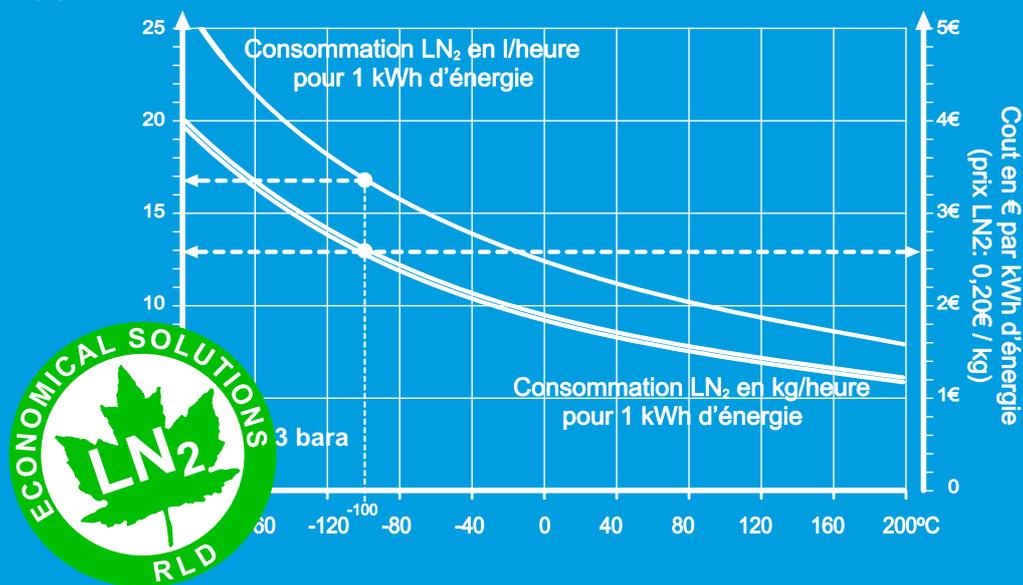


IMPACT ENERGETIQUE

cryogénie en simulation spatiale



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

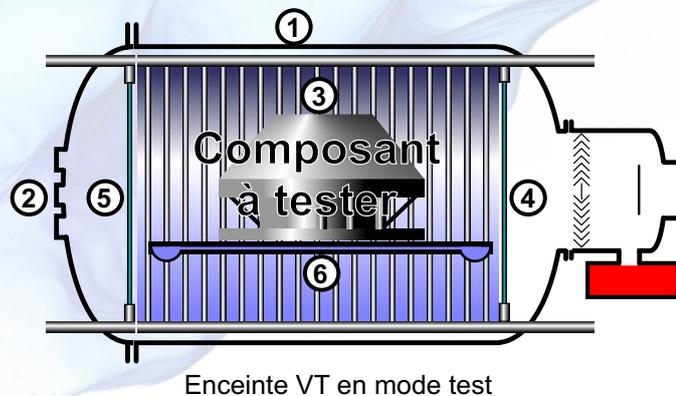
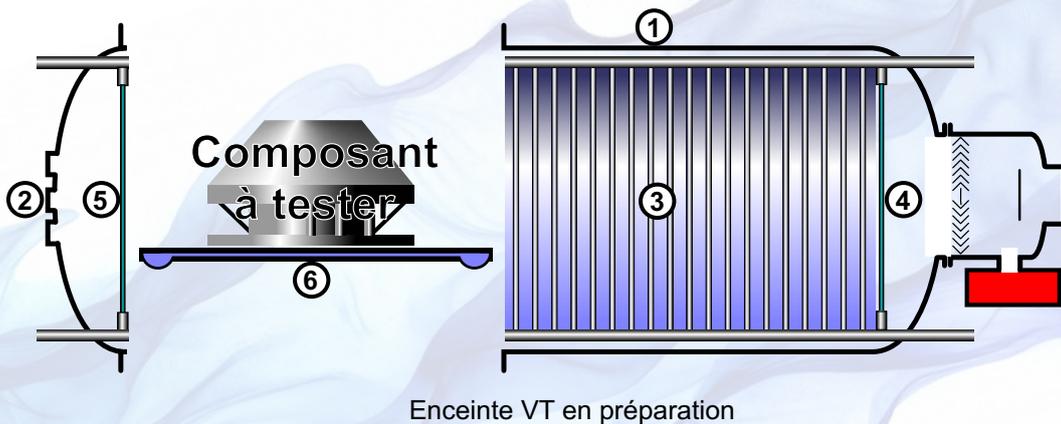
Afin d'assurer leur fonctionnement sans failles pendant toute la durée de vie du satellite, il y a nécessité de tester chaque composants avant le lancement.

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 $-180^{\circ}\text{C}/+200^{\circ}\text{C}$, 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 :

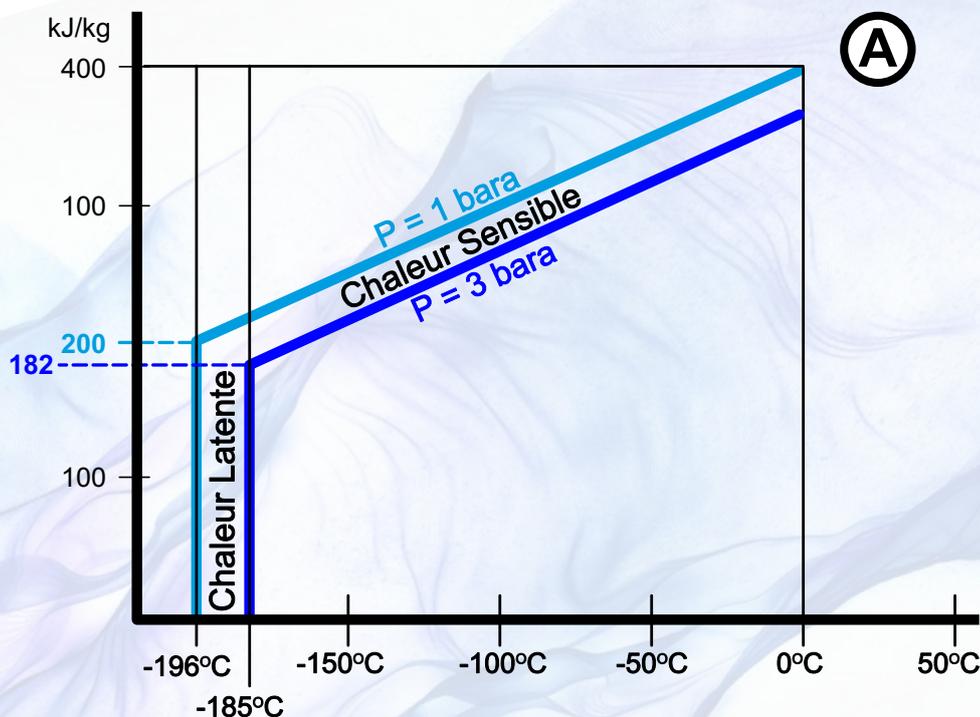
- d'écrans radiatifs
 - Ecran cylindrique ③
 - Ecran fond ④
 - Ecran porte ⑤
- d'un plateau conducteur ⑥ (porte spécimen) en général solidaire de la porte



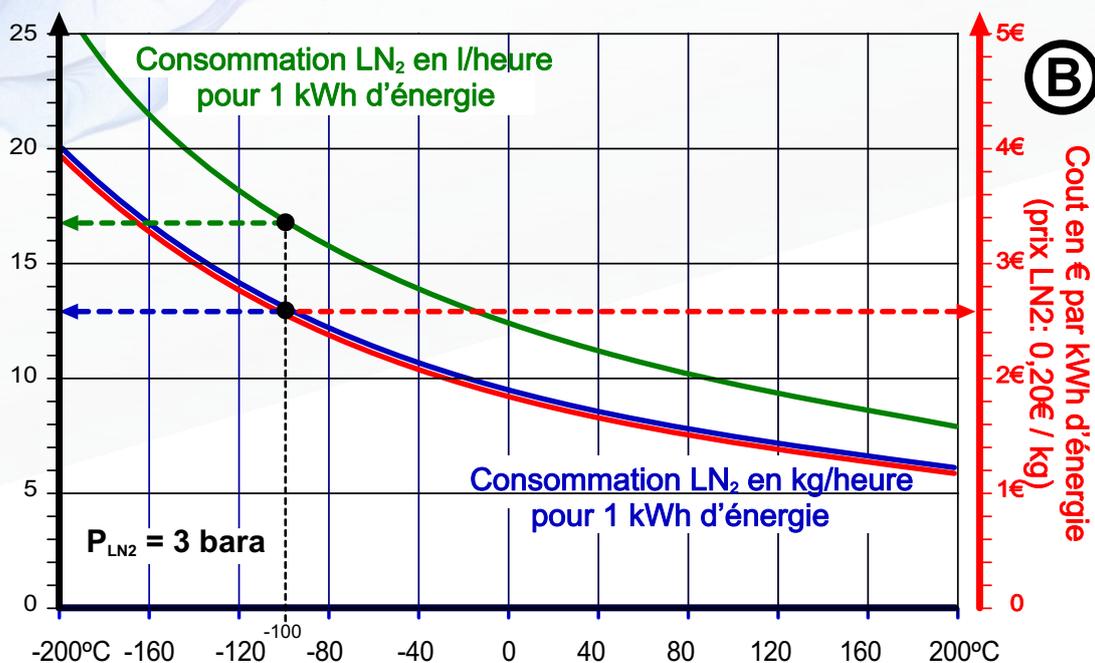
Ecrans et plateaux conductifs peuvent être thermalisés dans la plage de température -196°C à $+200^{\circ}\text{C}$. La source froide utilisé est l'azote liquide dont les caractéristiques énergétiques sont résumées ci-après.

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 ($C_{p_{GN_2}} = 1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$). 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 1 kWh d'énergie à évacuer.



Impact énergétique

Différentes techniques sont utilisées pour la thermalisation des plateaux conductifs et écrans radiatifs par l'azote liquide (LN₂).

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 une puissance absorbée de 1 kW pendant une heure.

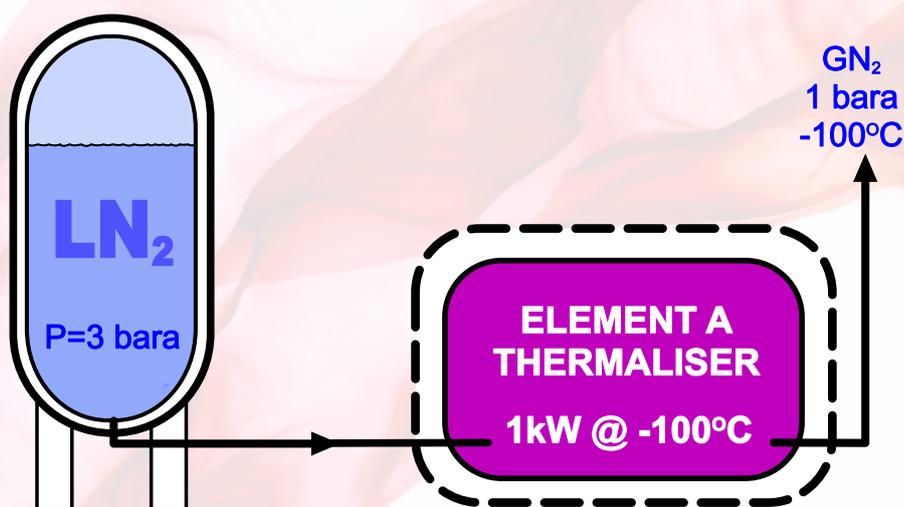
Les techniques utilisées ont souvent été choisies pour leur facilité de mise en œuvre et le coût d'investissement initial. L'aspect énergétique associé à l'exploitation des dispositifs thermiques (pas toujours évident à estimer) a été en général négligé.

Ⓐ 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 :

$$C_{N_2} = 1 \times 3600 / 279 = 13 \text{ kg/heure}$$



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.

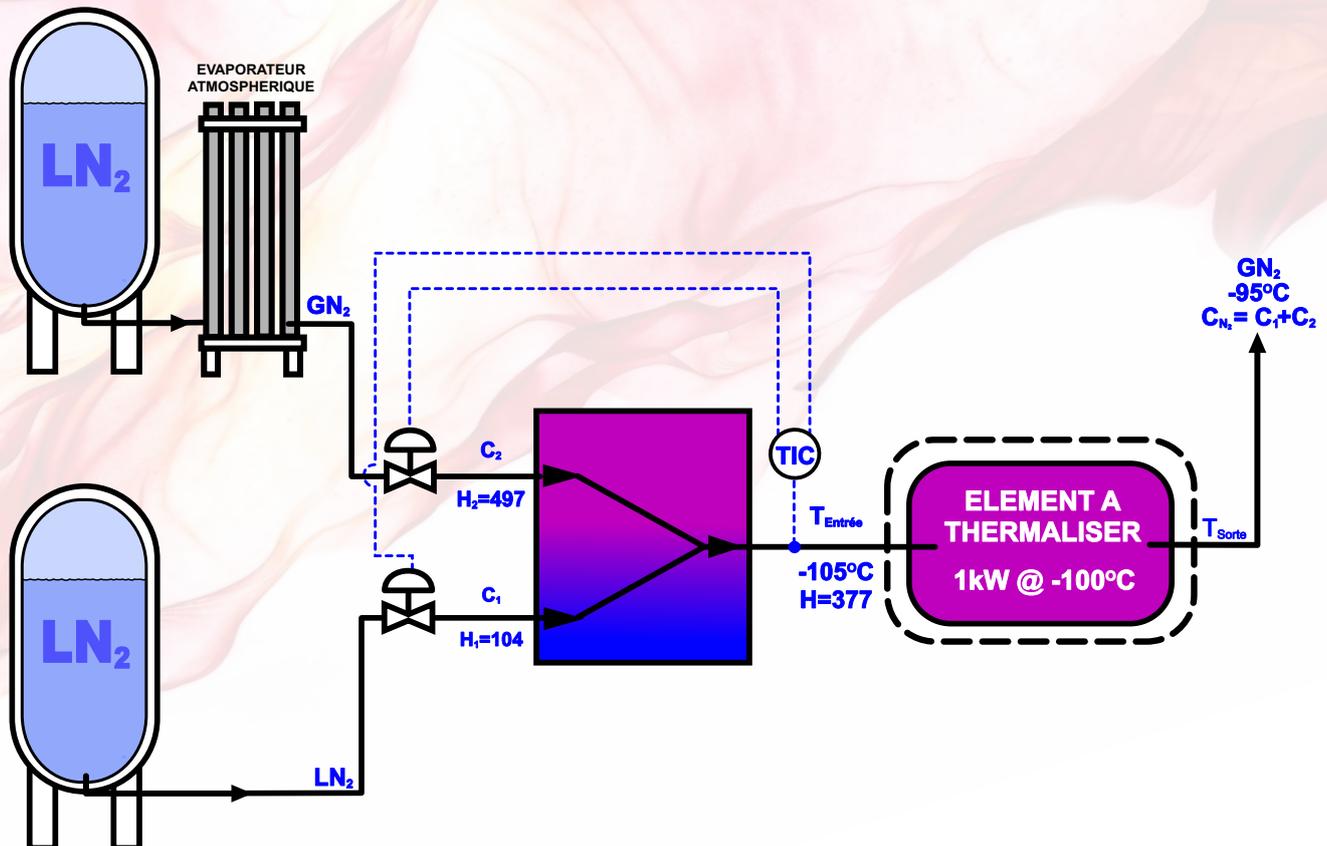
L'énergie frigorifique fournie à l'élément à thermaliser est proportionnelle à la différence de température du vecteur gazeux entre l'entrée et la sortie dudit élément.

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 GN_2 est de 10 kJ/kg et la consommation horaire d'azote (C_{N_2}), pour 1 kW absorbé dans l'élément, devient :

$$C_{\text{N}_2} = 1 \times 3600/10 = 360\text{kg/heure}$$



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

Nota:

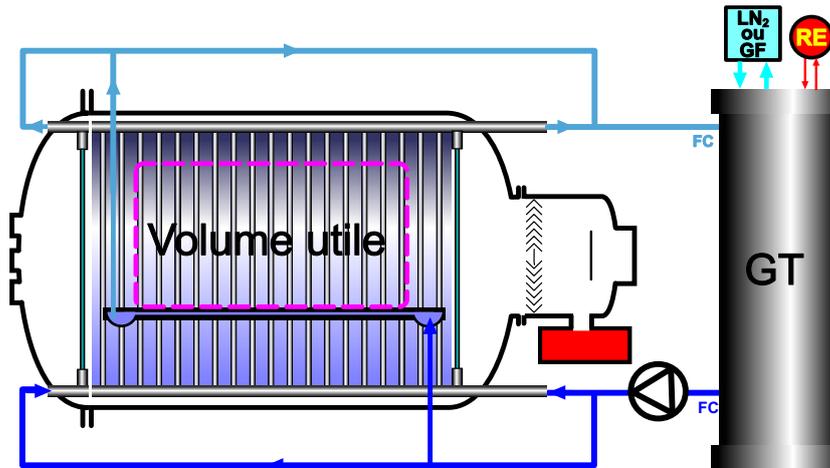
Le débit C_{N_2} de thermalisation est la somme du débit $\text{LN}_2 C_1$ et du débit $\text{LN}_2 C_2$

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

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

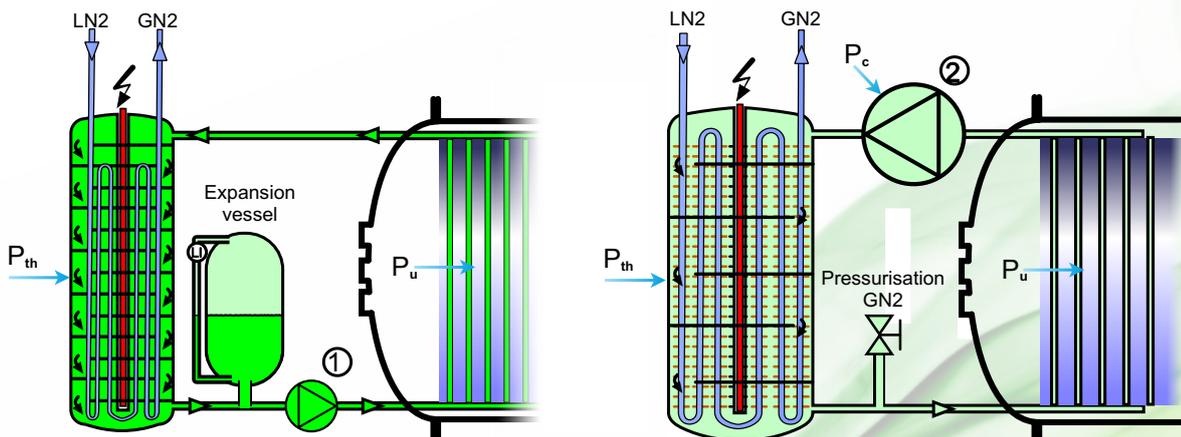
© THERMALISATION PAR FLUIDE CALOPORTEUR LIQUIDE OU GAZEUX

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 caloporteur

- Fluide caloporteur liquide (ex : huile silicone) mis en circulation par une pompe ①
- Fluide caloporteur 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 caloporteur
- 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

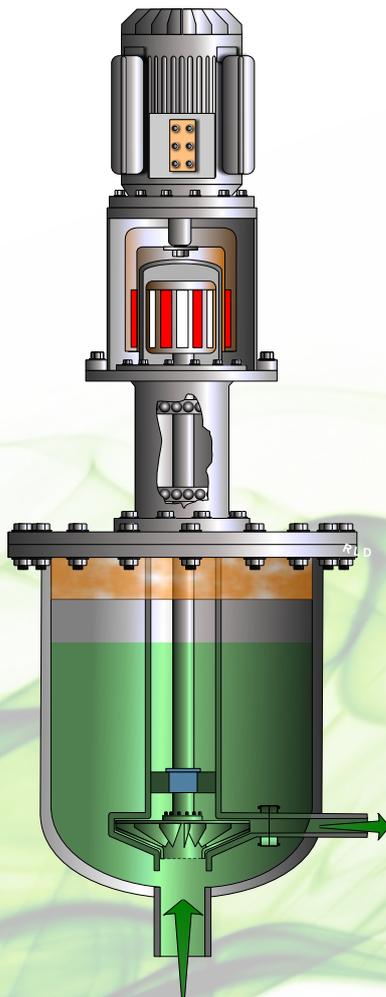
$$\text{est : } P_t = P_u + P_{th} + P_c \text{ et le rendement thermique est : } \eta = \frac{P_u}{P_u + P_{th} + P_c}$$

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 :

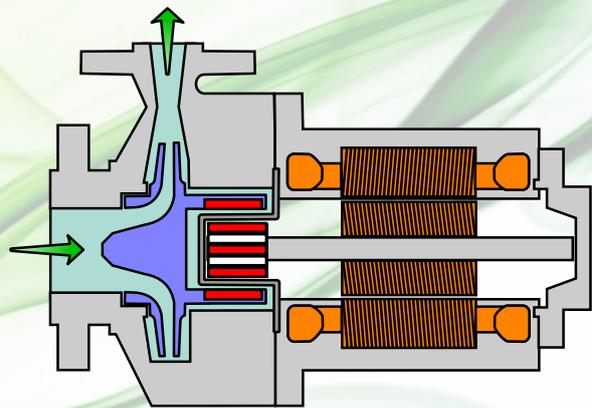
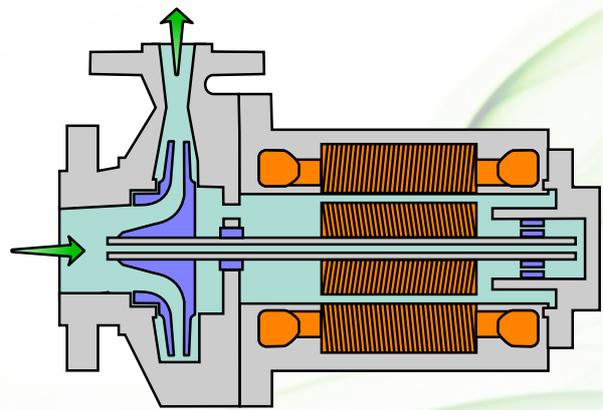
- P_{th} = 300 Watts
- P_c = 200 Watts correspondant à la puissance hydraulique nécessaire à la circulation du fluide caloporteur
- dans ces conditions $\eta = \frac{P_u}{P_u + P_{th} + P_c} = \frac{1}{1 + 0.3 + 0.2} = 66\%$

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'entraînement.

Exemple ci-dessous.



Pompe optimisée pour fonctionnement LN₂
 Découplage thermique
 Faibles entrées de chaleur sur fluide caloporteur



Pompes du commerce non optimisée.
 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

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

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