sel paramagnétique ;
- un interrupteur thermique ;
- bien souvent un écran magnétique disposé autour de la bobine et permettant de limiter les champs de fuite.

2.2 Dimensionnement

En premier lieu, la température initiale et la température finale recherchée vont conditionner le **choix du sel paramagnétique**. Les matériaux utilisables aux températures inférieures au kelvin sont donnés dans le tableau 2.

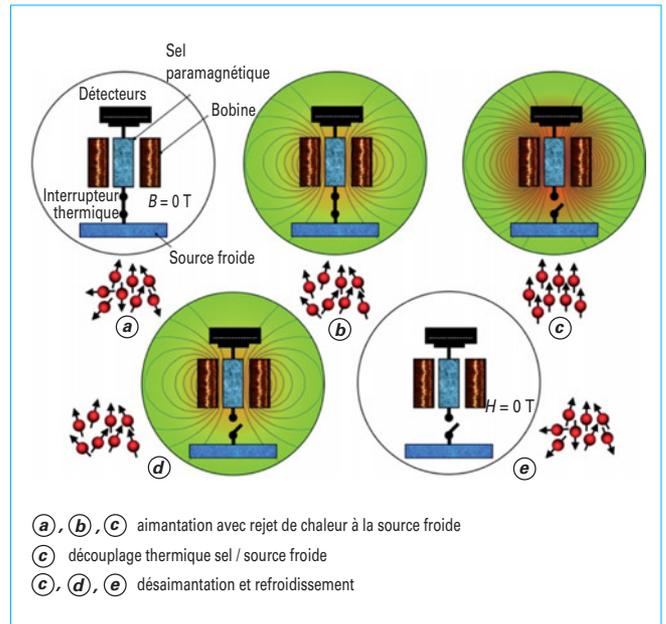


Figure 14 – Schéma de principe d'une désaimantation adiabatique

L'entropie par mole à champ nul est donnée par la formule théorique :

$$S = R \ln(2J + 1) \tag{11}$$

avec J nombre de spin.

Cette équation donne une limite supérieure à l'entropie que l'on va pouvoir extraire, et semble donc favoriser les matériaux à nombre de spins élevés. En réalité, cette approche doit être pondérée par plusieurs facteurs tels que le champ requis pour aimanter le sel, sa masse molaire, sa masse volumique et sa tenue aux températures supérieures à la température ambiante. En effet, pour ce dernier point, les sels basses températures (< 1 K) sont pour la plupart des aluns (CCA, CPA, FAA) et contiennent de l'eau. Les molécules d'eau permettent d'encager les ions actifs (fer, chrome ou cérium) et ainsi de limiter leurs interactions et obtenir une température d'ordre faible ($T_{Néel}$ faible). En contrepartie, ils peuvent se déshydrater et supportent mal les températures élevées. Le choix est donc conditionné par des raisons pratiques. Une masse de sel plus importante peut par exemple nécessiter un champ plus faible et conduire *in fine* à un système plus compact et léger (moins de champ et donc moins d'écrantage). La diminution des interactions entre ions milite également pour un choix de sel à faible nombre de spin pour les très basses températures.

Tableau 2 – Caractéristiques des principaux sels paramagnétiques utilisables pour des températures inférieures au kelvin

Sel	J	$T_{Néel}$ (mK)	T_{Max} (°C)	M (g/mol)	Masse volumique (g/cm ⁻³)
CCA CsCr(SO ₄) ₂ , 12 H ₂ O	1,5	10	116	593	2,06
CMN Ce ₂ Mg ₃ (NO ₃) ₁₂ , 24 H ₂ O	0,5	1,5		1 530	2,1
CPA CrK(SO ₄) ₂ , 12 H ₂ O	1,5	17	89	499	1,83
FAA Fe(NH ₄)(SO ₄) ₂ , 6 H ₂ O	2,5	26	39	482	1,71

On note que la faible conductivité thermique des sels impose en général de faire croître le sel sur une structure thermiquement conductrice afin de limiter l'écart de température entre le sel à proprement parler et l'interface utilisateur. Ce bus thermique peut être constitué d'une multitude de fils de cuivre lorsque le sel n'est pas agressif chimiquement, ou bien de fils d'or (cas du FAA).

Le **dimensionnement** requiert la connaissance des courbes d'entropie sous champ, qui peuvent être calculées en bonne approximation en utilisant la théorie de l'ion libre [7] :

$$\frac{S(B_0, T)}{R} = \ln \left[\frac{\sinh(2J+1)x}{\sinh(x)} \right] + x \coth(x) - (2J+1) \coth[(2J+1)x] \quad (12)$$

où
$$x = \frac{\mu_B g B}{2kT} \quad (13)$$

avec μ_B ($J \cdot T^{-1}$) magnéton de Bohr,
 g facteur de Landé (propriété du sel),
 k constante de Boltzmann.

Pour les champs faibles, le champ propre b généré par les ions eux-mêmes doit être considéré et on utilise dans l'expression de l'entropie :

$$B_{eff} = \sqrt{B^2 + b^2} \quad (14)$$

Par contre, la courbe à champ nul est difficile à prédire et provient en général de mesures expérimentales de capacités thermiques massiques.

La quantité d'énergie disponible à la température froide recherchée T_F est alors donnée par :

$$E_F = nT_F (\Delta S)_F \quad (15)$$

avec n nombre de moles d'ions paramagnétiques,
 ΔS différence d'entropie à froid entre l'état initial et l'état final (en général sous champ nul).

Les sels mentionnés dans le tableau 2 comportent une mole d'ions magnétiques par mole de sel, à l'exception du CMN qui lui en compte deux. Ce facteur est à considérer dans les calculs, par exemple pour le calcul de la masse de sel à partir de sa masse molaire.

L'**autonomie du système** est simplement donnée par le rapport de E_F par la charge thermique dissipée :

$$t = \frac{E_F}{Q} \quad (16)$$

Lors de la phase d'aimantation, l'énergie dissipée à chaud est $nT_C (\Delta S)_C$, ou encore :

$$E_C = E_F \frac{T_C (\Delta S)_C}{T_F (\Delta S)_F} \quad (17)$$

Dans le cas d'une courbe d'entropie à champ nul « idéale » ($\Delta S)_F$ et ($\Delta S)_C$ identiques), on trouve une dissipation dans le rapport des températures.

En général, le champ de fuite résiduel généré par la bobine doit être écranté afin de ne pas nuire au fonctionnement des composants sensibles (détecteurs). On utilise des matériaux ferromagnétiques à fort champ de saturation (écrantage champ important) et/ou à forte perméabilité magnétique (écrantage efficace des champs faibles), qui permettent de replier les lignes de champ. L'épaisseur de l'écran est choisie pour que le champ concentré dans la section annulaire approche de la valeur de saturation du matériau. On note que l'écran améliore l'uniformité du champ au sein de la bobine, un point important pour que chaque section du sel participe efficacement à l'effet frigorifique.

Pour l'**interrupteur thermique**, la solution avec gaz d'échange est utilisable pour des températures supérieures à typiquement 250 mK. Pour des températures inférieures, la limitation provient de la pression de vapeur saturante du gaz 3He (le dernier gaz utilisable à ces températures) qui devient si faible qu'il n'est plus possible d'obtenir un fonctionnement conductif (passant). En effet, aux très basses pressions, le régime de transfert de chaleur devient moléculaire (ou balistique) et est proportionnel à la pression. On a donc recours à des phénomènes physiques permettant de faire varier la conductivité thermique (supraconducteur, magnéto-résistif), ou bien à des systèmes purement mécaniques par contact. Un soin particulier est porté sur le choix et la conception de cet interrupteur thermique puisque cet élément introduit l'essentiel des irréversibilités.

2.3 Applications

Proposées en 1933 [8], les désaimantations adiabatiques sont utilisées de longue date dans les **laboratoires de recherche**. Leur popularité est restée toutefois modeste au profit des systèmes à dilution (§ 3). La donne change ces dernières années pour deux raisons :

- la première est liée au bénéfice de l'utilisation des désaimantations dans les applications spatiales. Leur insensibilité à la microgravité et l'absence de pièce mobile sont en effet des atouts majeurs. Au titre des inconvénients, on cite bien sûr la masse et les champs magnétiques de fuite. Ces développements ont relancé l'intérêt pour ces systèmes, qui se déclinent aussi, bien évidemment, pour des applications terrestres ;

- la deuxième raison est liée à la difficulté d'approvisionnement du gaz 3He et à son coût. Même si sa disponibilité dans les années futures recouvre une offre raisonnable, il reste *a priori* onéreux et impacte *de facto* la production de système adsorption 3He ou des dilutions.

Des systèmes clés en main sont disponibles pour le marché de l'instrumentation scientifique [9]. En **déclinaison spatiale**, on peut citer les travaux de l'équipe de P. Shirron [10] à NASA Goddard qui fournissent un système 50 mK (figure 15) pour la mission japonaise ASTRO-H, et également les travaux menés au Service des basses températures du CEA [11] pour la fourniture d'un système hybride 50 mK pour la mission japonaise SPICA ou européenne ATHENA+ (figure 16).

La particularité de cette dernière solution est d'ailleurs un premier étage à adsorption 3He permettant d'obtenir une interface à une température de 300 à 400 mK (écrantage des pertes).

Cette température d'interface permet de limiter le champ magnétique requis à des valeurs inférieures au tesla et par conséquent réduit considérablement la taille et la masse de la désaimantation adiabatique.



Figure 15 – Modèle de vol de l'ADR 50 mK multiétagées (mission ASTRO-H) (doc. P. Shirron, NASA Goddard)

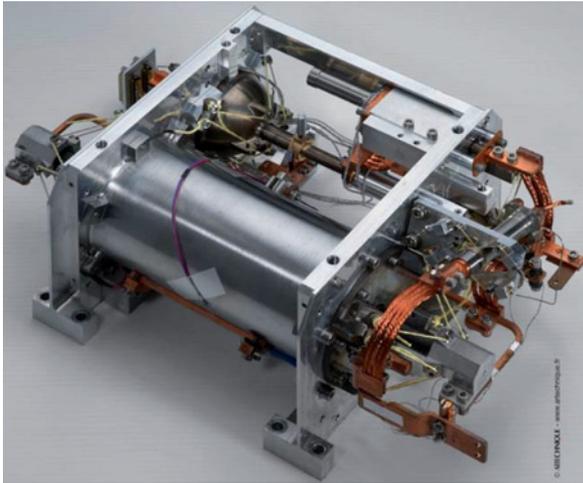


Figure 16 – Modèle d'ingénierie pour la mission ATHENA+. Concept hybride associant un étage adsorption 300 mK et une désaimantation miniaturée (doc. INAC/SBT CEA Grenoble)

3. Cryostat à dilution

En laboratoire, les cryostats à dilution se sont imposés pour réaliser des instruments à très haute sensibilité ou pour étudier les propriétés physiques aux très basses températures (de 2 à 500 mK). Les principes de la réfrigération datent des études menées dans les années 1960 [London – Radebaugh]. Les premiers appareils se sont répandus dans les laboratoires au début des années 1970.

Avec le développement récent des cryoréfrigérateurs atteignant les températures de l'hélium liquide, on a vu les premiers réfrigérateurs à dilution fonctionnant sans liquides cryogéniques. Ils sont disponibles commercialement depuis une dizaine d'années et évitent les contraintes opérationnelles liées à l'approvisionnement et à la récupération de l'hélium liquide.

La conception de ce type de réfrigérateurs est actuellement bien maîtrisée et s'adapte à de nombreuses contraintes expérimentales.

Le satellite scientifique Planck (ESA, 2008), par exemple, était équipé d'un réfrigérateur à dilution fonctionnant en l'absence de gravité.

Les difficultés actuelles d'approvisionnement de l'hélium 3 limitent considérablement l'usage de ces cryostats. Quelle que soit l'évolution future de ce marché, les cryostats à dilution restent indispensables dans les applications scientifiques qui ont des contraintes sévères de puissance (jusqu'à 1 mW à 100 mK) et de sensibilité au champ magnétique.

3.1 Principes physiques

3.1.1 Diagramme de phase 3He-4He

Les deux isotopes de l'hélium ont des natures très différentes : l'isotope 4He a un spin nul, c'est un boson, alors que le 3He a un spin 3/2 et est un fermion. L'hélium 4 devient superfluide au-dessous de 2,17 K, alors que l'hélium 3 manifeste cette propriété au-dessous de 2 mK seulement. Au-dessous de 0,86 K et à basse pression (< 0,3 MPa), un mélange 3He-4He se sépare en deux phases :

- une phase concentrée en hélium 3 ;
- une phase pauvre, ou diluée.

De masse volumique inférieure, la phase concentrée flotte au-dessus de la phase pauvre sous l'effet de la gravité terrestre. Dans le diagramme de phase (figure 17), on distingue une zone où le mélange possède les propriétés de superfluidité. Dans la région de séparation des phases, les deux phases coexistent avec des concentrations différentes [12] :

- dans la phase concentrée :

$$x_4 = 0,85 T^{3/2} e^{-0,56/T} \quad (18)$$

- dans la phase diluée :

$$x_3 = 0,064 (1 + 8,4 T^2 + 9,4 T^3) \quad (19)$$

avec x_i fraction molaire $n_i/(n_3 + n_4)$ du mélange,

T (K) température.

On constate qu'à très basse température (< 0,1 K), la concentration de 3He dans la phase diluée tend vers 6,4 %. Les atomes 3He se comportent quasiment comme un gaz parfait dans un milieu constitué des atomes de 4He d'énergie négligeable. L'enthalpie du fluide dépend donc essentiellement des atomes 3He. Aux très basses températures, les propriétés peuvent être calculées par le modèle des liquides de Fermi. Dans les deux phases concentrée (sans indice) et diluée (indice D), et aux basses températures ($T < 40$ mK), la capacité thermique molaire de l'hélium 3 (en $J \cdot mol_{3He}^{-1} \cdot K^{-1}$) est donnée par [13] :

$$\begin{aligned} c_3 &= 24 T \\ c_{3D} &= 108 T \end{aligned} \quad (20)$$

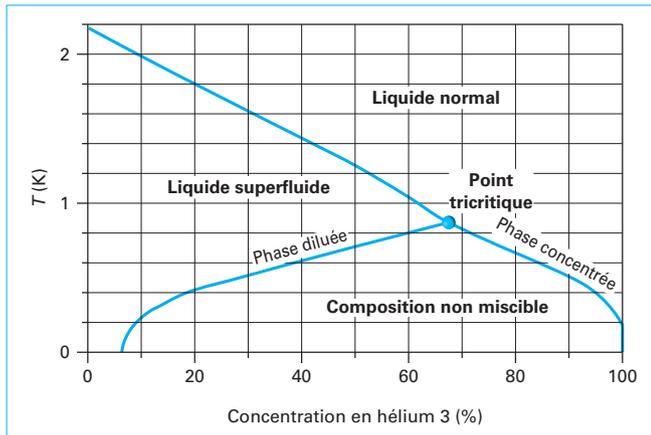


Figure 17 – Diagramme de phase du mélange 3He-4He

À l'équilibre des deux phases, les potentiels chimiques sont égaux :

$$H_3 - TS_3 = H_{3D} - TS_{3D} \quad (21)$$

Pour un liquide incompressible, l'entropie se calcule par :

$$S = \int \frac{c}{T} dT$$

On obtient facilement la variation d'enthalpie entre la phase concentrée et la phase diluée, avec T en K :

$$H_{3D} - H_3 = T (S_{3D} - S_3) = 84 T^2 \quad (22)$$

On interprète parfois le passage de l'hélium 3 de la phase concentrée à la phase diluée par une sorte « d'évaporation » de l'hélium 3 dans le milieu thermiquement inerte constitué par l'hélium 4.

3.1.2 Principe du réfrigérateur à dilution classique

Dans un cryostat classique, la séparation des phases a lieu dans la boîte à mélange (figure 18) qui est le point le plus froid du réfrigérateur. En première approximation, il n'y a que les atomes d'hélium 3 qui se déplacent. Injectés dans la boîte à mélange, ils sont extraits dans un tube relié au bouilleur. Maintenu à une température entre 0,6 et 0,9 K, le bouilleur permet d'extraire l'hélium 3. Plus volatil que l'hélium 4, la phase gazeuse à 0,1 mbar contient au moins 90 % d'hélium 3. Une pompe mécanique étanche assure l'extraction du gaz et la réinjection dans le circuit à une pression de 0,2 à 0,5 bar.

Il est intéressant de noter que la puissance froide obtenue par un cryostat à dilution est supérieure à celle d'un cryostat à circulation d'hélium 3 pour une capacité de pompage donnée. Au-dessus de 400 mK, un réfrigérateur à dilution a l'avantage (figure 19).

Le bilan énergétique de la boîte à mélange (indice bm) donne la puissance froide disponible, avec T_{bm} en K :

$$\dot{Q}_{bm} + \dot{n}_3 [H_3(T_1) - H_3(T_{bm})] = \dot{n}_3 [H_{3D}(T_{bm}) - H_3(T_{bm})] = \dot{n}_3 84 T_{bm}^2 \quad (23)$$

avec \dot{Q}_{bm} (W) puissance appliquée sur la boîte à mélange,
 \dot{n}_3 (mol/s) débit molaire d'hélium 3,
 T_1 (K) température de l'hélium 3 à la sortie de l'échangeur à contre-courant.

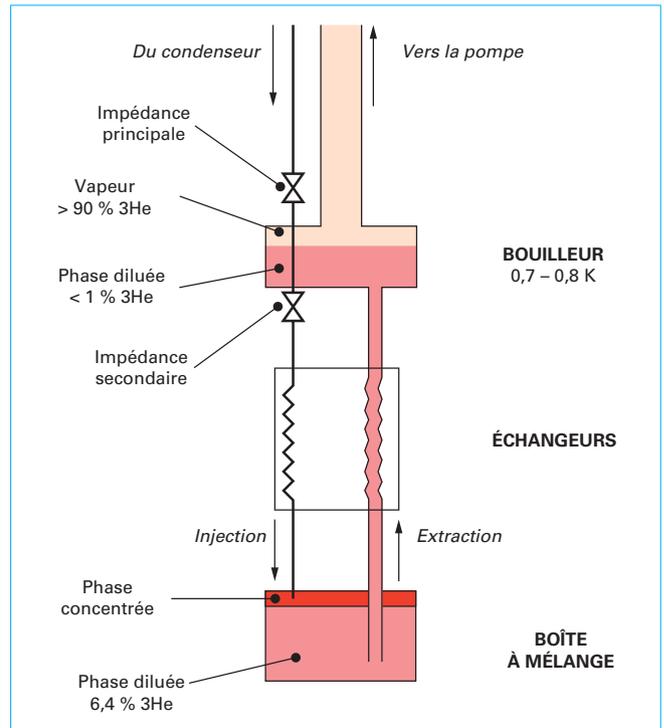


Figure 18 – Éléments du cryostat à dilution classique

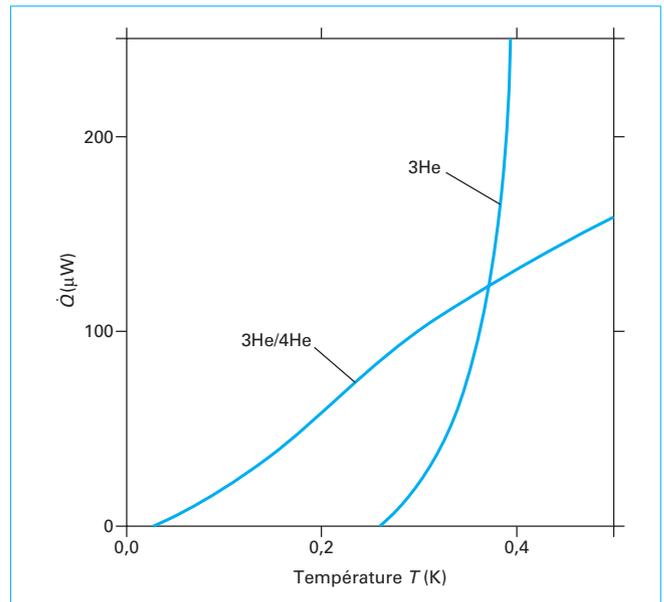


Figure 19 – Comparaison des puissances de refroidissement d'un réfrigérateur 3He et d'un réfrigérateur à dilution pour une capacité de pompage de 5 L/s

En tenant compte de la valeur de la capacité thermique molaire (20), la puissance froide est obtenue par (avec T_{bm} et T_1 en K) :

$$\dot{Q}_{bm} = \dot{n}_3 (96 T_{bm}^2 - 12 T_1^2) \quad (24)$$

Le prérefroidissement de l'hélium 3 injecté est donc essentiel pour les performances du réfrigérateur. Sans puissance froide ($\dot{Q}_{bm} = 0$), la température de la boîte à mélange s'établit à $T_{bm} = 0,353 T_1$ (24).

Le prérefroidissement du liquide injecté est assuré par des échangeurs de chaleur qui utilisent une partie de l'enthalpie disponible en excès dans la phase diluée ($c_{3D} > c_3$). La qualité de ces échangeurs est déterminante pour les performances ultimes du réfrigérateur.

3.1.2.1 Performances des échangeurs

Aux très basses températures, les échanges de chaleur sont limités par la résistance de Kapitza (§ 1.2.4). Pour atteindre des températures inférieures à 30 mK, il est nécessaire d'accroître les surfaces d'échange en utilisant des poudres frittées (argent ou cuivre). On utilise généralement deux types d'échangeurs :

- un **échangeur continu** réalisé avec des tubes dans un alliage peu conducteur afin de réduire la conductance longitudinale (CuNi ou Inox) ;
- une série d'**échangeurs discrets**.

Les échangeurs discrets sont des éléments constructifs qui mettent en contact les liquides au travers de poudres frittées. Ils sont approximativement isothermes. En supposant que les échanges de chaleur sont limités par la résistance Kapitza [13], on obtient une relation simple qui donne la température limite (à puissance externe nulle) de la boîte à mélange (en unité SI) :

$$T_{bm}^2 = 6,4 R_{Km} \frac{\dot{n}_3}{S} + 0,0122 \frac{\dot{Q}_{bm}}{\dot{n}_3} \tag{25}$$

avec S (m²) surface totale en contact avec le liquide, R_{Km} (K⁴ · m² · W⁻¹) paramètre de la résistance de Kapitza (cf. (10)).

Le premier terme dépend des caractéristiques de l'échangeur, le second du bilan enthalpique (24). Ainsi, pour un flux de chaleur donné (pertes + apport extérieur), il existe un débit optimal pour minimiser la température de fonctionnement :

$$\dot{n}_3^{opt} = \left(\frac{\dot{Q}_{bm} S}{525 R_{Km}} \right)^{1/2} \tag{26}$$

$$T_{bm}^{min} = 0,75 \left(\frac{\dot{Q}_{bm} R_{Km}}{S} \right)^{1/4}$$

avec les unités SI.

Application numérique

Un échangeur continu est constitué d'un tube d'injection de 3He de $D_{int} = 0,3$ mm et $D_{ext} = 0,5$ mm, une longueur de 6 m et une puissance \dot{Q}_{bm} sur la chambre à mélange de 1 μW. La surface totale S en contact avec le liquide est de 0,015 m². En considérant une valeur R_{Km} de 0,02 K⁴ · m² · W⁻¹ (tableau 3), on obtient un débit optimal de 38 μmol/s et une température minimale de 25 mK. Si on voulait la même performance à 5 mK, il faudrait 10 m² de surface d'échange.

De telles surfaces sont impossibles à réaliser avec des **échangeurs à tubes**. Leur utilisation limite la température à environ 30 mK. Les tubes en cupronikel sont classiquement utilisés en laboratoire : ils ont une faible conductivité thermique longitudinale et se brisent facilement. Pour les plus basses températures, on utilise des matériaux poreux réalisés par frittage de poudres d'argent ou de cuivre pour obtenir les plus grandes surfaces possibles dans un volume réduit (plusieurs m²/g). L'échange de chaleur est obtenu dans des échangeurs discrets que l'on peut considérer isothermes (figure 20). On trouve des réalisations comportant plus de 10 échangeurs discrets.

Interface	R_{Km} (K ⁴ · m ² · W ⁻¹)	Domaine
Cu-3He (théorie)	0,2	$T < 100$ mK
Cu-4He (théorie)	0,05	$T < 100$ mK
Cu-He3D	0,02	$T < 50$ mK
CuNi-He3D	0,01	$T < 200$ mK

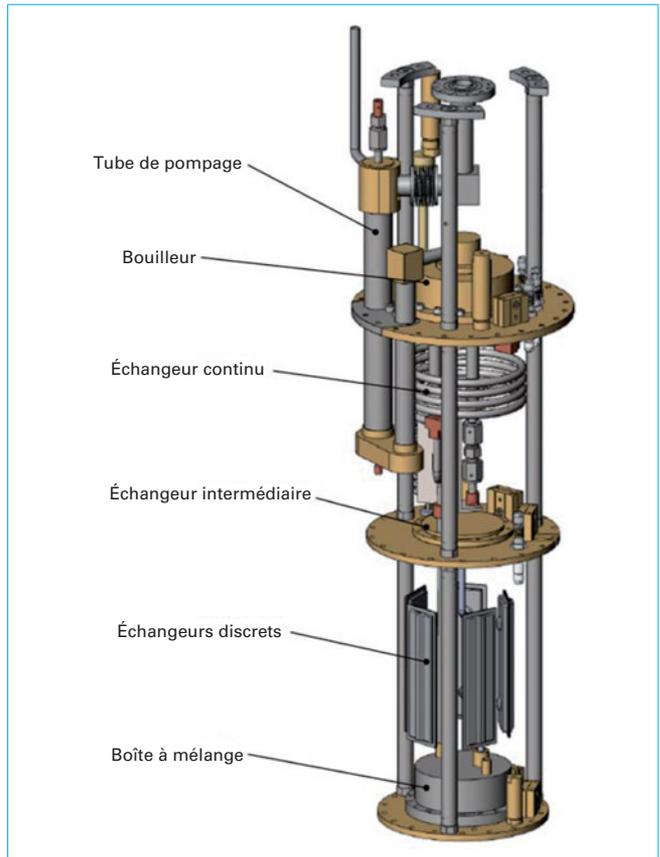


Figure 20 – Architecture d'un insert à dilution comportant 6 échangeurs discrets (doc. Crédit Cryoconcept)

La **boîte à mélange** elle-même demande un bon contact entre le fluide et la paroi. La paroi interne est couverte d'une poudre frittée de 1 à 2 mm d'épaisseur.

3.1.2.2 Limite théorique de la température

Une deuxième limitation vient de l'évolution de la viscosité ($\mu \propto T^{-2}$) et de la conductivité thermique ($k \propto T^{-1}$) de l'hélium 3 dans les phases diluées et concentrés aux basses températures. On montre que la chaleur générée par dissipation impose une limite qui ne dépend pas du débit du réfrigérateur [13] :

$$T_{bm} (lim) = \frac{4}{D^{1/3}} \tag{27}$$

avec T_{bm} en mK et D , le diamètre du tube de pompage, en mm.

Parution : avril 2021 - Dernière validation : mai 2021 - Ce document a été délivré pour le compte de 7200048087 - école normale supérieure de lyon // 140.77.179.219

Ainsi, un tube de pompage d'un diamètre de 1 mm donne une température limite théorique de 4 mK.

C'est évidemment une approche simpliste, mais qui permet de comprendre les principales influences constructives du réfrigérateur.

3.1.2.3 Contraintes dues à la gravité

Enfin, il y a des limites imposées par la gravité :

- dans la boîte à mélange d'abord, il est nécessaire de la maintenir horizontale afin que la phase concentrée, moins dense, soit maintenue au-dessus de la phase pauvre ;

- dans le tube de retour également, la concentration en ^3He décroît avec la température sous l'effet de l'équilibre thermochimique (pression osmotique) ; ainsi, la densité du liquide croît lorsqu'on se rapproche du bouilleur et des phénomènes d'instabilité peuvent apparaître si on ne respecte pas une vitesse suffisante de l'écoulement.

La conception de la partie froide de l'appareil requiert donc un important savoir-faire afin d'optimiser les dimensions en fonction des besoins du réfrigérateur. Plusieurs sociétés commerciales proposent des réfrigérateurs aux performances bien maîtrisées, [Doc. BE 9 817]. On trouvera dans la littérature scientifique de nombreuses réalisations pour des besoins plus exotiques imposés par les conditions de certaines mesures : champ magnétique intense, basse radioactivité, contraintes géométriques...

Une excellente présentation des techniques des réfrigérateurs à dilution est donnée en [13] ainsi que sur le site de l'école DRTBT ([Doc. BE 9817]).

3.1.2.4 Courbe de puissance

La vérification du bon fonctionnement d'un réfrigérateur demande de réaliser une courbe de puissance. Il s'agit d'appliquer une puissance sur la boîte à mélange à l'aide d'un chauffage électrique \dot{Q}_J et de relever les différents points obtenus après stabilisation thermique.

Si les échangeurs sont considérés parfaits, le bilan d'énergie (en W) de la boîte à mélange s'écrit :

$$\dot{Q}_{\text{res}} + \dot{Q}_J = \dot{n}_3 84 T_{bm}^2 \quad (28)$$

avec \dot{n}_3 en $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ et T_{bm} en K.

\dot{Q}_{res} représente les apports résiduels (conduction des supports, pertes par viscosité, imperfection de l'échangeur de chaleur). L'écart des mesures expérimentales $\dot{Q}_J = f(T^2)$ par rapport à la courbe théorique de l'équation (28) permet d'apprécier l'imperfection des échangeurs. L'extrapolation à puissance \dot{Q}_J nulle permet d'estimer les pertes extérieures.

3.1.3 Puissance disponible sur le bouilleur

Dans le bouilleur, l'évaporation de ^3He est endothermique. L'enthalpie d'évaporation molaire est approximativement $L_3 \approx 35$ J/mol (figure 2). Cette puissance est disponible pour intercepter le flux de chaleur des supports et des accessoires expérimentaux. On ajoute un chauffage indépendant afin de contrôler le débit de ^3He circulant dans le cryostat.

3.1.4 Bilans des puissances disponibles sur le réfrigérateur

On caractérise souvent la puissance du cryostat à 100 mK. Le tableau 4 donne les puissances théoriques disponibles en fonction du débit dans les gammes courantes.

Tableau 4 – Performances théoriques de réfrigérateur

Débit molaire d'hélium 3 ($\mu\text{mol/s}$)	Puissance disponible à 100 mK (μW)	Puissance sur bouilleur (mW)	Débit-volume (L/s)
30	25	1	7
100	84	4	22
300	252	11	67
1 000	840	35	224

3.2 Architecture des cryostats à dilution

3.2.1 Cryostat à bain d'hélium liquide

Dans les réalisations les plus courantes, on trouve le cryostat avec bain d'hélium liquide (4,2 K). Le bain d'hélium réalise une source froide indispensable pour intercepter les flux de chaleur provenant des étages à plus haute température, les supports et les fils électriques. L'hélium 3 qui circule entre le bouilleur et la pompe placée à température ambiante doit également être refroidi avant d'être injecté dans la boîte à mélange. Un échangeur correctement dimensionné assure que l'hélium 3 est parfaitement thermalisé à la température du bain d'hélium (4,2 K). La température critique de l'hélium 3 est de 3,2 K. On ne peut donc pas le condenser sur le bain. On pourrait chercher à utiliser l'énergie disponible sur le bouilleur à 0,8 K, mais la condensation de l'hélium 3 à partir de la température du bain demande ≈ 100 J/mol. Elle excède donc l'énergie disponible sur le bouilleur (≈ 35 J/mol à 0,8 K).

La solution classique (figure 21) consiste à réaliser un étage plus froid ($\approx 1,5$ K) en prélevant de l'hélium du bain à une pression proche de 0,1 MPa pour le détendre à $\approx 1\,000$ Pa. Le liquide produit par cette détente Joule-Thomson est contenu dans une boîte en cuivre dite « boîte à 1 K » (figure 22). Une pompe indépendante est nécessaire pour assurer la circulation de ce débit d'hélium. Dans ces conditions, l'hélium 3 peut être condensé sans amener une chaleur excessive sur le bouilleur. La fraction de vapeur produite est condensée en prélevant l'énergie dans le bouilleur. L'impédance Z_1 est dimensionnée pour avoir une pression d'injection de l'ordre de 0,2 à 0,5 bar (0,02 à 0,05 MPa) au débit optimal. Une seconde impédance Z_2 , environ 10 fois plus faible, permet d'assurer la condensation de la totalité de l'hélium 3 avant l'échangeur continu.

Une autre solution (figure 23) consiste à comprimer l'hélium 3 à 0,3-0,4 MPa pour réduire l'énergie libérée par la condensation. La détente est alors contrôlée par deux impédances afin d'assurer que la totalité de l'hélium 3 soit liquide à l'entrée de l'échangeur continu. C'est le principe des « cannes à dilution » que l'on insère directement dans une bouteille d'hélium liquide à la pression atmosphérique [14] (figure 24).

3.2.2 Réfrigérateurs « secs »

La manipulation des liquides cryogéniques est souvent rédhibitoire si on ne dispose pas de l'équipement adapté. Les progrès réalisés dans les machines cryogéniques de petite taille (**tube à gaz pulsé TGP**, machine de Gifford-Mc Mahon) ont permis de concevoir des réfrigérateurs à dilution autonomes, réduisant les contraintes d'installation. Cette nouvelle génération de réfrigérateurs à dilution est aujourd'hui parfaitement mature. C'est à partir des années 2000 que sont apparus sur le marché les premiers **réfrigérateurs à dilution utilisant des TGP comme source froide** [15]. Ils offrent de nombreux avantages :

- un coût d'utilisation quatre fois moins cher qu'un réfrigérateur à bain d'hélium ;

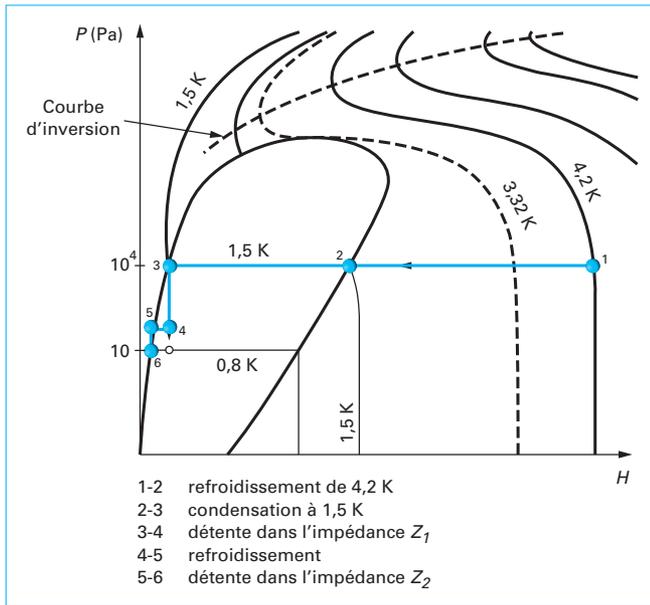


Figure 21 - Condensation de l'hélium 3 avec une « boîte à 1K »

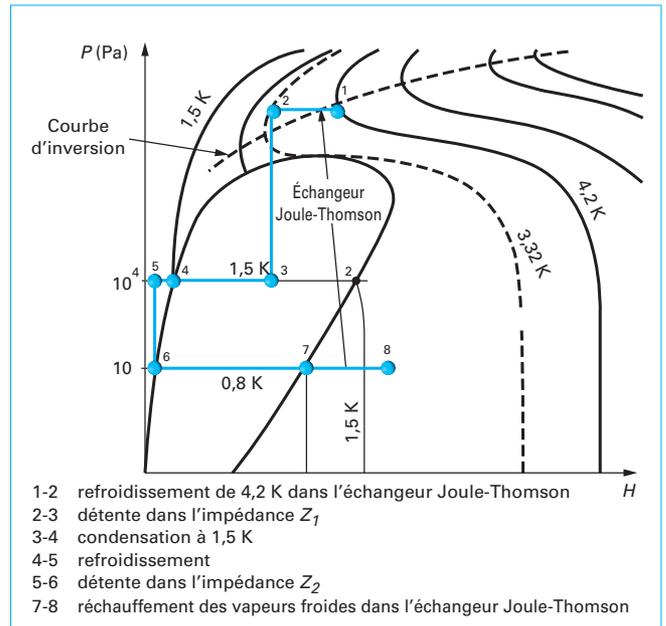


Figure 23 - Condensation de l'hélium 3 à partir de 4,2 K

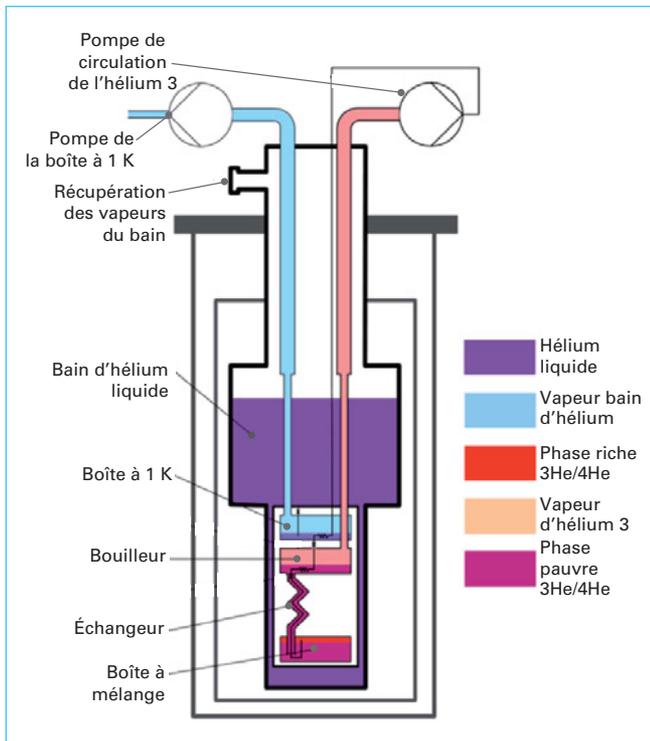


Figure 22 - Fonctionnement avec une « boîte à 1 K »

- un espace expérimental à très basse température important ($\varnothing = 300$ mm ; $H = 300$ mm) ;
- une mise en œuvre simplifiée (pas d'enceinte à vide froide, une étanchéité unique à 300 K) ;
- un fonctionnement automatique avec la possibilité d'un contrôle total à distance ;

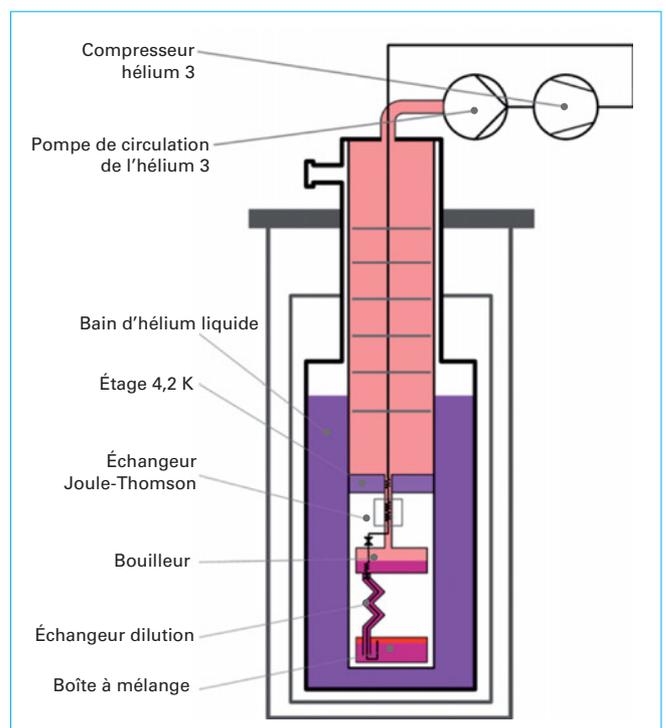


Figure 24 - Fonctionnement sans boîte à 1 K, architecture d'une canne à dilution

- une puissance disponible importante sur le deuxième étage du tube à gaz pulsé (400 mW à 4,2 K).

L'appareil de la figure 25 a été développé au Centre de Saclay du CEA (DSM-IRAMIS-SPEC). Le refroidissement depuis 300 K jusqu'aux plus basses températures ($T < 10$ mK), s'opère en deux phases.

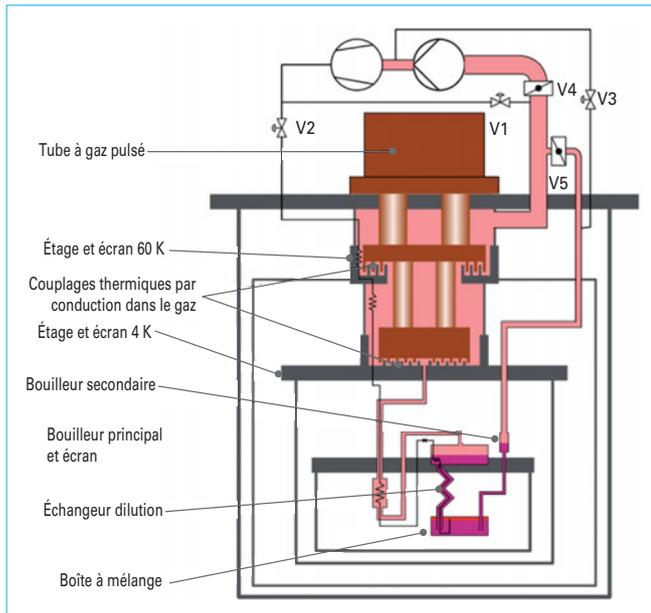


Figure 25 – Schéma du réfrigérateur à dilution « sec » de type CRYODRY (doc. Cryoconcept)

■ **Phase I – Prérefroidissement de 300 à 3 K.** Le mélange 3He-4He circule à l'aide d'un compresseur à fort débit (15 L/min), en sens inverse de celui décrit dans une dilution classique. Le mélange gazeux est injecté depuis 300 K *via* la vanne V1 dans la gaine de pompage. Celui-ci se refroidit au contact du premier et du deuxième étage du TGP grâce à deux couples de radiateurs. Ces radiateurs ont aussi pour rôle de refroidir l'écran du premier étage à une température voisine de 60 K et celui du deuxième étage à une température voisine de 3 K. Le mélange gazeux agit ensuite comme fluide caloporteur pour refroidir vers 3 K les parties les plus basses de l'étage à dilution : le bouilleur ainsi que son écran thermique associé, l'échangeur continu, et dans le cas où l'on souhaite descendre à une température voisine de 10 mK, les différents échangeurs discrets et enfin la boîte à mélange. Le mélange pompé par le compresseur, remonte ensuite *via* le « second bouilleur », par la canalisation de pompage rapide et sortie *via* la vanne V3. C'est une technique développée à l'Institut Néel à Grenoble (CNRS/UJF) qui permet d'éviter l'utilisation d'un gaz d'échange et d'une enceinte étanche.

■ **Phase II – Refroidissement de 3 K à la température la plus basse ($T < 10$ mK).** On distingue deux phases dans ce processus de refroidissement.

– **Phase A. Liquéfaction du mélange :** à partir de 3 K, on rétablit le sens de circulation normal à l'aide de la pompe à vide et du compresseur. Le mélange pompé par P *via* la vanne V4 est ensuite injecté par le compresseur C sous une pression voisine de 0,3 MPa *via* la vanne V2, il se refroidit dans un échangeur à 3 K se trouvant au contact du radiateur du deuxième étage, puis dans un échangeur à contre-courant. On ne dispose donc pas d'une « boîte à 1 K ». Le fluide est détendu *via* deux impédances Z_1 puis Z_2 (détente Joule Thomson). Une fraction x de fluide est ainsi liquéfiée dans la boîte à mélange, tandis qu'une fraction $(1-x)$ est pompée à l'état de vapeur dans les échangeurs, pour refroidir les étages intermédiaires et surtout l'étage Joule Thomson, nécessaire au prérefroidissement du mélange. La liquéfaction du mélange est complète lorsque l'étage est chargé en mélange, c'est-à-dire : interface concentré-dilué dans la boîte à mélange et interface liquide-vapeur dans le bouilleur principal. La liquéfaction s'opère à une température comprise entre 1 et 2 K dans la boîte à mélange.

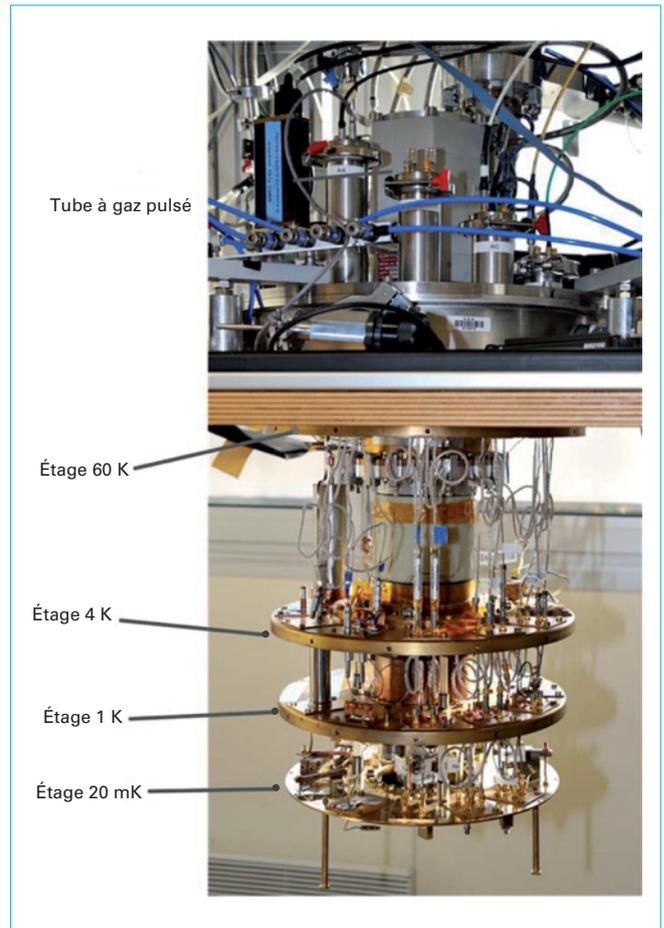


Figure 26 – Cryostat à dilution prérefroidi par un TGP

– **Phase B. Refroidissement aux plus basses températures ($T < 10$ mK) :** le refroidissement s'opère au niveau de la boîte à mélange par extraction des atomes ^3He qui franchissent l'interface concentré-dilué. L'essentiel de ces atomes (90 %) parvient au bouilleur principal. Une plus faible partie (10 %) est évaporée dans un double bouilleur. Les deux flux se rejoignent au niveau de la vanne V5. La dérivation d'une fraction du débit dans le « double bouilleur » ne diminue pas les performances de la boîte à mélange. La très grande différence d'enthalpie entre l'hélium 3 concentré injecté ($12 T^2$) et l'hélium 3 dilué pompé ($96 T^2$), même pour une déviation du débit de 20 % dans le second bouilleur modifie très peu le rapport de température entre le dilué et le concentré.

3.2.3 Maintenance des appareils

La circulation de l'hélium 3 est réalisée par une pompe étanche. Les modèles de pompes à palette demandent un changement périodique de l'huile (environ 8 000 h). Le compresseur est un élément critique. Il s'agit souvent d'un compresseur à membrane qui peut se rompre pendant l'utilisation. Certains modèles sont équipés d'une double membrane afin de conserver le mélange des isotopes en cas de panne. Les opérations de mise en froid de l'appareil demandent de transférer les isotopes stockés à l'état gazeux (30 à 100 L TPN) d'une réserve à basse pression vers le cryostat pour y être liquéfiés. Au réchauffement, on récupère le

mélange dans la réserve. Ces opérations sont généralement contrôlées par un automate qui actionne des électrovannes. L'étanchéité des circuits peut être une source de panne. Enfin, la présence d'impuretés dans le mélange gazeux (air, huile, hydrogène provenant du dégazage de certains métaux...) peut conduire à une obturation des circuits cryogéniques de petite taille (les impédances par exemple). Le circuit de circulation de l'hélium 3 est généralement équipé d'un piège cryogénique à l'azote afin de limiter la quantité d'impuretés injectée dans le cryostat. On peut aussi utiliser des absorbeurs (*getters*) qui filtrent plus spécifiquement l'hydrogène. En cas d'obturation, la seule solution est de réchauffer l'appareil en conservant les impuretés dans le piège. On peut alors les évacuer par une pompe primaire auxiliaire.

Le système de gestion des isotopes est donc relativement complexe et contribue au coût d'un cryostat à dilution. Ces problèmes sont aujourd'hui bien maîtrisés par les différents fournisseurs et il n'est pas rare de voir des appareils fonctionner sans interruption pendant plusieurs mois.

3.3 Réfrigérateur à dilution spatial : exemple du satellite Planck

3.3.1 Principe

Un réfrigérateur à dilution classique utilise la gravité pour contrôler la séparation de phase qui a lieu dans la « boîte à mélange ». La phase riche, moins dense, est confinée par gravité au-dessus de la phase pauvre. Afin d'éliminer cet effet de la gravité, on peut réaliser le mélange direct des isotopes dans des tubes de petit diamètre (< 1 mm). À la condition d'injecter une fraction d'hélium 3 supérieure à 6,4 %, on réalise un écoulement ou la phase concentrée forme des gouttelettes dont la tension de surface domine l'équilibre des forces. On parvient ainsi à rendre le système indépendant de la gravité.

Ce système est utilisé pour des expériences qui demandent d'orienter la partie froide dans une direction quelconque, ou bien pour les applications spatiales.

Dans ce système, la fraction d'hélium 3 est en excès par rapport à la richesse de la phase diluée. C'est donc le débit d'hélium 4 qui limite la quantité qu'il est possible de diluer à basse température. La puissance froide théorique disponible sur l'échangeur est donnée par la formule suivante [16] :

$$\dot{Q}_{th} = \dot{n}_4 q_{DIL} T_{SF}^2 \quad (29)$$

avec $q_{DIL} \approx 3,3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}$ dans les conditions d'alimentation citées,

T_{SF} température de la source froide,

\dot{n}_4 débit molaire d'hélium 4.

L'échangeur est constitué de capillaires de 0,2 à 1 mm de diamètre et d'une longueur de plusieurs mètres ; l'hélium 3 injecté en excès forme des gouttes dans la phase concentrée. Dans le capillaire de retour, la concentration de la phase concentrée décroît au fur et à mesure que la température s'élève, jusqu'à disparaître lorsque la température est supérieure à celle du point tricritique (figure 27).

3.3.2 Chaîne cryogénique

La mission scientifique Planck (ESA, 2008) est un satellite destiné à la mesure du fond diffus cosmologique. Il est équipé d'un réfrigérateur à dilution pour refroidir les détecteurs à haute sensibilité : 52 bolomètres de l'instrument HFI fonctionnant à

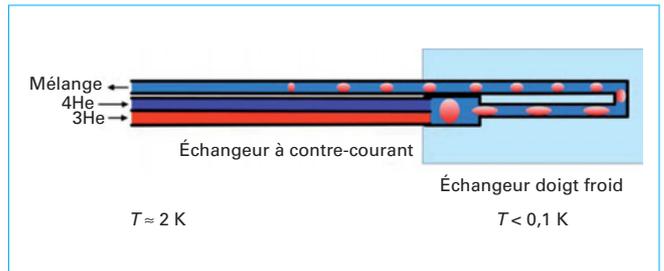


Figure 27 – Processus de mélange des isotopes insensible à la gravité

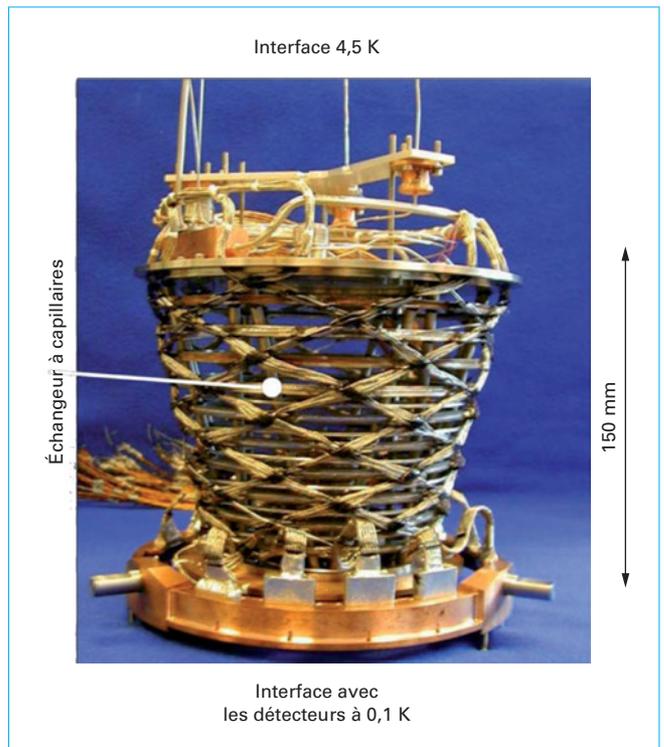


Figure 28 – Refroidisseur à dilution de l'instrument HFI du satellite Planck (doc. crédit Artechnique et Air Liquide)

100 mK (figure 28). Les débits des isotopes sont optimisés pour assurer une puissance disponible de 100 nW sur l'instrument : $7 \mu\text{mol/s}$ pour l'hélium 3 et de $19,5 \mu\text{mol/s}$ pour l'hélium 4 [17].

Dimensionné pour deux ans d'opération, le réfrigérateur demande d'embarquer de grandes quantités de gaz sous pression (10 560 L TPN de 3He et 31 680 L TPN de 4He à 27,5 MPa).

Dans ce système fonctionnant en cycle ouvert, le mélange des isotopes est évacué dans l'espace à très basse pression. Ainsi, ce système fonctionne sans aucun organe mobile. Des détendeurs et des électrovannes permettent de mettre en route le réfrigérateur et d'alimenter le circuit à pression constante.

Le fonctionnement en cycle ouvert, même s'il apporte une relative simplicité, limite considérablement les applications (durée de vie, puissance froide). Un développement prometteur est actuellement en cours [16] afin d'obtenir un fonctionnement en cycle fermé tout en assurant une insensibilité à la gravité.

4. Conclusion

Les systèmes de refroidissement aux températures inférieures à 1 K ont connu des développements constants et sont aujourd'hui matures. Les principales méthodes présentées sont à la base de la réalisation d'appareils commerciaux.

Ce sont les besoins de température, de puissance froide et les contraintes opérationnelles qui conduisent au choix d'une technique.

Les développements récents des cryoréfrigérateurs permettent un fonctionnement sans liquides cryogéniques, simplifiant considérablement l'utilisation des appareils.

Si les applications sont principalement rencontrées dans les laboratoires de recherche, les projets réalisés pour les détecteurs cryogéniques à très basse température [18] laissent penser qu'il y aura des applications industrielles dans un avenir proche.

Dans le domaine spatial, plusieurs projets sont en cours de définition afin de bénéficier des performances des détecteurs en astrophysique millimétrique ou en astronomie du rayonnement X [19].

La sensibilité de ces détecteurs à l'environnement (champ magnétique, microvibrations) impose des contraintes particulièrement sévères aux refroidisseurs. C'est actuellement la mise au point de ces appareillages instrumentaux performants et facilement utilisables qui motive les innovations dans ce domaine.

Remerciements

Les auteurs remercient les collègues des laboratoires de l'Institut Nanosciences et Cryogénie (INAC, Service des Basses Températures) et de l'Institut Néel pour avoir relu et commenté cet article.

Nos remerciements vont en particulier à Patrick Pari, Responsable du laboratoire de cryogénie du SPEC DSM-IRAMIS-CEA à Saclay, dont l'exposé sur les cryostats à dilution est directement inspiré de ses notes de cours dispensés dans les écoles de formation. Il a également contribué à la description du fonctionnement du système CRYODRY.

Réfrigération aux températures inférieures à 1 K

par **Lionel DUBAND**

Directeur du Service des Basses Températures (SBT)
Université Grenoble Alpes, CEA INAC-SBT

et **Philippe CAMUS**

Ingénieur de recherche
Institut Néel – CNRS/UJF UPR 2940

Sources bibliographiques

- [1] DRAGOVAN (M.). – *He3 refrigerator of operation to 0,237 K*. Applied Optics, vol. 23 (1984).
- [2] DUBAND (L.). – *Double stage helium sorption coolers*. Cryocoolers, Plenum Press, NY, États-Unis, nov. 2001.
- [3] TORRE (J.P.) et al. – *Miniature liquid 3He refrigerator*. Review of Scientific Instruments, vol. 56 (1985).
- [4] ROUBEAU (P.). – *Adsorption de l'Hélium 4 par le charbon actif*. Colloque international vide et froid, SFITV, Grenoble (1969).
- [5] KHALATNIKOV (I.). – Zh. Eksp. Teo. Fiz., vol. 22 (1952).
- [6] DUBAND (L.) et al. – *HERSCHEL flight models sorption coolers*. Cryogenics, vol. 48 (2008).
- [7] WHITE (G.). – *Experimental techniques in low temperature physics*. Oxford Science Publications Clarendon Press, Oxford, ISBN 0-19-851427 (2002).
- [8] GIAUQUE (W.F.) et al. – *Attainment of temperatures below 1° absolute by demagnetization of Gd₂(SO₄)₂ 8H₂O*. Physical Review, vol. 43 (1933).
- [9] JANIS Research par exemple <http://www.janis.com>
- [10] SHIRRON (P.) et al. – *ADR design for the soft X-ray spectrometer instrument on the astro-H mission*. Cryogenics, vol. 5 (2010).
- [11] DUBAND (L.) et al. – *SAFARI engineering model 50 mK cooler*. Cryogenics (2014).
- [12] RADEBAUGH (R.). – *Thermodynamics properties of the 3He-4He mixtures with applications to the dilution refrigerator*. NBS Technical Note 362 (1967).
- [13] LOUNASMAA (O.V.). – *Experimental principles and methods below 1 K*. Academic Press (1974).
- [14] PARI (P.). – *Réfrigération par dilution hélium-3 hélium-4 sans étage de condensation séparé*. Thèse CNAM (1987).
- [15] UHLIG (K.). – « Dry » dilution refrigerator with pulse-tube precooling. Cryogenics, 44, p. 53-57, janv. 2004.
- [16] CHAUDRY (G.) et al. – *A closed-loop dilution refrigerator for space applications*. Cryogenics, 52, p. 471-477 (2012).
- [17] TRIQUENEAUX (S.) et al. – *Design and performances of the dilution cooler for the Planck mission*. Cryogenics, 46(4), p. 288-297 (2006).
- [18] ENSS (Ch.) et HUNKLINGER (S.). – *Low-temperature physics*. Springer (2005).
- [19] CAMUS (Ph.) et DUBAND (L.). – *Images de la physique*. CNRS (2011) <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique>

Sites Internet

Ressources en ligne de l'école DRTBT (CNRS/CEA)
<http://www-ecole-drtbt.grenoble.cnrs.fr>

On consultera en particulier les notes de Patrick Pari sur les cryostats à dilution. Elles contiennent de nombreuses informations sur le dimensionnement et la conception de ces systèmes

Brevets

Cryostat à dilution EP 0188976 B1
Portable hélium 3 cryostat US 4136526 A
Appareil et procédé de cryorefroidissement WO 2013021217 A2

Dilution refrigerator with sample holding device EP 0675330 B1
Réfrigérateur et procédé de production de froid à très basse température EP 2307823 B1

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs

Janis Research Company, Inc., États-Unis
<http://www.janis.com>

Leiden Cryogenics, The Netherlands
<http://www.leidencryogenics.com>

Advanced Research Systems, Inc., États-Unis
<http://www.arscryo.com>

BlueFors Cryogenics Oy Ltd, Finlande
<http://www.bluefors.com>

Oxford Instrument Nanoscience, United Kingdom
<http://www.oxford-instruments.com>

Cryoconcept, France
<http://www.cryoconcept.com>

Entropy GmbH, Deutschland
<http://entropy-cryogenics.com>

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre, leurs compléments et mises à jour,** et bénéficiez des **services inclus.**



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- **+ de 350 000 utilisateurs**
- **+ de 10 000 articles de référence**
- **+ de 80 offres**
- **15 domaines d'expertise**

- Automatique - Robotique
- Biomédical - Pharma
- Construction et travaux publics
- Électronique - Photonique
- Énergies
- Environnement - Sécurité
- Génie industriel
- Ingénierie des transports
- Innovation
- Matériaux
- Mécanique
- Mesures - Analyses
- Procédés chimie - Bio - Agro
- Sciences fondamentales
- Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com