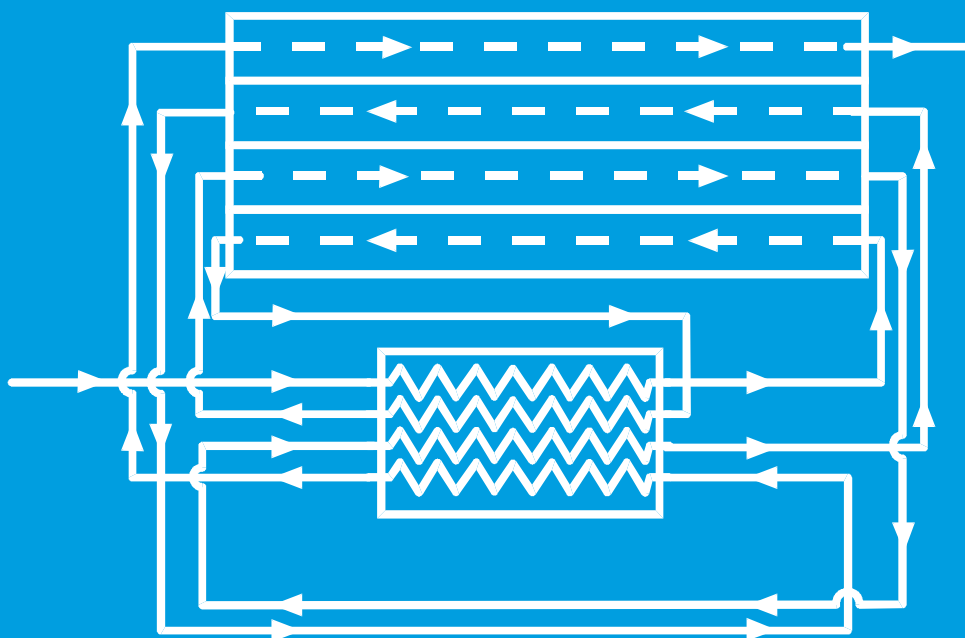
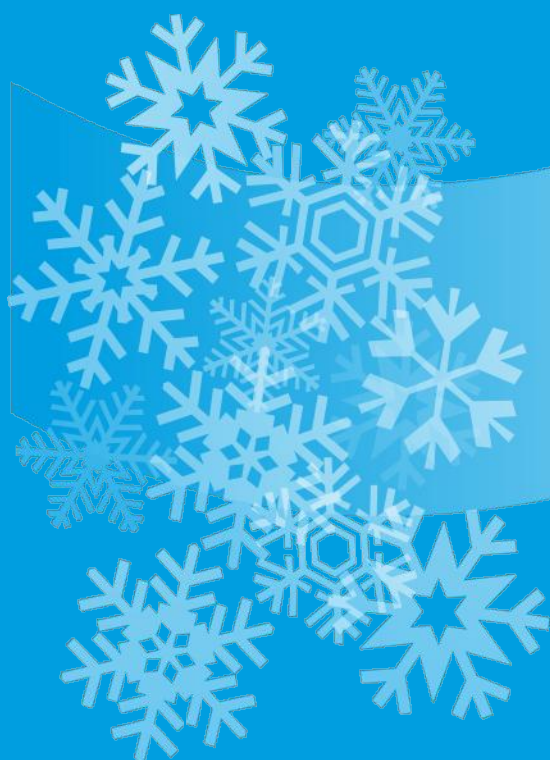


LA THERMALISATION RLD

*Son application aux écrans radiatifs
des enceintes de VIDE THERMIQUE*



SOMMAIRE

I - INTRODUCTION	3
II - FONCTIONNEMENTS ECRANS EN MODE LN₂	4
II-1 Fonctionnement idéal	4
II-2 Comment réaliser cet objectif?	4
II-2.1 En rendant le Pillow Plate modulaire	4
II-2.2 En associant un échangeur de rethermalisation au Pillow Plate	6
II-2.3 Mode opératoire	6
III - FONCTIONNEMENT DES ECRANS EN MODE TEMPERATURE VARIABLE	8
IV EXEMPLE DE REALISATION	10
IV.1. Thermalisation par panneaux rayonnants des faces supérieure et inférieure d'un satellite	10
IV.2. Implantation des panneaux rayonnants dans l'enceinte de vide thermique ESPACE 500	11
V - PERSPECTIVES DE LA THERMALISATION RLD	12
V-1 Caractéristiques spécifiques	12
V-2 Applications aux enceintes VTC de grand volume utile	13
V-3 Enceintes VTC de petit volume utile	13
VI - CONCLUSION	14

I - INTRODUCTION

Un satellite en orbite est soumis à une ambiance radiative dans la gamme de température $-190 / + 200^{\circ}\text{C}$. Cette ambiance est recréée dans les enceintes de Vide Thermique de volume utile 100 dm^3 à 500 m^3 adaptées aux dimensions du spécimen à tester, composants, sous-ensembles ou satellite complet.

Les échanges thermiques radiatifs sont assurés par des écrans qui tapissent toute la surface intérieure de la chambre :

- Un écran cylindrique en périphérie.
- Des écrans disques à chaque extrémité.

La thermalisation des écrans s'effectue par circulation interne d'un fluide à température régulée. Le plus souvent cette circulation s'effectue dans des écrans à double enveloppe matelassée, en acier inoxydable, soudées au laser, généralement appelés "**Pillow Plates**". Pour assurer totalement leur fonction, les Pillow Plates doivent être régulés en température entre $- 190$ et $+ 200^{\circ}\text{C}$.

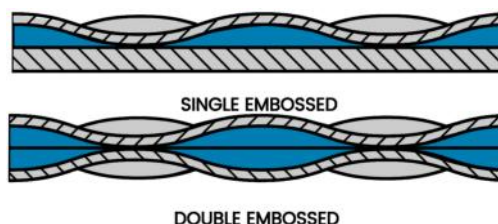
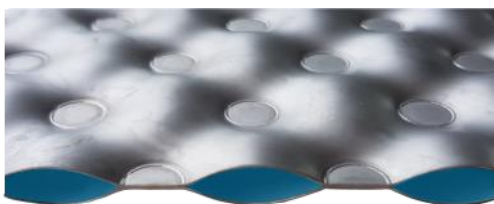


Figure 1 Pillow Plate : écran double enveloppe en tôles inox, matelassées, soudées au laser

À cet effet on dispose :

- D'azote liquide à température d'ébullition normale de $- 196^{\circ}\text{C}$.
- De résistances chauffantes électrique.

Les Pillow Plates doivent être capables de fonctionner:

- En « mode LN_2 » avec une température en tout point inférieure à $- 190^{\circ}\text{C}$
- En mode « température variable » avec une température en tout point uniforme à $\pm 5^{\circ}\text{C}$ dans la plage de température $- 190^{\circ}\text{C} / + 200^{\circ}\text{C}$.

Ceci pour une charge thermique max de 1,5 kilowatt par mètre carré, avec une vitesse de transition en température de l'ordre de plus ou moins 2°C par minute.

La technologie proposée assure également l'optimisation énergétique des échanges azote liquide et gazeux, ce qui implique :

- En **mode LN_2** utilisation de toute la chaleur latente du LN_2 injecté dans le système avec à l'évent un gaz azote légèrement surchauffé.
- En mode **température variable** l'utilisation :
 - De toute la chaleur latente de vaporisation de l'azote liquide injecté.
 - De la chaleur sensible du gaz azote généré jusqu'à la température de régulation des écrans.

II - FONCTIONNEMENTS ECRANS EN "MODE LN₂"

II-1 Fonctionnement idéal.

Quel serait le fonctionnement idéal d'un Pillow Plate soumis à une charge thermique P en mode LN₂ ?

- Son rendement thermique serait égal à 1 c'est-à-dire que l'azote en sortie d'écran serait intégralement gazeux, en légère surchauffe, à une température de l'ordre de -190°C.
- Ceci signifierait la consommation instantanée C_{LN₂} serait égale à :

$$\frac{P}{\Delta H_{\text{vap}}}$$

avec ΔH_{vap} = enthalpie de vaporisation du LN₂.

- Il absorberait la puissance P répartie sur toute la surface de l'écran de façon homogène ou hétérogène par vaporisation progressive du débit C_{LN₂} entrant.

Donc dans la progression du flux d'azote introduit dans l'écran il y aurait réduction de la phase liquide jusqu'à sa disparition totale en sortie.

En résumé l'écran n'accumulerait pas de LN₂ (il n'y aurait pas de ballast LN₂ à l'intérieur de l'écran).

II-2 Comment réaliser cet objectif?

II-2.1 En rendant le Pillow Plate modulaire.

Le Pillow Plate adapté RLD se différencie de l'écran standard par un agencement du circuit interne en n modules.

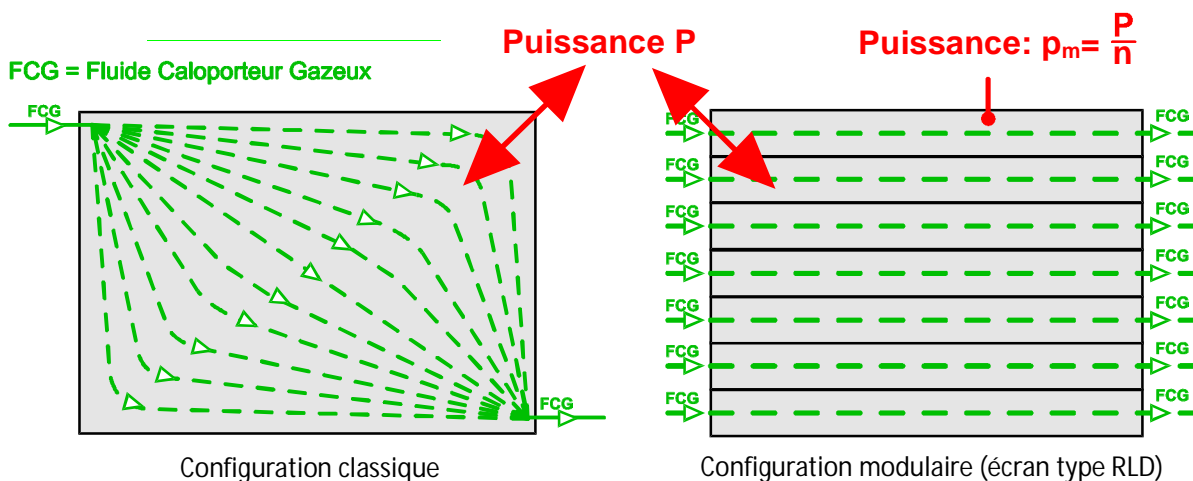


Figure 2: comparaison écran standard et écran modulaire



Figure 3 : Ecran Pillow Plate plurimodulaire 3800mm X 925mm (dix modules)

II-2.2 En associant un échangeur de rethermalisation au Pillow Plate.

Cet échangeur est de type bloc aluminium caractérisé par une température homogène dans tout son volume.

L'échangeur comporte des circuits tubulaires internes en nombre égal au nombre de modules du Pillow Plate.

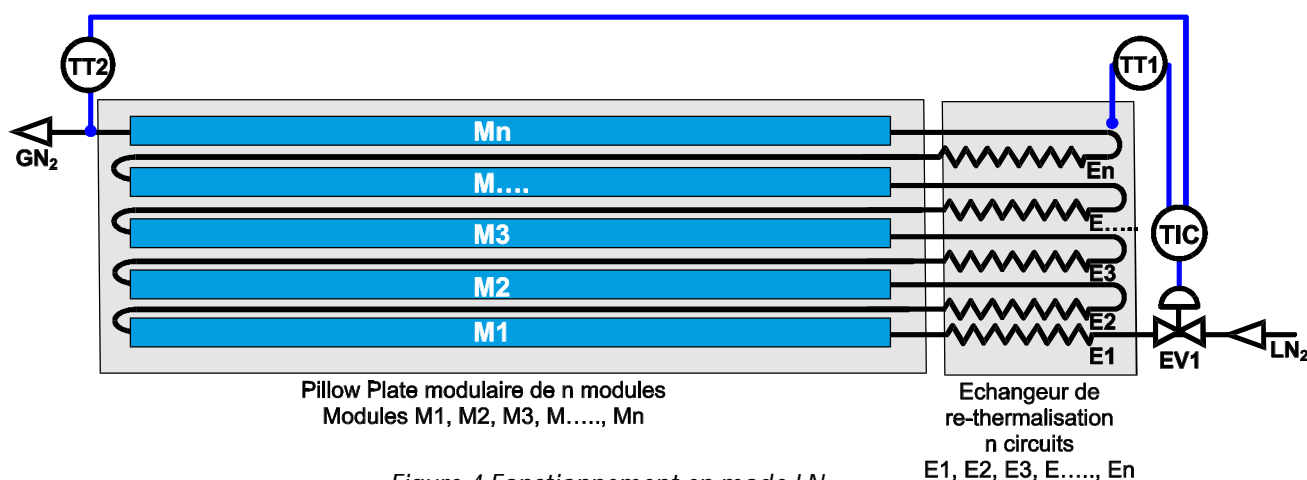


Figure 4 Fonctionnement en mode LN_2

II-2.3 Mode opératoire.

Partant du Pillow Plate et de l'échangeur de rethermalisation à température ambiante on alimente en LN_2 l'échangeur E1 du bloc de rethermalisation.

Le flux d'azote circule alors alternativement en série dans les échangeurs E1...En du bloc de rethermalisation et les modules M1...Mn du Pillow Plate en refroidissant ces derniers par vaporisation de l'azote liquide et chaleur sensible de l'azote gazeux créé.

Lors de cette circulation d'azote liquide et gazeux on assiste via l'azote gazeux généré à un transfert de chaleur des modules du Pillow Plate vers le bloc aluminium de rethermalisation.

On va donc ramener de la chaleur de l'écran vers l'échangeur de rethermalisation pendant toute la durée de la mise en froid de l'écran.

Cela signifie que le LN_2 entrant dans le bloc de thermalisation démarre sa vaporisation dès son entrée dans le bloc et cela jusqu'à ce que la température du dernier module de l'écran se rapproche de $-196^\circ C$.

Donc pendant toute la durée de mise en froid l'échange thermique s'effectue en convection forcée, en mode diphasique et azote surchauffé sur l'ensemble Pillow plate / bloc aluminium.

Il y a donc très peu d'azote liquide contenu dans le système thermique, cela simplifie le mode de régulation qui s'effectue par 2 sondes de température :

- La première TT1 sur le bloc aluminium.
- La seconde TT2 sur la sortie azote gazeux du dernier module de l'écran.

Ces deux sondes TT1 et TT2 via un régulateur TIC 1 contrôlent en tout ou rien la vanne électropneumatique EV1.

Les points de consigne pour TT1 et TT2 se situent vers $-190^\circ C$.

Vu sous l'aspect énergétique, ce mode de mise en froid de l'écran utilise non seulement la chaleur latente de vaporisation de l'azote liquide (de l'ordre de 190 kilojoules par kg), mais également la chaleur sensible de l'azote gazeux froid généré par l'évaporation de l'azote liquide (jusqu'à 200 kilojoules par kg pour de l'azote gazeux évacué à 0°C).

Par rapport aux écrans thermiques traditionnels qui fonctionnent par remplissage en "mode LN₂" on devrait diviser par deux la consommation azote liquide de mise en froid d'autant plus que l'on profite de la diminution de la chaleur spécifique de l'acier inoxydable à basse température. En régulation de température stabilisée à -190°C on travaille à une température inférieure à -185°C sur l'ensemble des échangeurs avec évacuation à l'atmosphère d'azote surchauffé vers -190°C. On utilise donc pleinement la chaleur latente de l'azote liquide en mode LN₂ stabilisé contrairement aux écrans traditionnels où l'évent est souvent diphasique. Il n'est pas impossible - ceci reste à confirmer par des tests expérimentaux vu la complexité des échanges thermiques mis en œuvre - que l'on puisse pendant la mise en froid des écrans procéder à des tests à des paliers de température compris entre +20°C et -196°C.

Dans le mode LN₂ l'azote en circulation forcée à un rôle double :

- Fluide frigorigène qui fournit au système à refroidir sa chaleur latente et sensible.
- Fluide caloporteur qui assure le transfert de l'énergie thermique du « Pillow Plate » vers l'échangeur de rethermalisation.

La circulation de l'azote dans le système est essentiellement gouvernée par les forces de pression avec une influence négligeable de la gravité.

L'implantation des Pillow Plates à l'intérieur de l'enceinte VTC n'étant plus tributaire de la gravité, on a une grande liberté pour la disposition, l'orientation, de ces derniers dans la VTC.

C'est une rupture technologique par rapport à l'existant.

III FONCTIONNEMENT DES ECRANS EN “MODE TEMPERATURE VARIABLE”

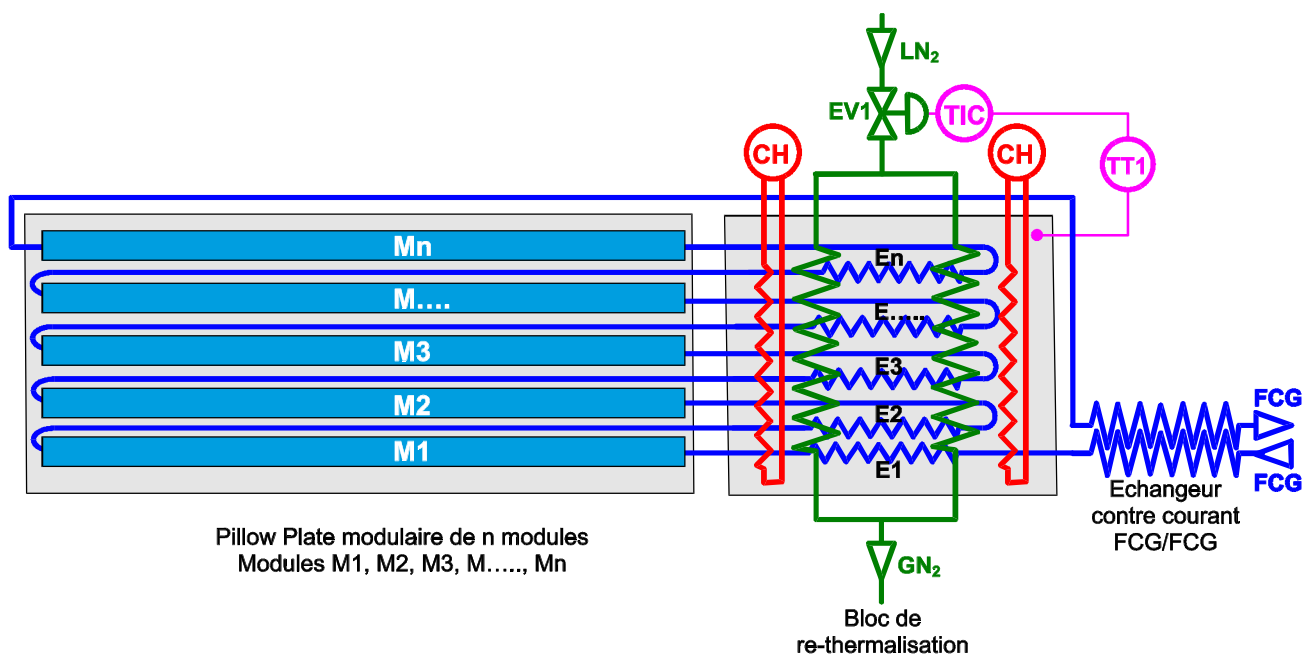


Figure 5 Fonctionnement en “mode Température Variable”

Sur le schéma figure 5:

- on remplace l'alimentation LN_2 de la figure 4 par une alimentation en gaz azote (FCG, Fluide Caloporteur Gazeux) sous pression, à température ambiante :

Ce FCG travaille:

- soit en circuit ouvert avec rejet à l'atmosphère, il est alors généré par vaporisation de LN_2 .
- soit en circuit fermé avec recyclage par compresseur sec suivant figure 6.

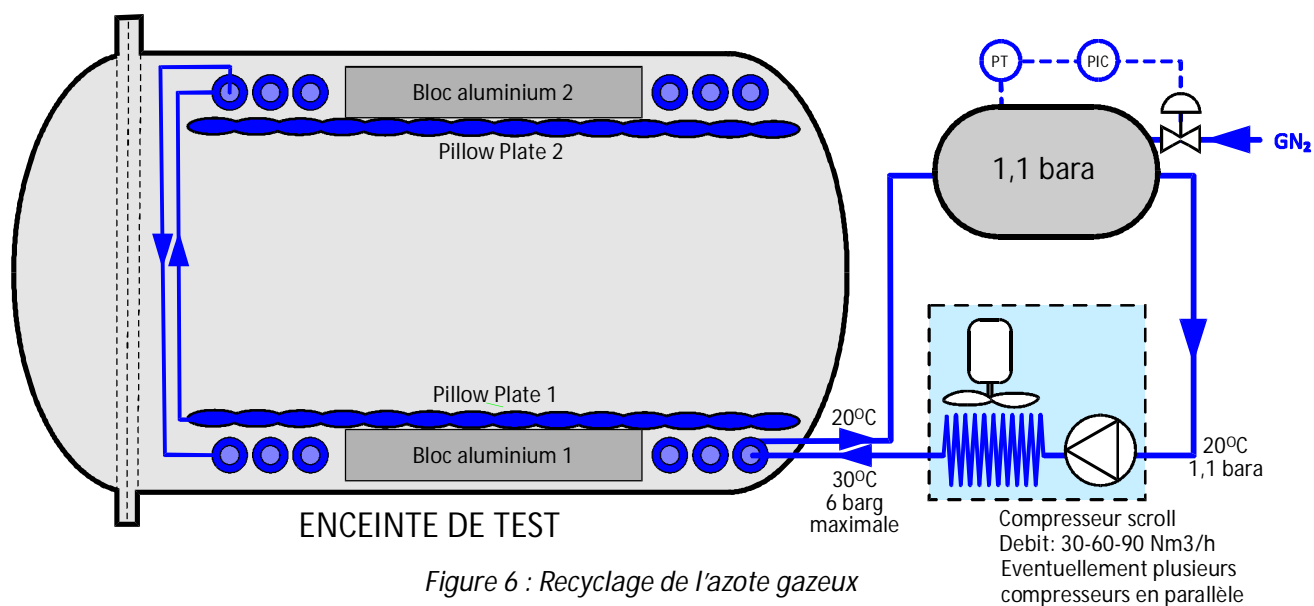


Figure 6 : Recyclage de l'azote gazeux

- On implante un échangeur à contre-courant de haute efficacité thermique entre l'entrée du FCG dans l'échangeur E1 du bloc de rethermalisation et la sortie FCG du dernier module Mn du « Pillow Plate ».
- On équipe le bloc de rethermalisation:
 - d'échangeurs alimentés en LN₂.
 - d'éléments chauffants électriques.

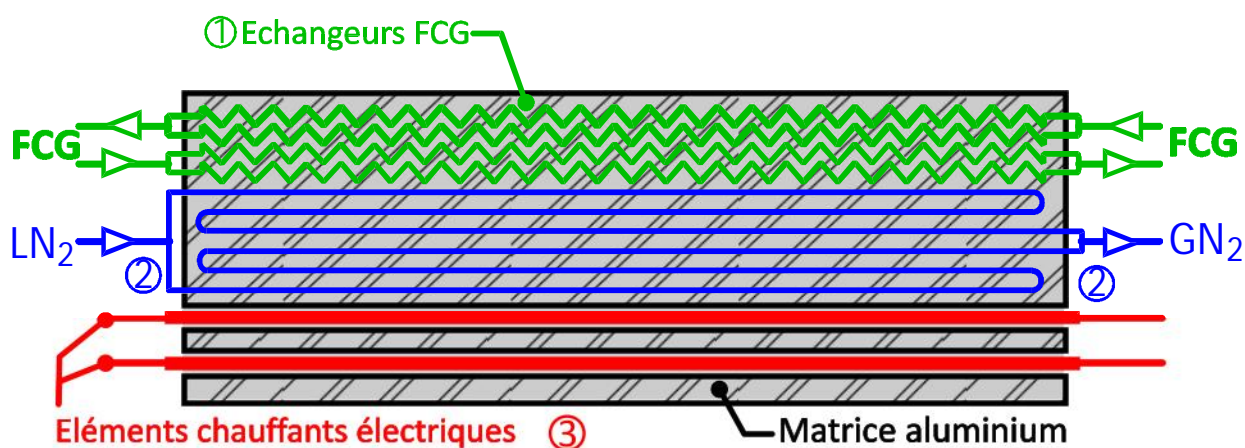


Figure 7 : Schéma échangeur de re-thermalisation à matrice aluminium

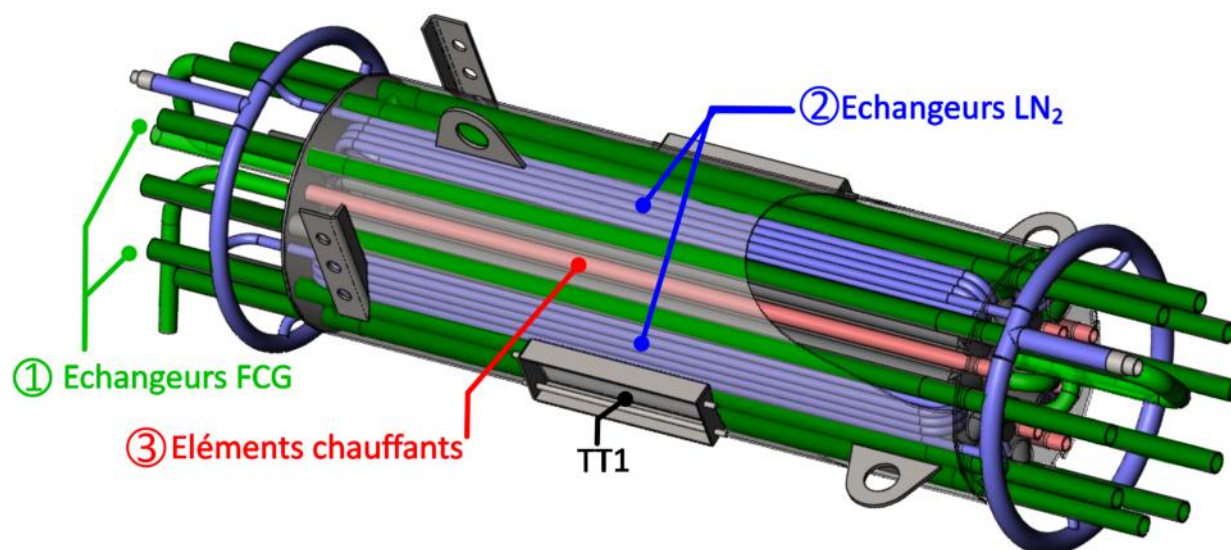


Figure 8 : Agencement des circuits thermiques dans la matrice aluminium

Dans cette nouvelle configuration, par régulation de la température TT1 de l'échangeur de rethermalisation, on obtient une température homogène, proche de TT1, du « Pillow Plate » associé, dans la plage de température -175/+200 °C.

IV EXEMPLE DE REALISATION EN “MODE TEMPERATURE VARIABLE”

IV.1. Thermalisation par panneaux rayonnants des faces supérieure et inférieure d'un satellite

Il s'agit du satellite de communication KONNECT

- Pour chaque face 7 panneaux rayonnants.
- Panneaux supérieurs : 3800 x 925mm x7
- Panneaux inférieurs : 2800 x 925mm x7



Figure 9 : Montage des panneaux rayonnants -1



Figure 10 : Montage des panneaux rayonnants -2

IV.2. Implantation des panneaux rayonnants dans l'enceinte de vide thermique SPACE 500

Cette enceinte d'un volume utile de 500 m³ est installée chez Thales Alenia Space à Cannes



Figure 11: Positionnement des panneaux rayonnants/satellite



Figure 12: Positionnement des panneaux rayonnants/satellite

V - PERSPECTIVES DE LA THERMALISATION RLD

V.1- Caractéristiques spécifiques

- Avec cette thermalisation les 2 modes LN_2/GN_2 à température variable se déroulent en parfaite continuité; il en résulte un contrôle-commande simple .
- Cette thermalisation met en œuvre essentiellement des échangeurs thermiques (composants passifs), à maintenance quasi nulle.
- Les seuls composants dynamiques sont des compresseurs de gaz fonctionnant à température ambiante, composants standards, implantés à distance de la salle blanche de l'enceinte VTC.
- Tous les échangeurs thermiques sont à l'intérieur de l'enceinte VTC, sous vide, l'isolation thermique est donc optimale sur le plan énergétique.
- La seule limitation en puissance est la puissance installée, de $1.5kW/m^2$ de panneau radiatif.
- Les interfaces des échangeurs thermiques logés à l'intérieur de l'enceinte VTC et l'extérieur sont des traversées de paroi de l'enceinte sous vide réduites en nombre et en dimension (tuyauteries à faible DN (DN 20 max)), elles sont résumées dans la figure ci-dessous.

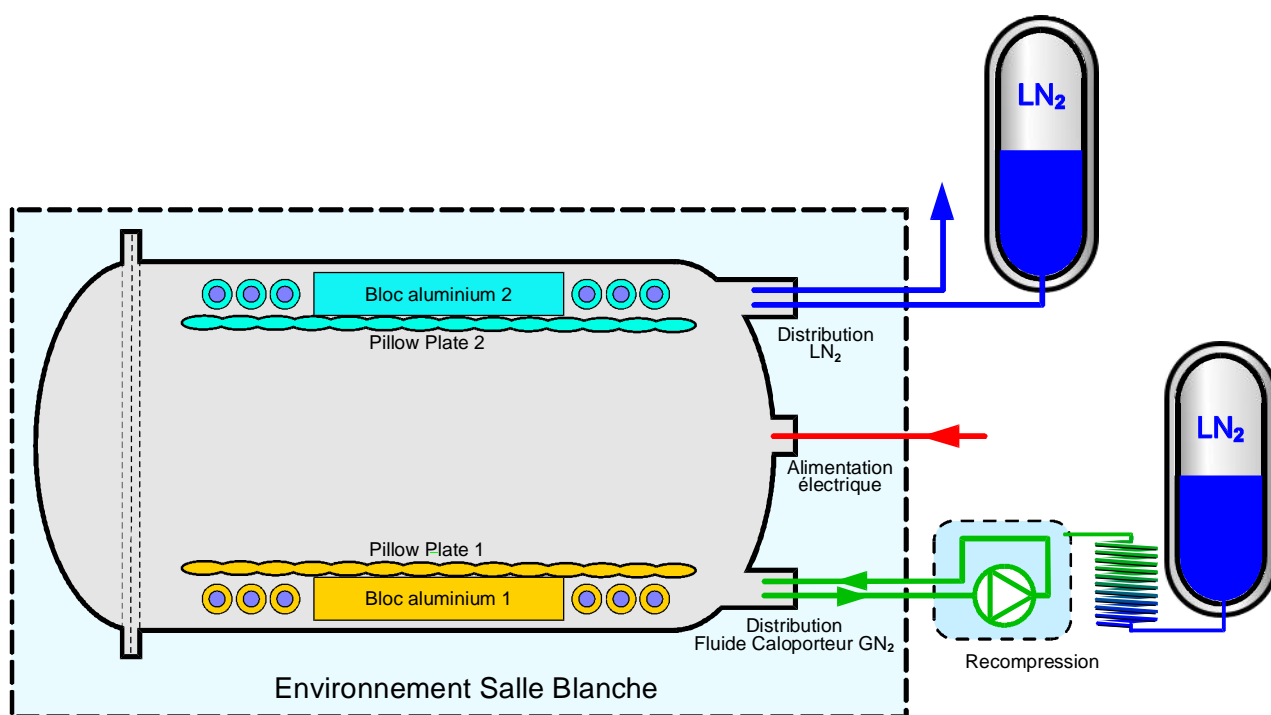


Figure 13: Interfaces

- Vu sous l'aspect énergétique, plus spécifiquement la consommation LN_2 , ce type de thermalisation constitue la référence; la consommation LN_2 prévisible, pour un cycle opératoire donné, peut être approchée rigoureusement par le calcul.
- L'implantation des écrans à l'intérieur de l'enceinte VTC est indépendante de la gravité; on retrouve une grande liberté pour la disposition, l'orientation, de ces derniers.

V.2 Applications aux enceintes VTC de grand volume utile

On privilégiera un assemblage d'écrans Pillow Plate plans, disposés longitudinalement suivant figure 14 ci-dessous

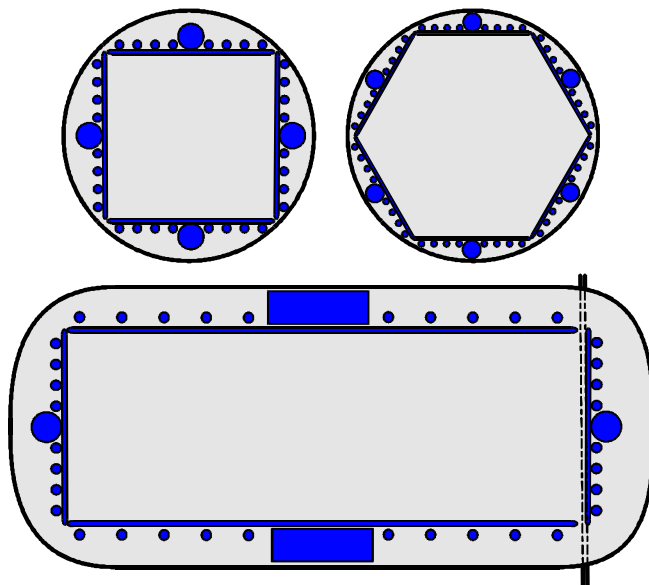


Figure 14: Dispositions types d'écrans RLD pour enceintes VTC grand volume

V.3 Enceintes VTC de petit volume utile

Pour des dimensions longitudinales et transversales inférieures à 2 mètres, les écrans de type Pillow Plate peuvent être difficiles à implanter, du fait de leur forme, circulaire ou cylindrique, avec de nombreuses ouvertures (réservations pompes, passages électriques, etc...). Ils seront avantageusement remplacés par les écrans type RLD constitués de tubes unis par des ailettes. (Cf. Brochure THERMAVAC sur www.thermique-ingenierie.fr).

Les circuits FCG sont organisés en modules :

- pour les 3 écrans: porte, fond, cylindrique associés au bloc aluminium de re-thermalisation écrans pour le plateau conductif associé au bloc aluminium de re-thermalisation plateau conductif avec des profils de température indépendants.

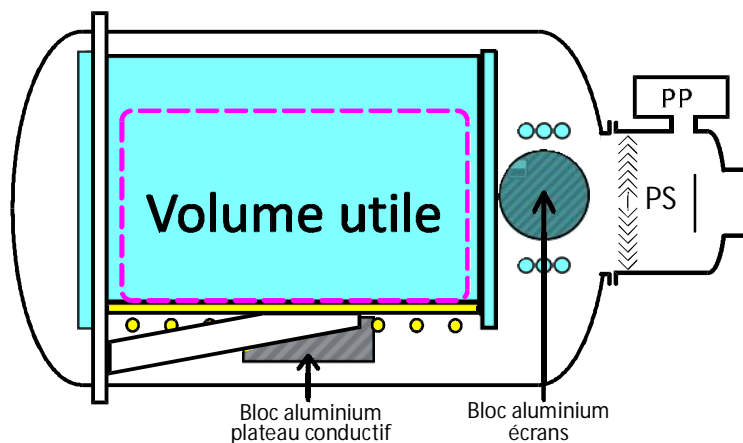


Figure 15: Enceinte VT avec plateau conductif

VI - CONCLUSION.

Si on se réfère à l'état présent les enceintes de vide thermique ont une durée de vie supérieure à 50 ans.

Une analyse du parc actuel montre que les grandes enceintes en service ont été, pour la plupart, conçues en période d'opulence énergétique, avec pour objectif la réalisation des performances attendues, quelle que soit la technique employée et la consommation énergétique en découlant. Or ces enceintes consomment un fluide cryogénique, l'azote liquide, de coût énergétique beaucoup plus élevé que les autres utilités.

Alors que l'horizon énergétique a radicalement changé, (concrétisé par les recommandations de la COP21), les cahiers des charges émis restent très discrets sur les performances énergétiques attendues.

La thermalisation RLD répond aux exigences de la thermalisation des enceintes VTC dans l'industrie spatiale. Elle permet une réduction drastique des consommations LN_2 par comparaison aux systèmes existants utilisant des techniques conventionnelles.

Sa mise en œuvre nécessite une association d'échangeurs, dans un arrangement spécifique, intégrés dans une matrice aluminium. Ce type d'échangeur, dans ces versions complexes, n'existait pas encore sur le marché.

Le concept de thermalisation RLD ne se limite pas au spatial, ni aux fluides cryogéniques, j'invite donc les lecteurs à trouver d'autres domaines d'application.

RLD Thermique - Ingénierie
7, Avenue Marie Curie - 38500 Voiron - 0033 (0)673 743 879
contact@thermique-ingenierie.fr
www.thermique-ingenierie.fr

