

## Des cryoréfrigérateurs pour l'espace

À l'environnement spatial correspondent des contraintes spécifiques dont la résistance mécanique liée au décollage, l'absence de gravité, la plus critique d'entre toutes concernant la fiabilité d'instruments prévus pour fonctionner 5 à 10 ans sans panne. La solution viendrait de systèmes dotés de pièces mobiles sans frottement, voire dépourvus de pièces en mouvement.



Installation d'un cryoréfrigérateur de vol sur le cryostat de test.

Comment obtenir des températures cryogéniques dans l'espace? Le moyen le plus simple consiste à profiter des ressources naturelles disponibles – par exemple, celles offertes par le vide quasi parfait de l'Univers et le « fond » froid du ciel. L'absence de matière (notamment de gaz) limite les échanges de chaleur aux seuls transferts **radiatifs**. Dès lors, en se positionnant face au fond noir du ciel qui rayonne à environ 2,7 K, il s'avère théoriquement possible de refroidir une surface jusqu'à des températures de seulement quelques kelvins<sup>(1)</sup>. Dommage qu'en pratique, la méthode ne vaille que pour des orbites particulières – les meilleurs systèmes, appelés **radiateurs passifs**, ne permettant pas d'atteindre des températures inférieures à 30 ou 40 K. Une autre solution consiste à prendre un liquide cryogénique, préalablement liquéfié sur terre et stocké dans un réservoir appelé cryostat, puis de profiter du vide intersidéral pour obtenir un refroidissement par évaporation. Cette technique permet

d'atteindre des températures de 1,5 K en utilisant de l'**hélium** – l'obtention de températures inférieures nécessitant de passer par d'autres solutions technologiques.

### Du cryostat au cryoréfrigérateur

Pourtant, les orientations actuelles de la cryogénie spatiale privilégient la suppression de cryostats au profit de systèmes, appelés **cryoréfrigérateurs**, conçus pour refroidir jusqu'aux températures cryogéniques (en dessous de 120 K). En effet, bien que l'utilisation de cryostats soit une technique simple et offrant de multiples avantages, celle-ci n'en présente pas moins deux inconvénients majeurs : une masse et un volume importants qui limitent la durée de mission en raison de l'assèchement du réservoir. En revanche, les cryoréfrigérateurs peuvent fonctionner quasi indéfiniment car leur source électrique s'alimente grâce à l'énergie **photovoltaïque** disponible dans l'espace, ce dont bénéficient déjà presque toutes les missions spatiales.

Le SBT, notamment le Laboratoire cryoréfrigérateurs et cryogénie spatiale, développe depuis plusieurs

(1) La correspondance entre l'échelle en kelvin (K) avec les degrés Celsius est facile : l'échelle de kelvin prend son origine au zéro absolu (-273,15 °C) et 1 K vaut donc 1 °C.

années des systèmes de refroidissement adaptés aux différentes contraintes spatiales. Pour les froids extrêmes, la solution consiste à associer plusieurs cryoréfrigérateurs en cascade pour couvrir l'intégralité de la gamme des températures. Ces chaînes cryogéniques peuvent atteindre des températures de 20 mK (-273,13 °C). Actuellement, trois technologies émergent pour obtenir le refroidissement d'un composant destiné à une application spatiale, et à des températures inférieures à 1 K (-272,15 °C) :

- le refroidissement par évaporation utilisant un **isotope** de l'hélium (l'hélium 3) ;
- le refroidissement magnétique par désaimantation **adiabatique** ;
- la dilution, c'est-à-dire les propriétés des deux **isotopes** de l'hélium.

Les équipes du SBT développent toutes ces techniques. La première d'entre elles leur a valu une réputation mondiale depuis son utilisation par les instruments SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*) et PACS (pour *Photo detector Array Camera and Spectrometer*) embarqués sur le satellite Herschel. Pour comprendre le principe du cryoréfrigérateur, il faut savoir que le refroidissement par évaporation répond au même mécanisme physique que la transpiration. Pour l'eau, le passage de l'état liquide à l'état de vapeur requiert de l'énergie ; mais en l'absence de toute source de production extérieure d'énergie, la solution pour en obtenir consiste à ponctionner directement sur l'agitation thermique des **atomes**. Par conséquent, il devient alors possible de procéder au refroidissement. Cette propriété vaut pour tous les fluides ou presque, même la transpiration procède de la sorte pour réguler la température corporelle. Pour l'hélium 3, elle permet d'atteindre des températures de -272,85 °C (300 mK). En revanche, l'hélium 3 ne peut couvrir seul l'intégralité de la gamme depuis la température ambiante. Aussi, pour les besoins de la mission Herschel, a-t-il fallu lui associer de l'hélium 4 (un énorme réservoir d'environ 2 500 litres) indispensable pour obtenir une température d'environ 2 K. Concernant les basses températures, il faut souligner que les avancées ne s'apprécient pas en termes de différence mais plutôt de rapport. En l'occurrence, refroidir de 2 K à 300 mK (rapport 7) s'avère pratiquement aussi difficile que de passer de la température ambiante (293 K) à -230 °C (42 K).

Pour optimiser le taux d'évaporation, les chercheurs procèdent par pompage et, pour gagner en fiabilité, s'appuient sur les propriétés d'adsorption des **charbons actifs**, ce qui leur évite l'emploi de pièces mobiles. Il faut dire que ce matériau offre une surface importante ( $\approx 1\,200\text{ m}^2/\text{gr}$ ) qui, une fois refroidie, « piège » les **molécules** de gaz puis, à l'inverse, les « relâche » lorsqu'elles se trouvent chauffées (phénomène d'adsorption physique lié aux **forces de Van der Waals**). Les températures d'**adsorption** et de désorption dépendent alors de la nature du gaz. Dans le cas de l'hélium, en chauffant le charbon actif à -230 °C (45 K), puis en le refroidissant à -270 °C (3 K), il devient possible d'obtenir les pressions nécessaires à la condensation du liquide, puis à son pompage. Ainsi peut-on alors abaisser la pression et donc la température (figure 1). Entièrement statique, ce processus se révèle très efficace en matière d'amplitude de pression. Dans le cas présent, il permet d'obtenir un taux

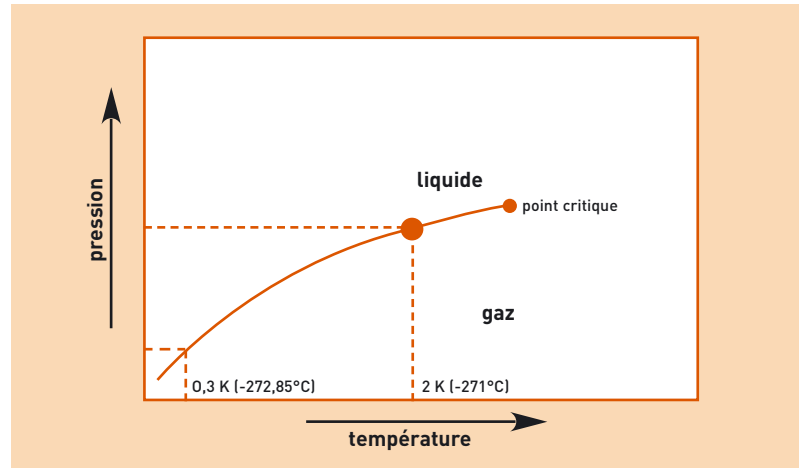
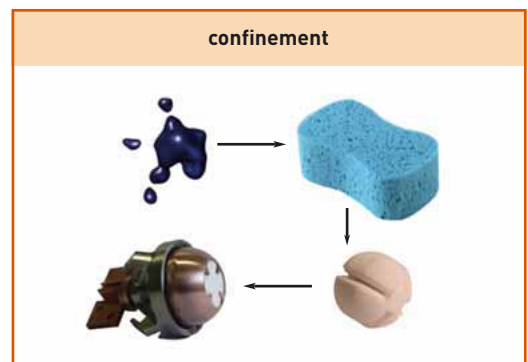


Figure 1. Diagramme de phase de l'hélium 3 avec point extrême du cycle pour le liquide.

de compression/détente de six ordres de grandeur ( $10^6$ ), ce qui n'a pas d'équivalent avec des systèmes mécaniques.

### Un liquide sans gravité

Envoyer des instruments dans l'espace suppose encore de résoudre la question de l'apesanteur. La gestion du liquide se règle par un confinement capillaire au sein d'un matériau poreux jouant le rôle d'éponge. Composé d'une mousse d'alumine, ce matériau présente une porosité ouverte, c'est-à-dire que chaque petite cavité communique avec ses voisines, laissant au liquide la possibilité de se déplacer, et au gaz celle d'être pompé. Le cycle **thermodynamique** ici en vigueur suppose de pouvoir contrôler les gradients thermiques dans le système, c'est-à-dire de maîtriser la répartition des températures. Là encore, le moyen d'y parvenir passe par une technique exempte de toute pièce mobile, à savoir celle des interrupteurs thermiques à gaz d'échange. Dans les systèmes cryogéniques, leur rôle équivaut à celui des interrupteurs électriques : mise en contact thermique de deux composants (écoulement de chaleur) ou, au contraire, isolement de l'un avec l'autre. Le basculement entre la position fermée (*On*) ou ouverte (*Off*) repose sur la présence, ou l'absence, de gaz entre deux pièces concentriques. La gestion du gaz s'opère au moyen d'une minipompe à adsorption, exempte de toute pièce mobile.



Principe du confinement capillaire. L'évaporateur (demi-sphère de titane visible sur la photographie) contient un matériau poreux jouant le rôle d'une éponge.



Essais vibratoires au Centre spatial de Liège. Installation d'un modèle de vol sur la table vibrante.



L. Duband/CEA

## Décollage et résistance mécanique

Enfin, parmi les ultimes contraintes liées à l'envoi d'instruments dans l'espace, mais non des moindres, figurent encore l'isolation thermique nécessaire à l'obtention des très basses températures et la tenue mécanique requise pour résister à un décollage de fusée, celui d'Ariane 5 par exemple. Pour les résoudre, les chercheurs utilisent des suspentes en **Kevlar**. Ce matériau présente le double avantage d'une faible conductivité thermique et d'une très forte résistance mécanique (deux fois la résistance d'un fil en acier de même diamètre). Que la durée de vie de ce type de cryoréfrigérateur ne soit pas limitée, *a priori*, découle directement de l'absence de pièce mobile. La preuve en est que plusieurs systèmes fonctionnent en laboratoire, depuis plus de vingt ans, sans que leurs

performances s'en trouvent altérées. En effet, bien qu'utilisant de l'hélium liquide pour leur fonctionnement à basse température, ces systèmes demeurant scellés peuvent se recycler indéfiniment après l'évaporation de la dernière goutte de liquide. La limite vient seulement de la disponibilité de l'étage supérieur. Ainsi, dans le cas de Herschel, le réservoir principal devrait s'assécher après trois ans et demi de fonctionnement.

Les futures missions SPICA (pour *Space Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics*) et IXO (pour *International X Ray Observatory*) appelleront des moyens de refroidissement visant des températures plus basses encore (50 mK). Le savoir-faire acquis dans le domaine des systèmes 300 mK à évaporation d'hélium, enrichit le développement en cours d'une architecture originale, associant un système du type d'Herschel avec un ou plusieurs étages de désaimantation adiabatique (refroidissement magnétique). Cette combinaison devrait diminuer, de manière significative, la masse du cryoréfrigérateur et donc augmenter la part de « science » embarquée. Pour ces deux futures missions, la chaîne cryogénique se composera uniquement de cryoréfrigérateurs mécaniques : d'où l'allongement possible de la durée des missions ainsi que l'optimisation de la masse « utile » embarquée. Ces avancées acquises, les chercheurs doivent encore relever plusieurs défis technologiques. Le premier d'entre eux concerne l'association d'un système de type Herschel, qui génère des pics de puissance lors des phases de recyclage, avec les étages supérieurs mécaniques qui, eux, acceptent mal ces pics. L'objectif sera donc d'imaginer et de concevoir une architecture thermique permettant de distribuer aux mieux les rejets thermiques.



CEA

Après le décollage, le satellite se retrouve dans le vide de l'espace, livré à la chaleur du Soleil. Ces conditions peuvent être testées, en salle blanche, sur des modèles d'essais.

> **Lionel Duband**

Service des basses températures (SBT)  
Institut nanosciences et cryogénie (Inac)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Grenoble