

MIS
LNF

Journées de technologie du vide. Versailles,
10-14 juin 1974

NOUVELLES PERSPECTIVES DANS LA REFRIGERATION

A FAIBLE PUISSANCE ADAPTEE AU CRYOPOMPAGE *

G. CLAUDET

RESUME :

On étudie les possibilités de réfrigération à des températures de 12 à 15 K ou de 4,2 K en considérant les cycles de Brayton et de Claude.

De nombreux points communs entre ces cycles permettent d'envisager indifféremment la mise en oeuvre de réfrigérateurs à divers niveaux tant de température que de puissance à partir des mêmes composants de base.

La conception modulaire peut être envisagée avec les éléments mis au point : détendeurs, échangeurs de chaleur, compresseurs secs.

Les diverses possibilités de développement sont analysées.

* Communication aux Journées de Technologie 74-
VERSAILLES - 10-14 JUIN 1974.

Nouvelles perspectives dans la réfrigération
à faible puissance adaptée au cryopompage.

G. CLAUDET

1) INTRODUCTION :

Les besoins, en matière de réfrigération autonome, à des niveaux de températures de 4,2 K ou de 15 K, sont très répandus dans les domaines faisant appel, notamment, à la supraconductivité et au cryopompage.

Trois classes peuvent être distinguées selon le niveau de puissance frigorifique nécessaire :

Aux extrêmes, il s'agira soit de la moyenne ou grosse installation dont la puissance dépasse, par exemple, 10 W à 4,2 K ou 100 W à 15 K, pour laquelle de nombreuses solutions industrielles existent et donnent satisfaction (cycles de Claude à turbine ou à piston labyrinthe, machines stirling) soit de la très petite unité, ne pouvant être alimentée à partir de liquide, dont la puissance se chiffre en dixièmes de watt à 4,2 K. Dans ce domaine, la fiabilité est généralement la spécification essentielle sur de très longs temps de fonctionnement et les appareils à circulation alternée du fluide de type Gifford-Mac Mahon sont sans concurrents.

Dans la classe intermédiaire, qui concerne les puissances de quelques watts à 4,2 K et quelques dizaines de watts vers 15 K, la diversité des applications est telle que le nombre et l'importance relative des diverses spécifications peuvent varier considérablement selon les cas.

Si l'on admet que l'appareil universel n'existe pas, il faut se résoudre à rechercher celui qui présente le meilleur compromis entre les paramètres essentiels suivants : coûts d'investissement et de fonctionnement, durée de fonctionnement continu ou par campagne, automatisme, compacité, nuisance (vibrations, bruit) souplesse d'adaptation à différents besoins etc ...

En ce qui concerne le développement d'une gamme d'appareils, il nous a paru préférable, non de mettre au point un réfrigérateur optimisé, de structure figée, nécessitant à l'utilisation de s'adapter à lui, mais plutôt, de choisir un cycle frigorifique aux très larges possibilités pouvant être mis en oeuvre à partir de composants standardisés et modulaires, capables de résoudre le plus grand nombre possible de problèmes tout en minimisant le prix de revient.

2) CHOIX DU CYCLE :

La liquéfaction de l'hélium est toujours obtenue par détente de Joule-Thomson dans une cascade du même nom comportant une chaîne d'échangeurs de chaleur à contre courant d'hélium en circulation continue.

Cette liquéfaction ne peut avoir lieu et être entretenue que si le gaz a été prérefroidi par une source frigorifique auxiliaire à un niveau de température voisin de 15 K.

Cette source auxiliaire peut être constituée soit par un appareil à circulation alternée (Stirling, Gifford, etc ...) soit par un appareil à circulation continue du fluide (Brayton).

Nous avons choisi, au niveau 15 K, le cycle de Brayton ; d'une part, pour conserver l'homogénéité avec le cycle Joule-Thomson (circulation continue et échangeurs de chaleur à contre-courant) ; d'autre part, en tenant compte de la facilité avec laquelle on peut en extraire la puissance.

- Pour une utilisation à distance, le gaz de cycle est directement disponible.

- Pour le prérefroidissement d'un cycle Joule-Thomson, on obtient une meilleure efficacité avec un échangeur à contre-courant plutôt que par circulation du gaz à refroidir sur la tête isotherme d'une machine à circulation alternée.

La figure 1 représente schématiquement les cycles de Brayton (1 a) et de Joule Thomson (1 b) qui, fondus ensembles, donnent le cycle de Claude (1 c) souvent utilisé.

L'analyse de ces cycles nous amène à relever, dans le cycle de Claude, un certain nombre d'inconvénients qui peuvent être évités par l'utilisation conjointe mais séparée des cycles de Brayton et Joule-Thomson.

Considérons le cycle de Claude :

- Deux valeurs de débit sont rencontrées (généralement dans un rapport de 2) et nécessitent pour les échangeurs de chaleur notamment, deux géométries différentes.

- L'échangeur de chaleur situé au niveau 15 à 20 K est parcouru par des débits différents dans chacun de ses circuits ; son efficacité est nécessairement limitée.

- La valeur de la basse pression BPc est commune, cela constitue une contrainte supplémentaire.

- La valeur de la haute pression HPc est commune alors que généralement deux valeurs optimales distinctes seraient préférables pour le fonctionnement et du détendeur et de la cascade Joule-Thomson.

- Une régulation soignée doit permettre de maintenir la haute pression à une valeur convenable tout en assurant une bonne répartition des débits entre les deux branches parallèles.

Dans le cas ou les deux cycles de Brayton et Joule-Thomson sont décrits séparément tous ces inconvénients disparaissent :

- Tous les échangeurs sont parcourus par un même débit.
- L'échangeur du niveau 15 à 20 K est équilibré.
- Les deux niveaux basse pression peuvent être différents.
- Les deux niveaux de haute pression peuvent être différents.
- La régulation de débit est directement obtenue par le dimensionnement des compresseurs.

On remarquera encore que la solution à cycles séparés, que nous avons adoptée, permet d'envisager indifféremment et très facilement le développement soit d'un appareil 4,2 K soit d'un appareil 15 K déjà inclus dans le précédent.

3) PRINCIPAUX COMPOSANTS :

3.1. Le détenteur :

Il s'agit d'un détenteur alternatif à piston, de conception simplifiée {1}, robuste et de faible prix de revient.

Son originalité réside dans les deux points essentiels suivants :

- La commande des clapets est obtenue automatiquement par le mouvement du piston lui même.
- L'étanchéité piston cylindre est réalisée par une lèvres déformable qui donne un bon compromis frottement-fuite sans usinage délicat.

Cet appareil peut fonctionner à toutes les températures de 11 à 300 K dans une plage de vitesse de 150 à 300 tr/mn permettant d'ajuster facilement son débit donc sa puissance.

On estime à 2000 H sa durée de fonctionnement sans révision ; après cette période, son échange standard peut s'effectuer très facilement puisqu'il prend place dans un fourreau auquel il n'est connecté que dans la partie chaude.

La figure 2 donne l'efficacité du détendeur en fonction de sa vitesse de rotation pour une admission à 23 K sous 10,5 ata.

3.2. Les échangeurs de chaleur :

Parmi toutes les géométries envisageables, celles qui donnent un des meilleurs compromis entre écart de température et perte de charge utilisent une circulation orthogonale du gaz par rapport à la surface d'échange constituée soit de fils conducteurs soit d'un réseau de tubes.

Dans ce dernier cas, on obtient l'échangeur de type Hampson que nous avons utilisé.

Ce type d'échangeur nécessite un montage très soigné du faisceau de tubes réservant à l'écoulement du gaz un grand nombre de canaux identiques. Il en résulte souvent un prix de revient trop élevé.

Pour éviter cet écueil nous avons mis au point un mode de réalisation basé sur la fabrication en série d'éléments de base standardisés que l'on réunit ensemble en fonction des besoins.

Les éléments ainsi obtenus sont groupés et connectés dans une même enveloppe pour former une cartouche d'échange.

Ces cartouches peuvent alors être utilisées à tous les niveaux de température en nombre variable pour constituer les échangeurs de chaleur nécessaires.

3.3. Les compresseurs :

Nous nous sommes orientés vers des appareils à membranes permettant de garantir l'étanchéité du circuit et la pureté du gaz de cycle.

La conception modulaire est maintenue pour ce composant constitué de têtes de compression standards que l'on associe en nombre voulu pour obtenir les débits et les pressions souhaités.

Les têtes de compression sont équipées de membrane en néoprène et leur refroidissement est assuré par une circulation d'eau.

Avec deux étages de compression on atteint le niveau 10 ata nécessaire au circuit de Brayton ; des débits de 6, 11 et de 15 N m³/h peuvent être engendrés.

Le circuit Joule-Thomson est actuellement alimenté sous la même pression de 10 ata mais l'expérimentation en cours permettra avec 3 étages de compression d'atteindre une pression de 20 ata et de ce fait un doublement de la puissance frigorifique actuellement disponible à 4,2 K.

4) DIVERSES POSSIBILITES :

La souplesse d'utilisation, du cycle adopté, et des composants mis au point permet d'effectuer un grand nombre de combinaisons entre les températures atteintes et les puissances développées.

Avec le cycle de Brayton utilisé seul, on obtiendra par exemple :

- 20 à 30 Watts vers 60-80 K avec le compresseur de 6 m³/h.
- 10 Watts vers 15 à 20 K avec le compresseur de 11 m³/h.
- 7 Watts vers 11 à 13 K avec le compresseur de 15 m³/h.

Dans ces deux dernières versions, on pourra utiliser l'azote liquide pour réduire l'investissement ou s'en dispenser en utilisant soit des échangeurs surdimensionnés, soit un deuxième détendeur.

En associant aux cycles 15-20 K ou 11-13 K précédents un circuit Joule-Thomson alimenté par 11 m³/h sous 20 ata on obtiendra à 4,2 K soit 5 et 6 watts en réfrigération soit 1,2 et 2 l/h en liquéfaction.

Un prototype de réfrigérateur 4,2 K actuellement à l'essai fournit 3 Watts avec une alimentation à 10 ata ; le doublement de sa puissance sera obtenu par doublement de la pression.

L'expérimentation en cours porte sur la mise au point des automatismes (vanne de détente Joule-Thomson, mise en froid) dans le but d'obtenir un appareil capable de fonctionner sans intervention.

5) CONCLUSION :

Les solutions proposées sont de nature à résoudre de très nombreux besoins en matière de cryopompage à 4,2 K et à 15 K ainsi que dans les applications où il serait nécessaire d'extraire la puissance simultanément à ces deux niveaux de température.

La gamme de puissance envisagée s'étend à 4,2 K de 0,5 W à 6 W et si l'on admet, dans les applications au cryopompage, une correspondance entre vitesse de pompage et puissance frigorifique de 10 l/s d'azote pour 1 mW, on constate qu'un grand nombre de possibilités sont offertes en utilisant soit un appareil par pompe soit un appareil pour plusieurs pompes.

La conception modulaire des composants et la fabrication en série d'éléments standardisés devraient permettre de réduire considérablement les frais d'investissement.

REFERENCE :

{1} G. CLAUDET, J. VERDIER.

Simplified cryogenic reciprocating expansion engine.

ICEC 4 Eindhoven 24,26 Mai 1972.

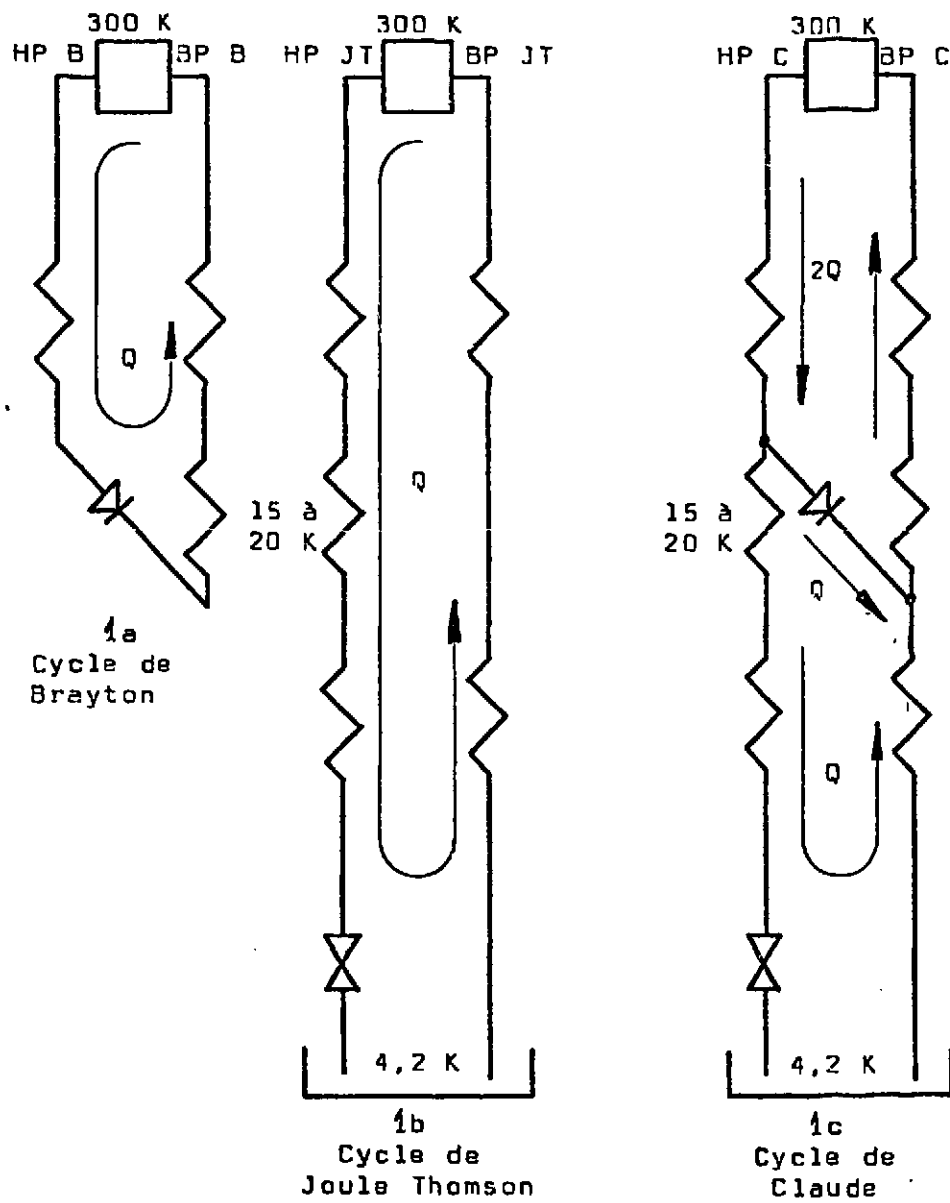


Figure 1 : Schéma de cycle

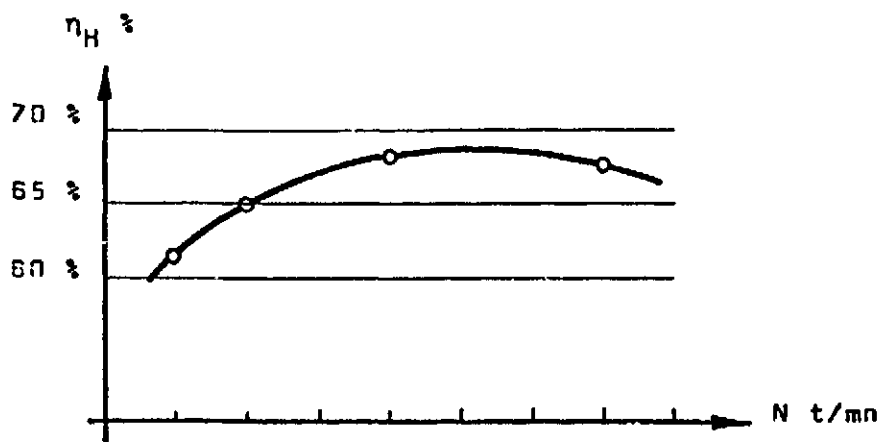


Figure 2 : Efficacité du détendeur à 23 K, 10,5 ata .