

Hydrotechnique des liquides industriels

QUESTION III

RAPPORT 2

QUELQUES PARTICULARITÉS DE LA RÉFRIGÉRATION A L'HÉLIUM LIQUIDE

G. CLAUDET et J. VERDIER

C.E.A.-C.E.N.G., Département de Transfert et Conversion d'Énergie.

Après avoir brièvement décrit le principe général de fonctionnement d'un cycle thermodynamique enlevant de la chaleur à 4,2 °K, on montre que, quelles que soient les solutions adoptées pour les appoints frigorifiques aux niveaux de températures intermédiaires, on est toujours ramené pour le dernier étage, à l'utilisation d'une « cascade de Joule-Thomson » que l'on étudie en détails en recherchant les conditions optimales de fonctionnement et de prérefroidissement.

On envisage les possibilités de réalisation de la dite cascade, rendue particulière par la nature même de l'hélium gazeux dont le comportement vers 5 à 15 °K est très différent de celui du gaz parfait.

On décrit un procédé permettant de séparer aisément les phases du mélange obtenu par détente et on indique deux exemples d'installations, utilisant les dispositions considérées, en fonctionnement au Centre d'Études Nucléaires de Grenoble pour la réfrigération des dispositifs d'irradiations à basse température.

The general operating principles of a thermodynamic cycle extracting heat at 4.2 °K is briefly described and it is shown that, whatever the cooling method applied at intermediate temperatures, a 'Joule-Thomson cascade' invariably has to be used for the final stage. This is discussed in detail, whilst attempting to establish the optimum operating and pre-cooling conditions. Practical design aspects of the cascade are considered, which is in a special category due to the special behaviour of helium gas between 5 °K and 15 °K, which differs considerably from that of a perfect gas.

A simple process for separating the phases of the mixture obtained by expansion is described and reference is made to two low-temperature radiation equipment cooling installations of the above type at the Grenoble Nuclear Research Centre.

1. — INTRODUCTION

L'hélium est de tous les fluides cryogéniques le plus difficile à liquéfier et la réfrigération à 4,2 K demande une puissance à température ambiante environ 1 000 fois supérieure à celle que l'on peut utiliser dans le bain liquide.

La liquéfaction de l'hélium peut être obtenue par détente adiabatique du gaz convenablement refroidi. Cette détente peut être réalisée dans une machine qui fournit du travail, la transformation est alors isentropique donc réversible, ou dans

un ajutage où se produit la détente de Joule Thomson isenthalpique donc irréversible.

La détente avec un travail extérieur provoque un refroidissement de l'hélium quelles que soient les conditions initiales. Elle peut être réalisée, soit dans des turbines qui permettent de traiter des débits importants, soit dans des machines à piston qui conviennent dans une plus large gamme de débits.

Ces machines supportent très mal la présence de liquide et ne sont couramment utilisées que pour refroidir le gaz jusqu'à un niveau de température assez bas pour ensuite permettre la liqué-

faction par détente de Joule Thomson. Ce procédé correspond au cycle de Claude qui est particulièrement adapté à la liquéfaction de l'hélium et à la réfrigération à 4,2 K, quelles que soient les variantes utilisées pour le prérefroidissement notamment utilisation d'hydrogène ou de néon liquide, de machines frigorifiques à cycle de Brayton, Striling, etc.

La cascade de Joule-Thomson constitue, dans le procédé, l'objet des particularités que nous étudions dans cet exposé.

2. — DÉTENTE DE JOULE-THOMSON DE L'HÉLIUM. INTÉRÊT DE LA DOUBLE DÉTENTE

La détente isenthalpique d'un gaz parfait est isotherme mais pour les gaz réels, suivant les conditions initiales de la transformation (pression et température), elle peut conduire soit à un échauffement, soit à un refroidissement toujours assez faible. Pour chaque condition de pression initiale et finale, il existe une température dite d'inversion de l'effet Joule-Thomson : en-dessous de cette température, il y a refroidissement, en-dessus, il y a échauffement. Dans les couples de pression (HP et BP), utilisés dans les réfrigérateurs à hélium, cette température d'inversion est de l'ordre de 40 à 50 K. Pratiquement pour avoir un refroidissement utilisable dans un échangeur de chaleur, il convient d'opérer le prérefroidissement de l'hélium autour de 15 à 20 K.

Considérons le cas simple où la cascade de Joule-Thomson se compose d'un échangeur de chaleur et d'une vanne où s'effectue la détente (fig. 1). Il s'agit du fonctionnement en réfrigérateur où il n'y a ni soutirage, ni accumulation de liquide, le débit en masse du fluide est le même dans toutes les parties du circuit, nous le supposons unitaire.

Notons H et T , l'enthalpie et la température.

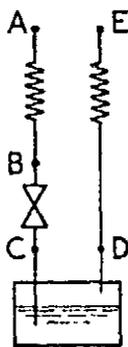


FIG. 1. — Simple détente.

Q représente la chaleur apportée au bain liquide.

La détente s'effectuant à enthalpie constante, le bilan thermique s'écrit :

$$H_A + Q = H_E$$

d'où l'on tire :

$$Q = H_E - H_A$$

La puissance frigorifique ne dépend que de l'écart d'enthalpie des fluides entrant et sortant, donc des conditions de prérefroidissement.

Le diagramme température-enthalpie se prête particulièrement bien à la recherche des meilleures conditions de prérefroidissement.

On a représenté sur la figure 2 la partie de diagramme correspondant à des températures inférieures à 20 K sur laquelle on a porté les points A et E correspondant aux conditions d'entrée et de sortie de la cascade.

$T_A \geq T_E$ indique le sens des échanges thermiques;

$H_A \leq H_E$ correspond au fait que le cycle enlève de la chaleur;

$P_A \geq P_E$ découle du fait que le fluide sera détendu.

L'examen du diagramme montre que pour une température T_A donnée, $H_E - H_A$ (puissance frigorifique disponible) est maximale quand :

1 — P_E est minimale.

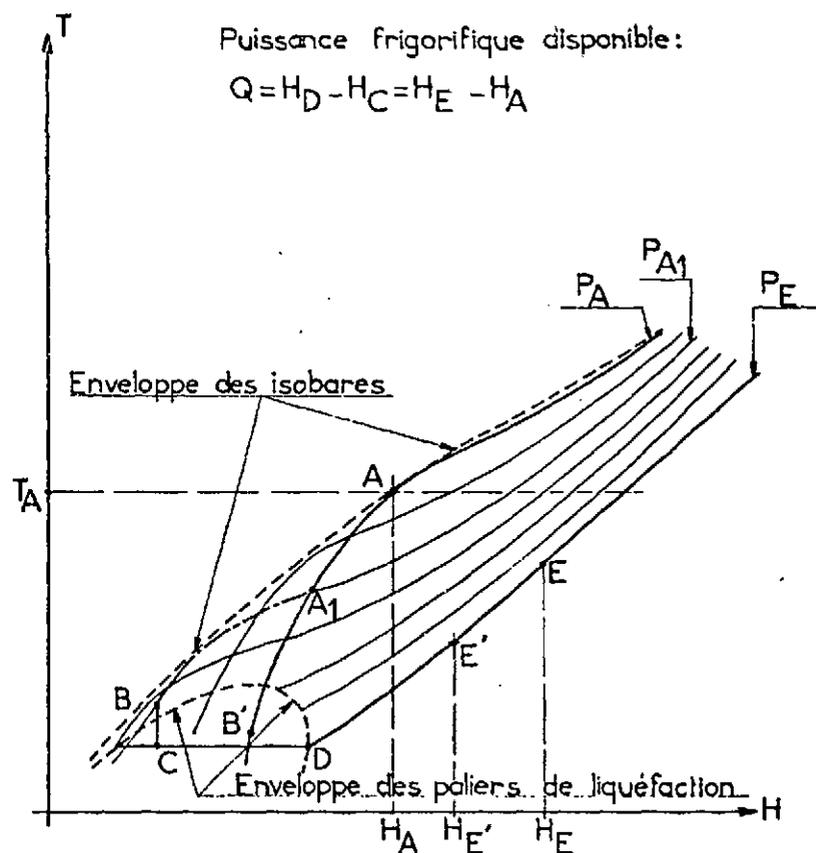


FIG. 2. — Isobares dans diagramme enthalpie - température.

2 — $T_A - T_E$ est minimale.

3 — P_A est sur l'enveloppe des isobares.

Les conditions 1 — et 3 — sont obtenues par le choix convenable des pressions de cycle (HP et BP) et l'optimisation des pertes de charge dans les échangeurs.

Pour satisfaire la condition 2, faible écart de température au bout chaud de l'échangeur, il ne suffit pas toujours de disposer des surfaces d'échange convenable.

Il faut aussi que le fluide HP puisse céder de la chaleur en conservant une température supérieure à celle du fluide BP qui reçoit cette chaleur, cela revient à dire que le fluide HP doit avoir une chaleur spécifique en moyenne supérieure ou au moins égale à celle du fluide BP.

Sur le diagramme enthalpie-température, la chaleur spécifique dH/dT est l'inverse de la pente des isobares et l'on voit que sur l'isobare P_A choisie, les échanges de chaleur ne pourront s'effectuer que jusqu'en B' ou l'écart au bout froid ($T_B - T_D$) tend vers zéro. La puissance disponible $H_D - H_B = H_E - H_A$ est faible, les frigorifiques $H_E - H_{E'}$ du fluide BP ne peuvent pas être récupérées.

Pour surmonter cette difficulté, on a la ressource d'effectuer, en cours de refroidissement du fluide HP au point A_1 par exemple, une détente préliminaire amenant la pression de P_A à P_{A_1} où le fluide HP reprend une chaleur spécifique suffisante, les échanges de chaleur peuvent alors se poursuivre jusqu'en B, et la puissance frigorifique disponible au bout chaud de l'échangeur peut être utilisée en totalité : $H_D - H_B = H_E - H_A$.

Le schéma figuratif de la cascade de Joule-Thomson à double détente est celui de la figure 3. D'une façon générale, la double détente présente un certain intérêt lorsque la haute pression du cycle est supérieure à 15 ou 20 bars.

3. — SÉPARATION DES PHASES

On s'aperçoit que malgré l'artifice de la double détente, une fraction seulement du fluide se trouve liquéfiée, cette fraction correspond, en masse, sur le diagramme de la figure 2 au rapport de la longueur du segment CD à celle du palier de liquéfaction.

Or, dans de nombreuses applications, on souhaite utiliser le liquide à l'endroit même où il est produit, mais séparé de sa phase vapeur; d'autre part, si on peut produire une phase tota-

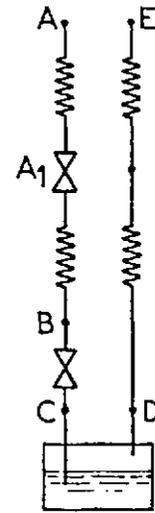


FIG. 3. — Double détente.

lement liquide, on évite l'entraînement du « brouillard » par les vapeurs.

Une solution avantageuse de ce problème est la suivante : au lieu de détendre le fluide à la sortie du dernier échangeur de la cascade, on le refroidit, par un serpentin dans le bain liquide, avant la détente, suivant le schéma de la figure 4.

Sur le diagramme de la figure 5, on voit que le gaz est amené du point B au point K où sa température est très voisine de celle du liquide. En ce point, se produit la détente isenthalpique et la

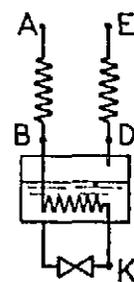


FIG. 4. — Séparation des phases.

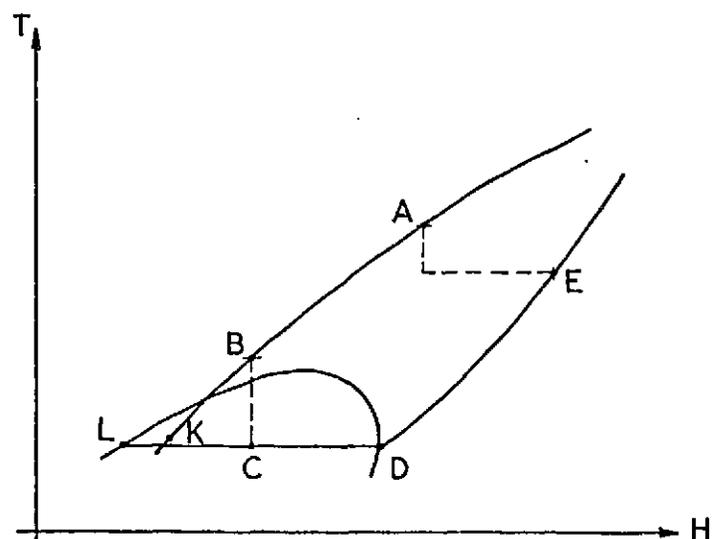


FIG. 5. — Diagramme enthalpie - température de la séparation des phases.

quantité de liquide formée n'est plus dans le rapport CD/LD, mais dans le rapport KD/LD considérablement supérieur et voisin de 1.

En fait, cette opération qui permet de liquéfier à la détente la presque totalité du gaz, ne modifie en rien le rendement de liquéfaction, car la chaleur cédée par le gaz $II_B - II_K$ est apportée sur le bain liquide et le bilan thermodynamique de l'opération est le même que si on avait opéré la détente au point B; on a simplement changé le lieu et le mécanisme de formation des phases.

On pourra être amené, lorsqu'on veut opérer de cette façon, à choisir, pour la deuxième détente, une isobare ABK moins favorable que celle qui aurait pu être choisie du seul point de vue de l'optimisation des échangeurs de la cascade, mais dont le point figuratif K soit encore plus près de L.

4. — EXEMPLES D'OPTIMISATION DE CASCADES JOULE THOMSON

4.1. Le dispositif d'irradiation à hélium liquide du réacteur Mélusine. (Double détente, séparation des phases) [1].

Ce dispositif est un réfrigérateur à hélium liquide associé à un reliquéfacteur d'hydrogène qui assure le prérefroidissement de l'hélium.

En pompant sur le bain d'hydrogène liquide, on abaisse la température de prérefroidissement au voisinage de 17 K.

Le fonctionnement du dispositif est interprété à l'aide du schéma et du diagramme de la figure 6. Pour le refroidissement convenable des échantillons noyés dans l'hélium liquide et soumis au rayonnement nucléaire du réacteur, on a utilisé l'artifice de séparation des phases, tandis que l'optimisation du cycle est obtenue en choisissant 30 bars pour la haute pression; la basse pression, compte tenu des pertes de charge des échangeurs, n'a pu être abaissée au-dessous de 1,5 bars. L'écart de température au bout chaud de l'échangeur étant de 0,8 K environ, on dispose de 9 joules/gramme pour la réfrigération avec un débit de 6 g/s (120 Nm³/h), cela fait 54 watts.

Une simple détente de 30 b à 1,5 bars s'effectuerait à 5,5 K et malgré une aussi basse température, la puissance utile ne dépasserait pas 12 W.

En utilisant la double détente et en effectuant la première détente au point A₁ de croisement de l'isobare 30 b avec l'isobare 10 b, on peut récupérer la totalité des 54 W, la deuxième détente s'effectuant au point B à 6,1 K, suivant le parcours BC, ou environ 50 % du fluide est transformé en liquide. Mais en B au lieu d'effectuer la détente, on refroidit davantage le fluide à 10 b dans le serpentin BK; au point K à 4,5 K on effectue la détente et c'est 88 % du fluide qui est

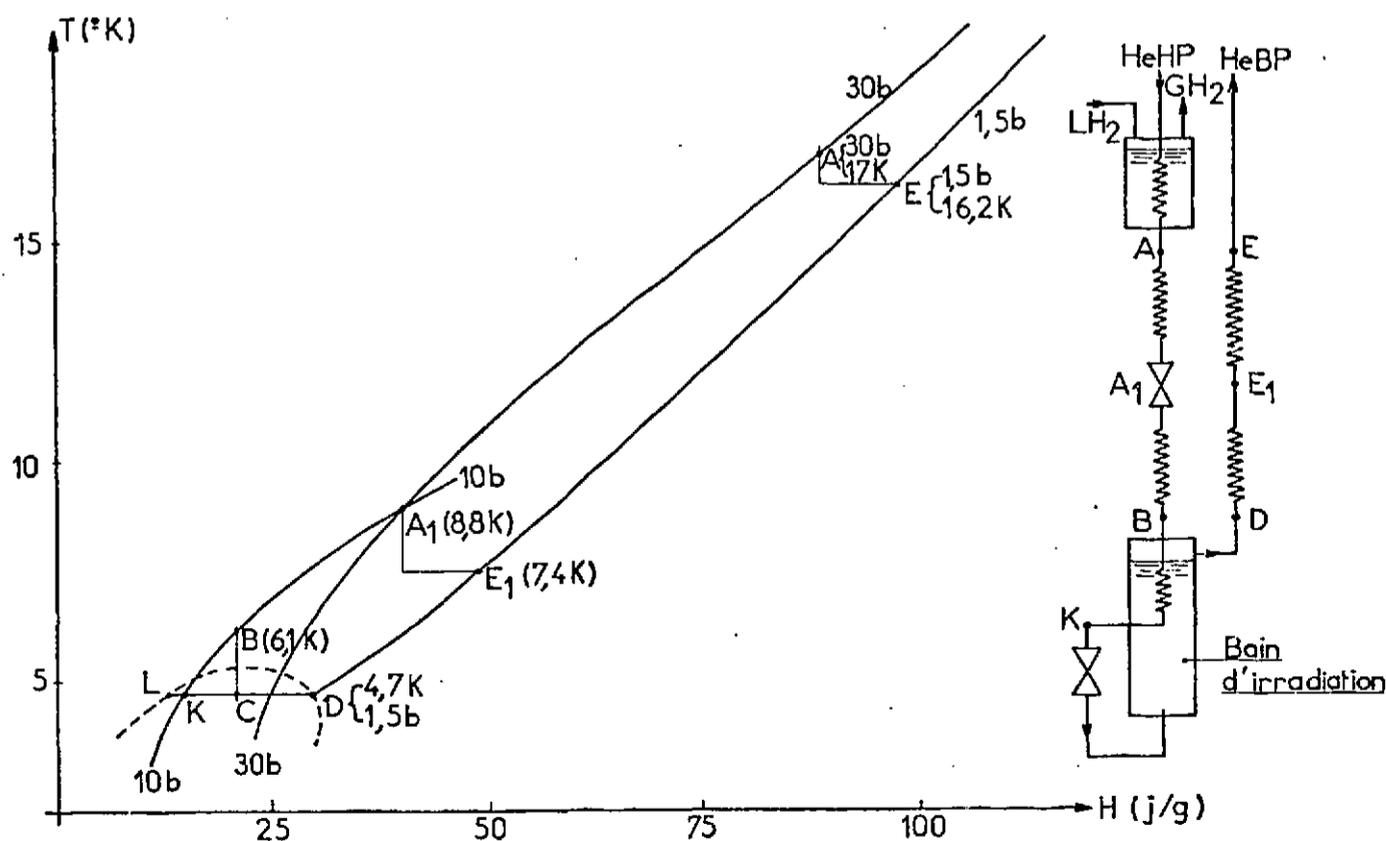


FIG. 6. — Réfrigérateur à LHe pour irradiation aux neutrons. Schéma et diagramme H/T.

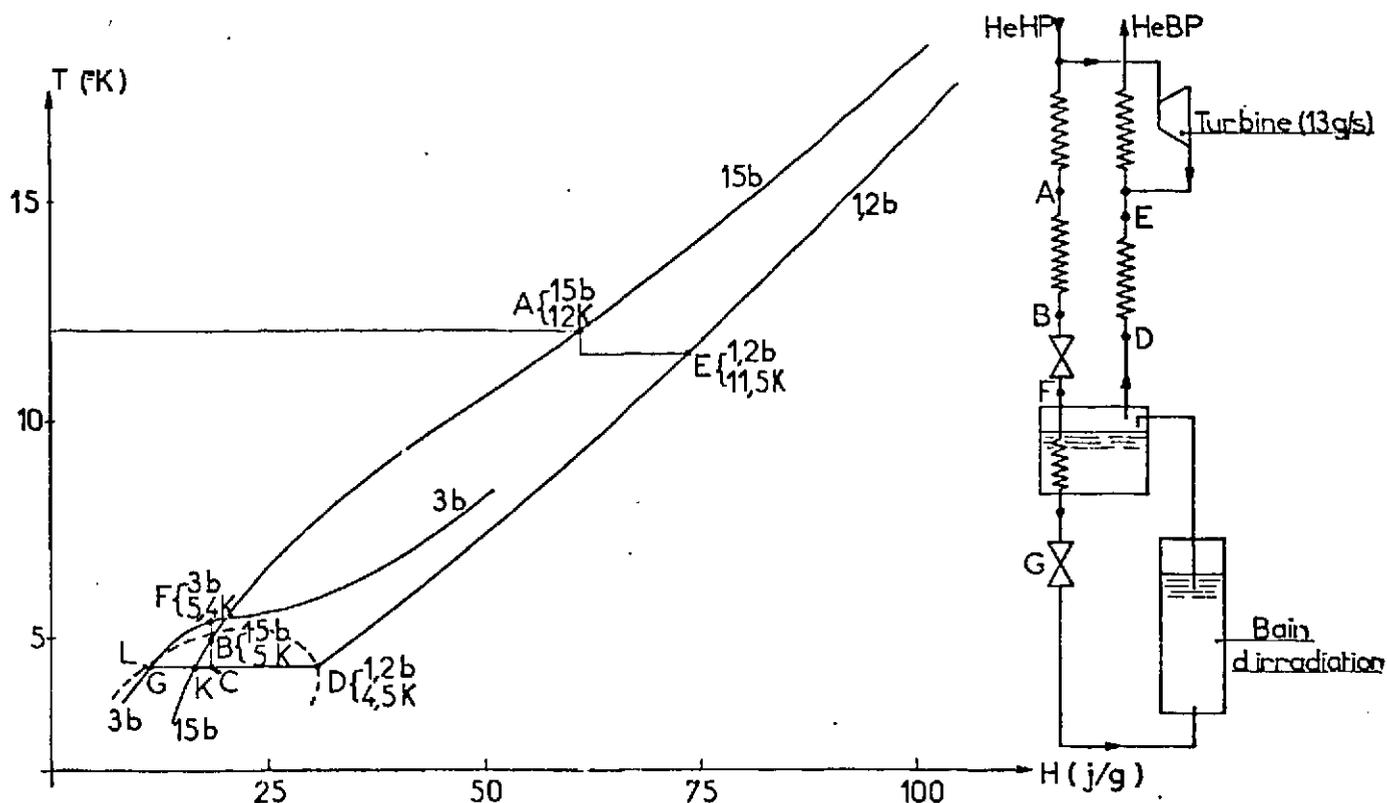


FIG. 7. — Réfrigérateur à LHe pour irradiation aux électrons. Schéma et diagramme H/T.

transformé en liquide. Rappelons que 38 % sont évaporés au niveau du serpentin et que seuls 50 % sont utilisables pour la réfrigération.

4.2. Le dispositif d'irradiation à hélium liquide auprès de l'accélérateur VDG 4 du C.E.N.G. [2] ⁽¹⁾ (séparation des phases).

Il s'agit d'un réfrigérateur à hélium liquide utilisant un cycle de Claude, le prérefroidissement de l'hélium avant la cascade Joule-Thomson étant assuré par détente d'une partie du débit de cycle dans une turbine à paliers gaz (13 g/s d'hélium sont traités dans la turbine et 11 g/sec dans la cascade Joule-Thomson). Le fonctionnement de la cascade est interprété à l'aide du schéma et du diagramme de la figure 7.

L'optimisation du cycle est obtenue en choisissant une haute pression de 15 b et une température de prérefroidissement de 12 K. La double détente n'est pas nécessaire, comme le montre clairement le diagramme, puisqu'au point B, l'écart de température au bout froid de l'échangeur est encore de 0,5 K.

Cependant, en C, la production de liquide ne serait que 60 % du débit traité, si on utilise l'artifice de prérefroidissement dans le bain liquide, on peut aller faire la détente en K et produire 70 %

de liquide. Mais on préfère utiliser un perfectionnement de cet artifice qui consiste à détendre le fluide en B de 15 à 3 b : sans varier d'enthalpie le fluide s'échauffe de 5 à 5,4 K, mais il pourra alors être refroidi suivant le parcours BG et être détendu en G où la production de liquide est de 95 %.

Ainsi avec le débit de 11 g/sec, on produit 300 litres par heure d'hélium liquide, dont 190 seront utilisables pour la réfrigération.

5. — CONCLUSIONS

Ces remarques sur l'interprétation des cycles par les diagrammes enthalpie-température de l'hélium au voisinage de la liquéfaction, montrent l'intérêt qu'il y a à examiner de très près les propriétés thermodynamiques de l'hélium en-dessous de 15 K lorsqu'on veut l'utiliser pour la réfrigération en-dessous de 5 K.

En particulier, les variations importantes de chaleur spécifique dans ce domaine de température conduisent à imaginer des artifices technologiques permettant une bonne utilisation des propriétés du fluide.

Il est assez important de remarquer, en particulier, qu'une détente au voisinage de 5 K peut produire une élévation de température, mais aussi

(1) Cette installation a été étudiée en collaboration avec le Centre d'Etudes Cryogéniques de l'Air Liquide, 38-Sassenage et réalisée par ses soins.

une telle augmentation de chaleur spécifique que le bénéfice qu'on peut en tirer est très inattendu.

On peut, par exemple, comme nous l'avons souligné dans l'exemple 4.2., entretenir un débit

de 300 l/h d'hélium liquide avec une installation qui, si elle fonctionnait en liquéfacteur (même compresseur, même turbine), ne produirait que 25 l/h de ce fluide.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. CLAUDET. — *Installation d'irradiation aux neutrons à la température de l'hélium liquide*. Thèse, Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble (1969).
- [2] Y. DEPIERRE, J. VERDIER, P. ARTIGUEBIELLE, D. MARINET, P. SOLENTE. — *Réfrigérateur d'hélium 130 watts, 4,5 K associé à un cryostat d'irradiation aux électrons*. IIF Commission I, Tokyo (1970).