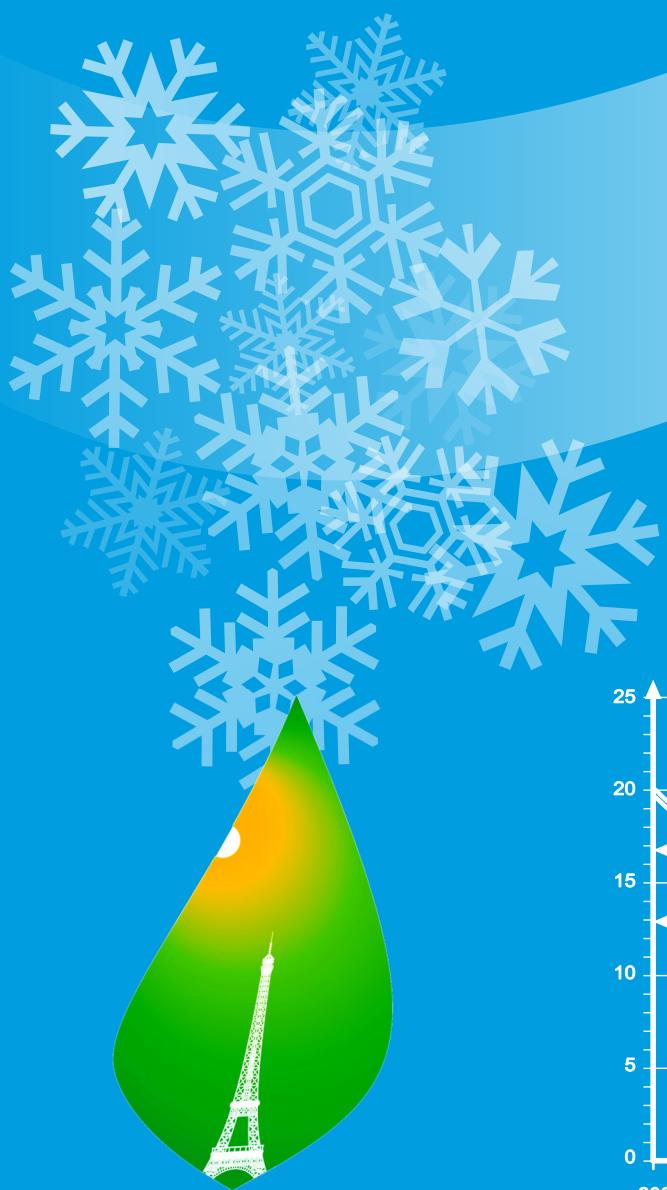
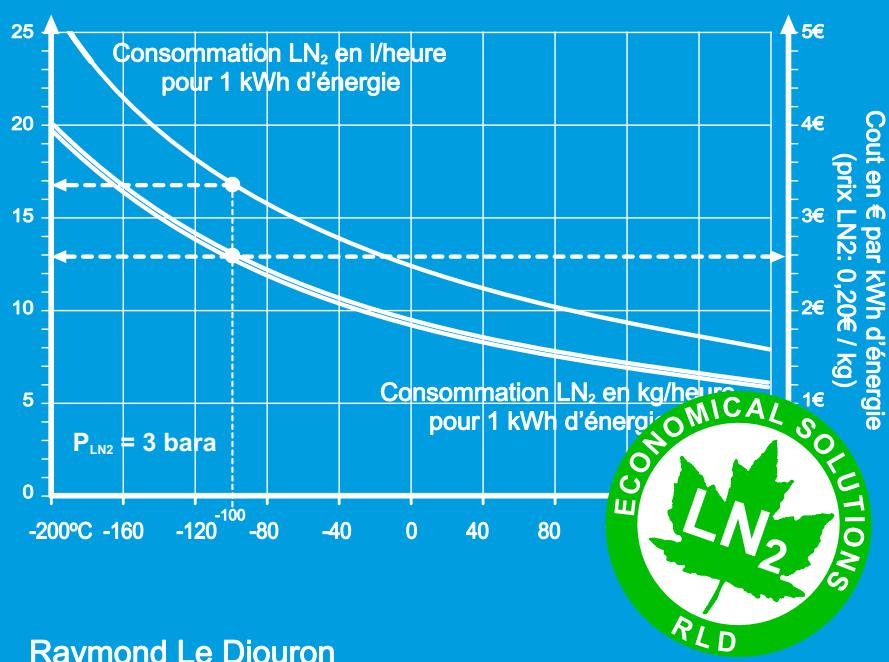


IMPACT ENERGETIQUE

cryogénie en simulation spatiale



PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE



Raymond Le Diouron



VIDE THERMIQUE

Les composants embarqués sur les satellites sont soumis lors de leur durée de vie spatiale :

- Au vide interstellaire
- Aux contraintes thermiques dus à leur exposition cyclique au rayonnement solaire

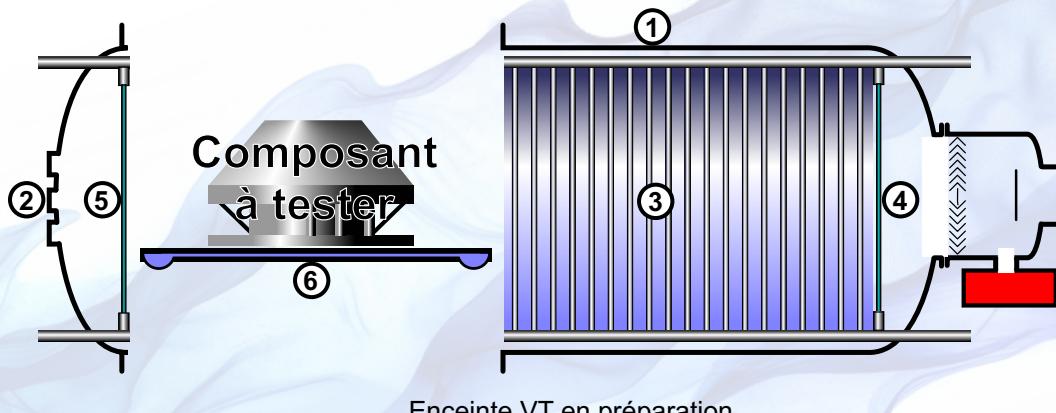
Afin d'assurer leur fonctionnement sans failles pendant toute la durée de vie du satellite, il y a nécessité de tester chaque composants avant le lancement.

Les tests s'effectuent dans des enceintes dites de VIDE THERMIQUE (VT) qui assurent :

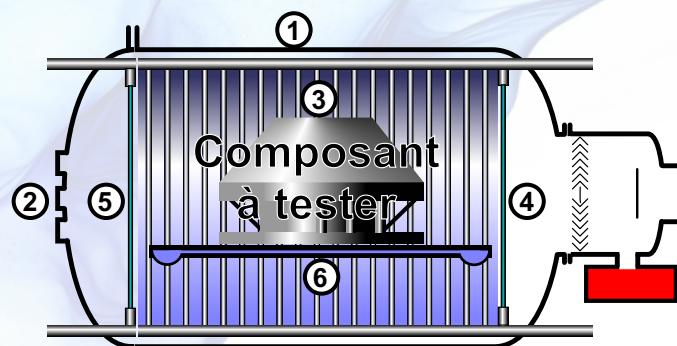
- Un vide de l'ordre de 10⁻⁶ mbar
- Un environnement thermique dans la gamme de température la plus large possible, typiquement -180°C/+200°C, voire au delà.

La structure de base des enceintes de vide thermique comporte un caisson sous vide ① avec une porte ② à accès intégral. L'intérieur du caisson sous vide est équipé :

- d'écrans radiatifs
 - Ecran cylindrique ③
 - Ecran fond ④
 - Ecran porte ⑤
- d'un plateau conductif ⑥ (porte spécimen) en général solidaire de la porte



Enceinte VT en préparation

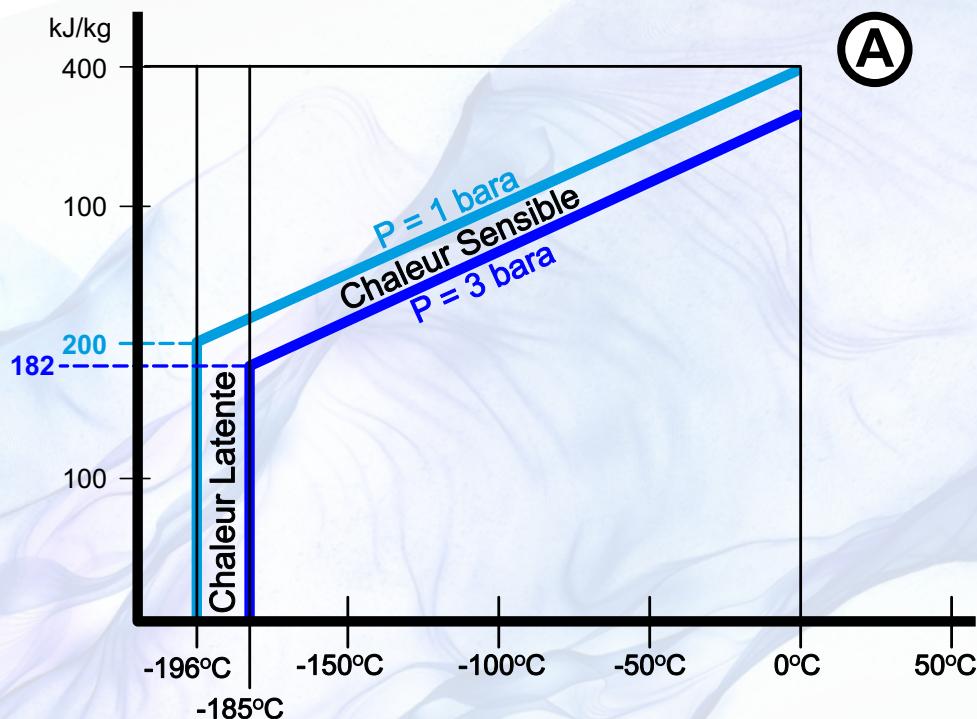


Enceinte VT en mode test

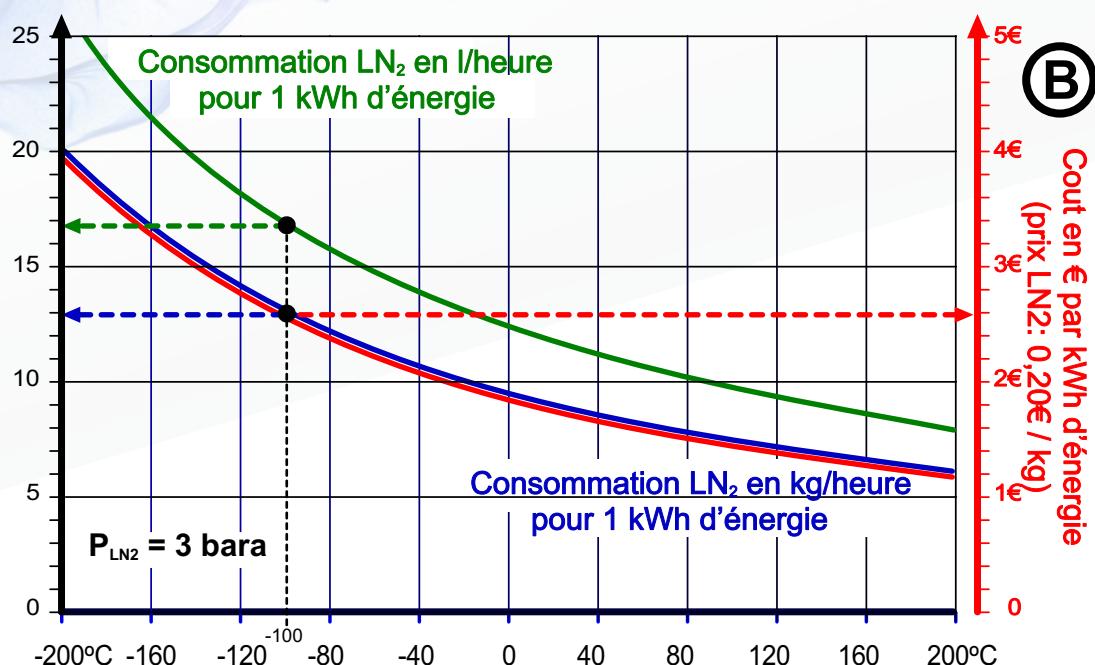
Ecrans et plateaux conductifs peuvent être thermalisés dans la plage de température -196°C à +200°C. La source froide utilisé est l'azote liquide dont les caractéristiques énergétiques sont résumées ci-après.

La détermination rapide du pouvoir frigorifique est donnée dans le diagramme A. Pour une alimentation en azote liquide saturé à 3 bara l'enthalpie (ΔH) disponible (pouvoir frigorifique) est la somme de la chaleur latente d'évaporation et de la chaleur sensible du gaz ($C_{p,\text{GN}2} = 1\text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$). Ainsi le pouvoir frigorifique est de

- $\Delta H = 182 \text{ kJ/kg}$ à -185°C ,
- $\Delta H = 279 \text{ kJ/kg}$ à -100°C et
- $\Delta H = 394 \text{ kJ/kg}$ à $+10^\circ\text{C}$.



Le diagramme B représente la consommation horaire LN₂ (en kg/heure et litres/heure) en fonction de la température de sortie GN₂ de l'élément à thermaliser, pour 1kWh d'énergie à évacuer.



Impact énergétique

Différentes techniques sont utilisées pour la thermalisation des plateaux conductifs et écrans radiatifs par l'azote liquide (LN_2).

Dans ce document les consommations d'azote pour chaque technique de thermalisation sont calculées et comparées. Ce référentiel est établi à partir d'une thermalisation idéale, pour laquelle l'efficacité (η) attribuée sera de 100%.

Cette comparaison est basée sur l'exemple d'une thermalisation d'un plateau conductif ou d'un écran radiatif. Le fonctionnement est stabilisé à -100°C pour un puissance absorbée de 1 kW pendant une heure.

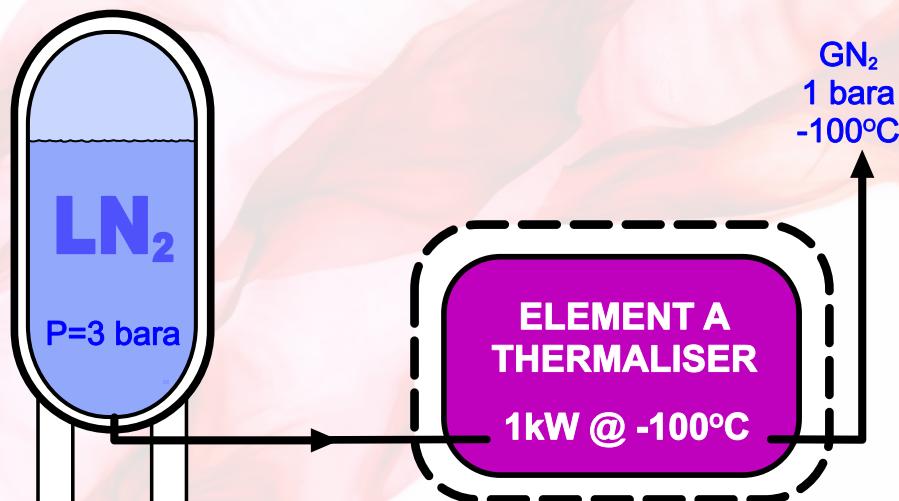
Les techniques utilisées ont souvent été choisies pour leur facilité de mise en œuvre et le coût d'investissement initial. L'aspect énergétique associé à l'exploitation des dispositifs thermiques (pas toujours évident à estimer) a été en général négligé.

A TECHNIQUE DE THERMALISATION OPTIMALE DU POINT DE VUE ENERGETIQUE

C'est celle qui assure une température homogène de -100°C de l'élément à thermaliser et où l'azote liquide et gazeux en circulation dans l'élément absorbe le maximum d'énergie (ΔH) en s'évacuant de l'élément à -100°C ($\Delta H = 279\text{kJ/kg}$).

La consommation horaire d'azote (C_{N_2}), pour une puissance absorbée de 1 kW est alors :

$$C_{\text{N}_2} = 1 \times 3600 / 279 = 13 \text{ kg/heure}$$



A cette thermalisation optimale est attribué un rendement de **100%**

B) THERMALISATION PAR CIRCULATION D'AZOTE GAZEUX

Le schéma ci-dessous montre le mode opératoire : à l'extérieur de l'enceinte vide thermique, le gaz azote froid de thermalisation est généré par mélange d'azote liquide et gazeux. Ce mélange assure le maintien à -100°C de l'élément à thermaliser.

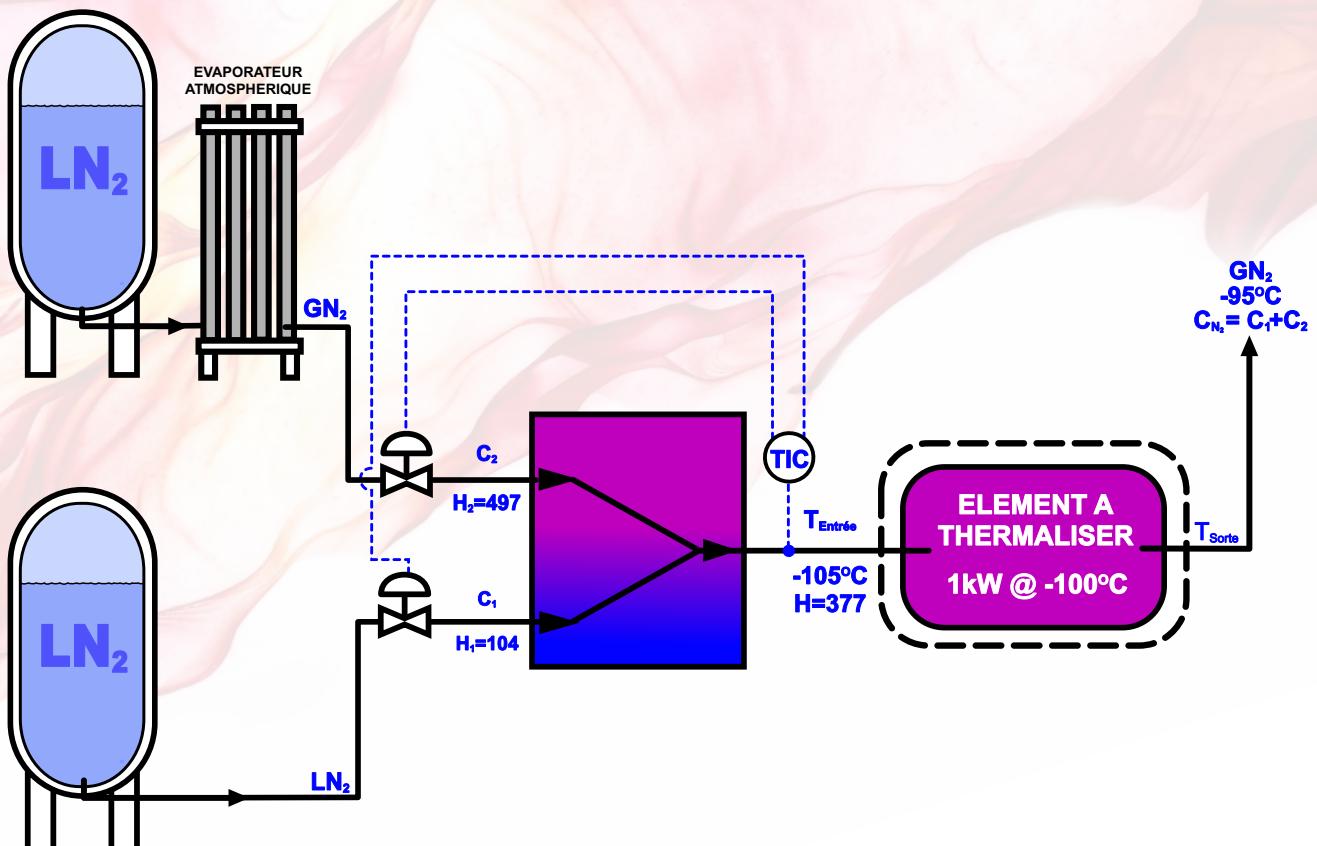
L'énergie frigorifique fournie à l'élément à thermaliser est proportionnelle à la différence de température du vecteur gazeux entre l'entrée et la sortie dudit élément.

L'élément fonctionne en régime de température stabilisé à -100°C, avec pour objectif un gradient maximum de température de 10°C dans l'élément.

Ceci implique un $\Delta T_{\text{Entrée/Sortie}}$ du vecteur azote en circulation inférieur ou égal à 10°C.

Dans ces conditions l'enthalpie fournie par le GN₂ est de 10 kJ/kg et la consommation horaire d'azote (C_{N₂}), pour 1 kW absorbé dans l'élément, devient :

$$C_{N_2} = 1 \times 3600 / 10 = 360 \text{ kg/heure}$$



Par rapport à la machine idéale le rendement énergétique est : $\frac{13}{360} = 3,6\%$

Nota:

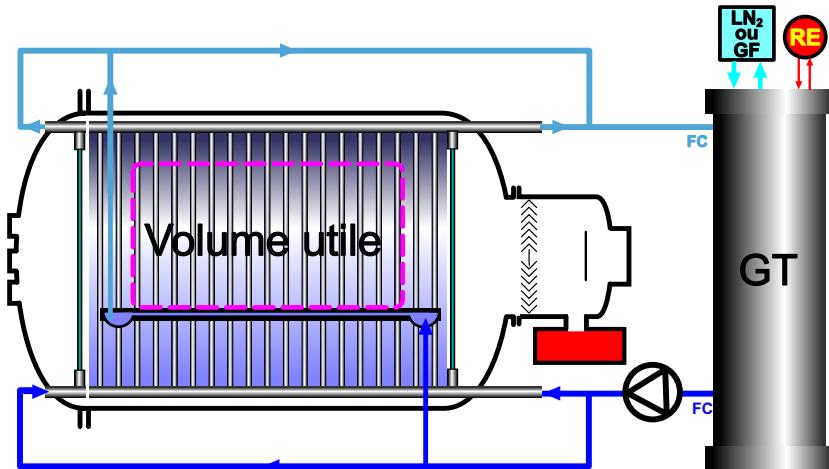
Le débit C_{N₂} de thermalisation est la somme du débit L_{N₂}C₁ et du débit L_{N₂}C₂

$$C_1 \times (H - H_1) = C_2 \times (H_2 - H)$$

$$\text{Soit } C_1 = 110 \text{ kg/h et } C_2 = 250 \text{ kg/h.}$$

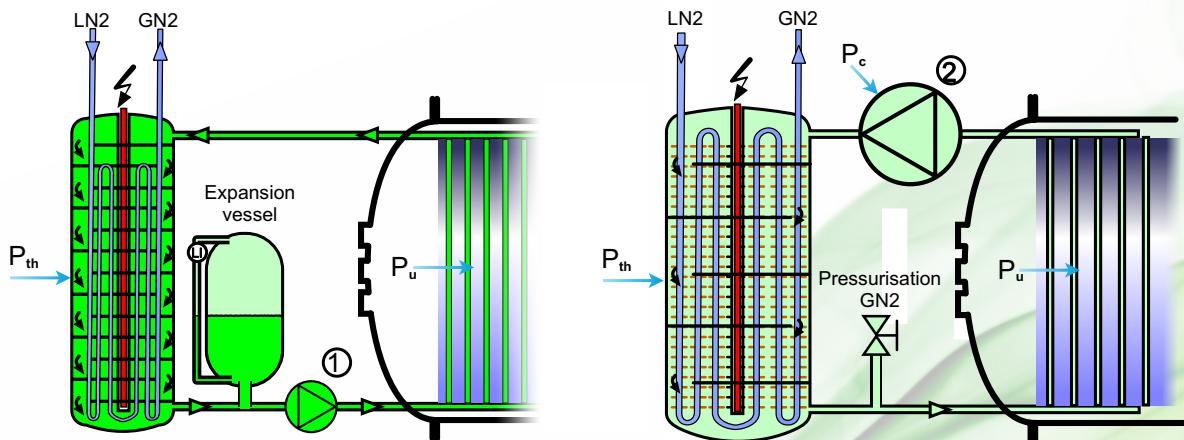
© THERMALISATION PAR FLUIDE CALOPORTEUR LIQUIDE OU GAZEUX

Le plateau conductif et les écrans sont raccordés à un ou plusieurs Groupes Thermiques(GT)



L'échange thermique entre ces éléments est assuré par circulation d'un fluide caloporporeur

- Fluide caloporporeur liquide (ex : huile silicone) mis en circulation par une pompe ①
- Fluide caloporporeur gazeux (GN₂ ou GHe sous pression) mis en circulation par un ventilateur ②



En fonctionnement à -100°C la puissance frigorifique P_t à fournir est la somme de:

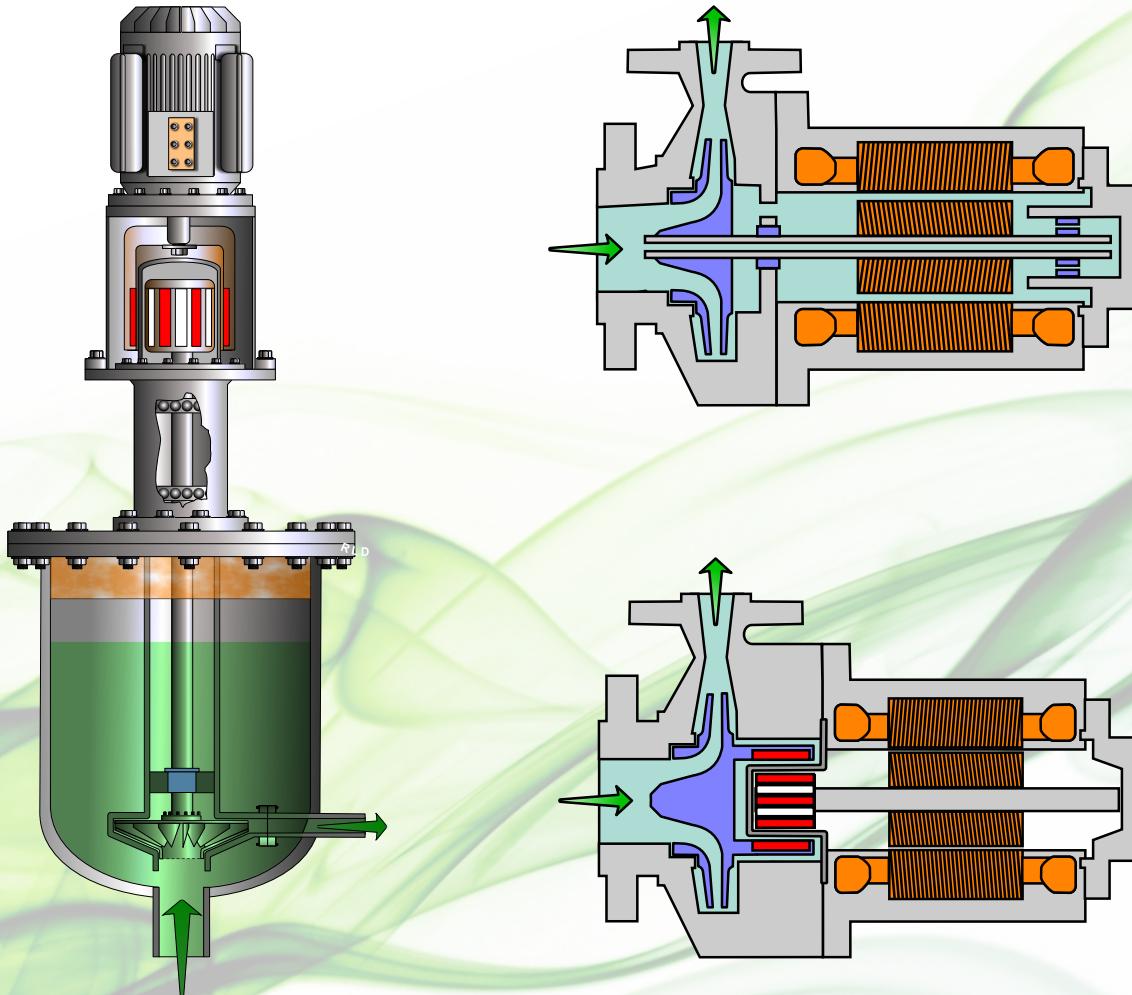
- La puissance P_u (puissance utile, par exemple 1 kW) absorbée par les écrans et/ou le plateau conductif en régime stabilisé à -100 °C
- La puissance P_{th} correspondant aux pertes thermiques au travers de l'isolation thermique du GT, du circulateur et des tuyauteries de transfert du fluide caloporporeur
- De la puissance P_c absorbée par la pompe ou le ventilateur
- En résumé, pour une puissance utile P_u absorbée dans l'enceinte VT la puissance frigorifique totale à fournir est : P_t=P_u+P_{th}+P_c et le rendement thermique est : $\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{th} + P_c}$

Une puissance de 1 kW, dissipée en régime permanent à -100°C, est caractéristique d'une enceinte VT de volume utile de l'ordre de 1 m³ pour laquelle on peut estimer :

- P_{th} = 300 Watts
- P_c = 200 Watts correspondant à la puissance hydraulique nécessaire à la circulation du fluide caloporporeur
- dans ces conditions $\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{th} + P_c} = \frac{1}{1 + 0.3 + 0.2} = 66\%$

Ce rendement dépend beaucoup du circulateur utilisé et se dégrade fortement s'il n'y a pas de barrière thermique entre la partie hydraulique et le moteur d'entrainement.

Exemple ci-dessous.



Pompe optimisée pour fonctionnement LN₂

Découplage thermique

Faibles entrées de chaleur sur fluide caloporteur

Pompes du commerce non optimisées.

Pas de découplage thermique

Fortes entrées de chaleur sur le fluide caloporteur

On a alors P_c = 2 kW, voire davantage, et le rendement d'utilisation de l'azote liquide chute à

$$\eta = \frac{1}{1 + 0.3 + 2} = \mathbf{31\%}$$

Résumé:	(A)	(B)	(C)
Consommation LN ₂ kg/h	Machine idéale	Générateur GN ₂ mélange LN ₂ /GN ₂	GN ₂ en circuit fermé avec circulateur du commerce
Coût LN ₂ €/h (€ 0,20/kg LN ₂)	13 kg/h	360 kg/h	42,9 kg/h
Rendement énergétique	2,6 €/h	72,00 €/h	8,58 €/h
	100%	3,6%	31%
			19,5 kg/h
			3,90 €/h
			66%

Il devient primordial d'évaluer un système sur ses dépenses d'exploitation durant sa durée de vie économique.
L'approche énergétique en réfrigération LN₂ réduit ces dépenses de façon significative.

Questions?



PUBLICATIONS RLD S.a.r.l.

4 rue Augereau - 38 000 GRENOBLE - France
téléphone: +33 4 76 46 33 16 - portable: +31 6 73 74 38 79
contact@thermique-ingenierie.fr
www.thermique-ingenierie.fr