

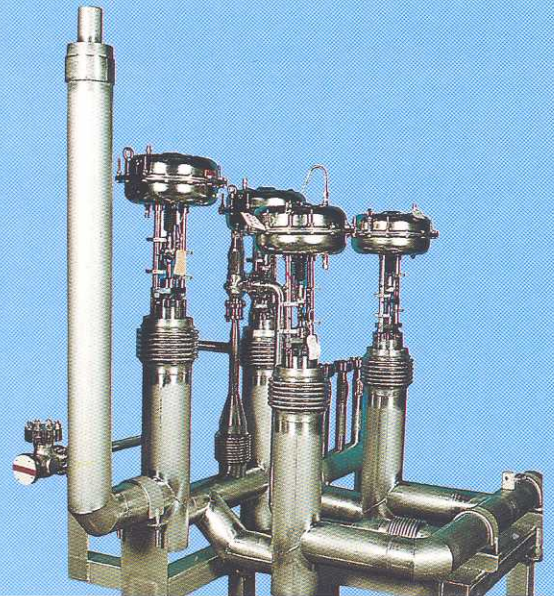
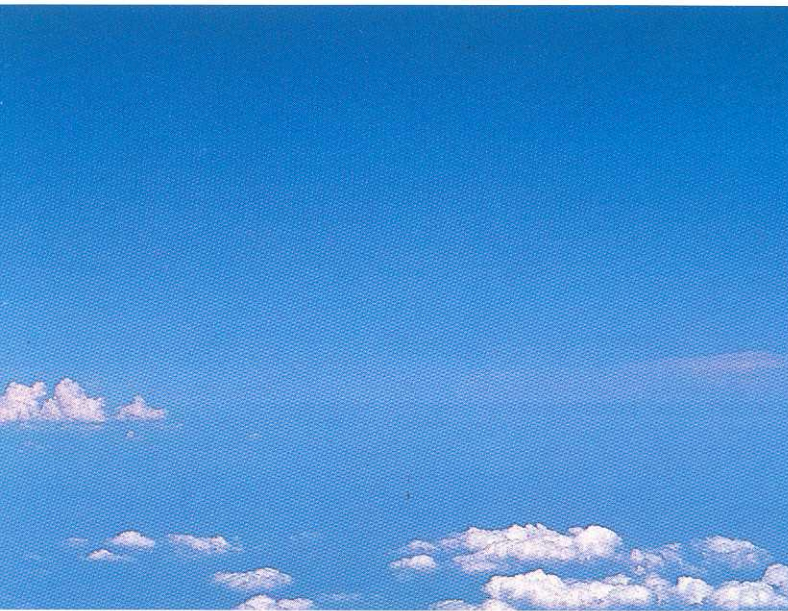
*La cryogénie
industrielle*



PROGRAMME CRYOGENIE

Daniel GOUMY

FEVRIER 1996



Les lignes de transfert pour fluides cryogéniques

Afin d'optimiser les transferts à distance des gaz liquéfiés à très basse température, AIR LIQUIDE a développé des tuyauteries sous vide : "Les lignes superisolées sous vide à isolation multicouche".

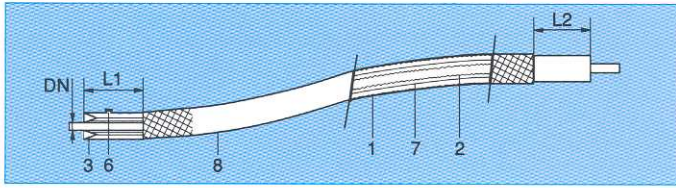
Ces lignes, réalisées en acier inoxydable, sont conçues spécialement pour les applications dans tout type d'industrie : sidérurgie, chimie, alimentaire, médical, électronique, aéronautique, spatial, etc.



AIR LIQUIDE

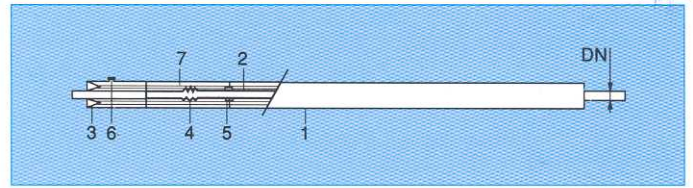
™

LIGNE SUPERISOLEE SOUPLE



1. Enveloppe extérieure.
2. Tube intérieur
3. Liaison d'extrémité
4. Compensateur

LIGNE SUPERISOLEE RIGIDE



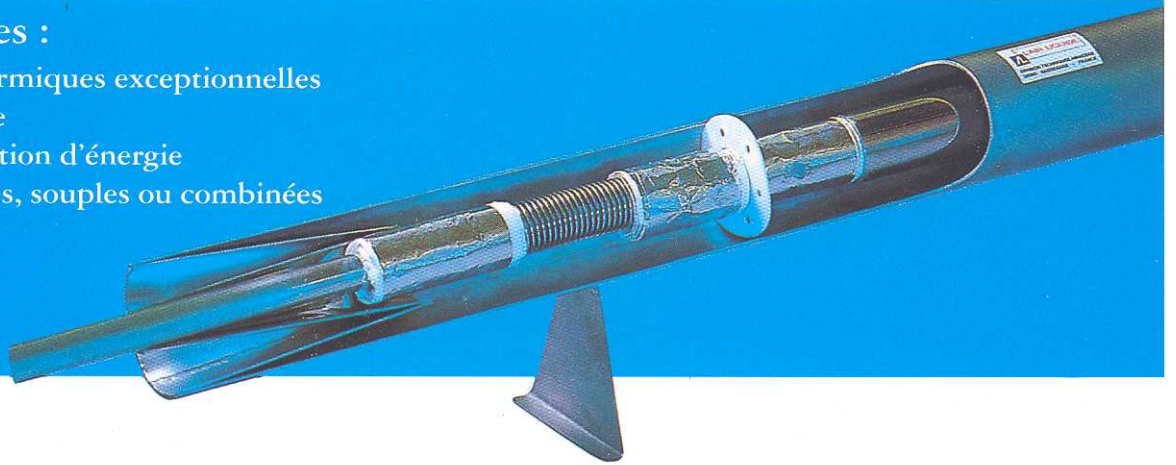
5. Centreur
6. Clapet de mise en vide et de sécurité
7. Superisolant
8. Gaine

(PU 1000 - 1500 F/m)

2200 F/m
à la fin
possibilité
3000 - 5000

Caractéristiques :

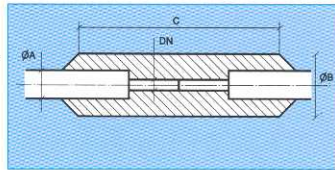
- Performances thermiques exceptionnelles
- Maintenance nulle
- Pas de consommation d'énergie
- Tuyauteries rigides, souples ou combinées



JONCTIONS

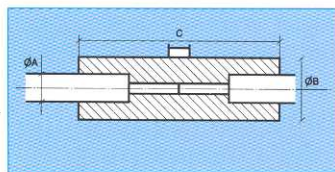
manchon isolation PU

DN	10	20	25	32	50
ø A	60,3	76,1	88,9	88,9	114,3
ø B	133	152	165	165	200
C	440	500	560	560	660
Pertes thermiques W	7	9	11	12,5	15



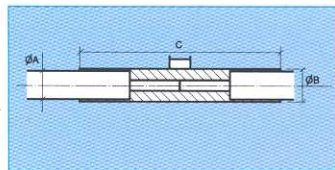
manchon isolation perlite

DN	10	20	32	50	80	100
ø A	60,3	76,1	88,9	114,3	139,7	168
ø B	168	168	219	219	273	273
C	400	400	400	400	470	470



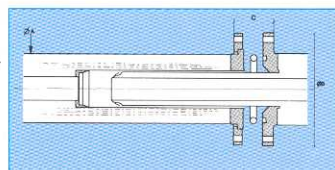
manchon sous vide

DN	10	20	32	50	80	100
ø A	60,3	76,1	88,9	114,3	139,7	168
ø B	76,1	88,9	104	129	154	184
C	400	400	400	400	470	470



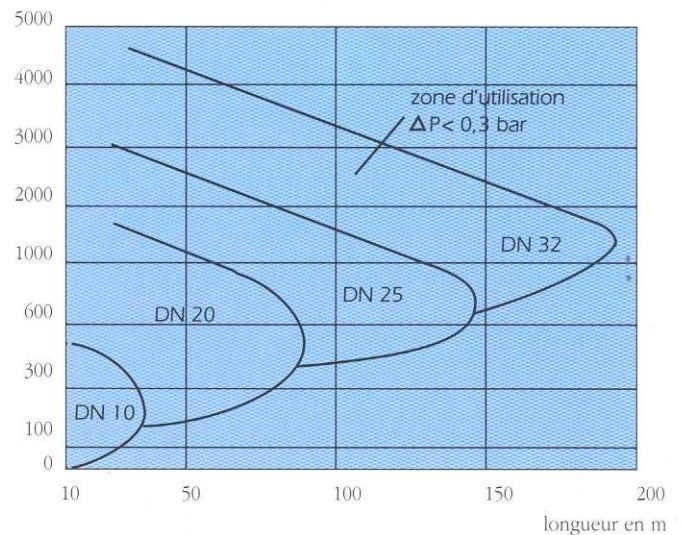
type baïonnette

DN	10	20	25	32	50	80	100
ø A	60,3	76,1	88,9	88,9	114,3	139,7	168
ø B	90	120	122	122	140	165	195
C	20	21,5	23,5	23,5	24	24	24
Pertes thermiques W	1,4	1,9	2,1	4,3	4,7	5,1	5,3



COURBES POUR DETERMINATION RAPIDE DU DN

litres LN2/heure



Etude Définition

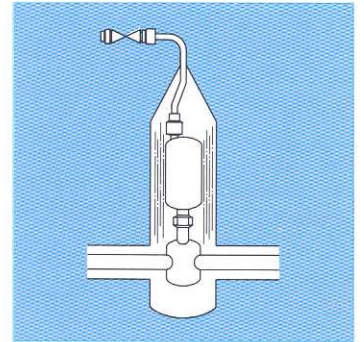
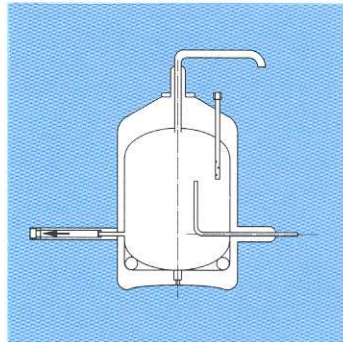
Elle est menée par nos services en faisant une analyse approfondie des besoins du client et des conditions locales d'exploitation. Le tracé et le type de ligne retenus correspondent à la solution la plus économique tout en garantissant les qualités thermiques de l'installation.

Installation

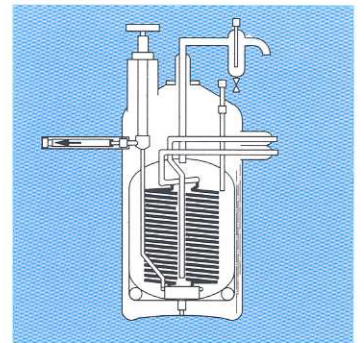
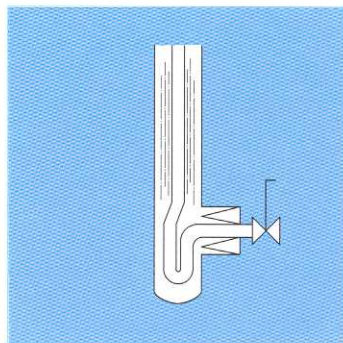
Les tronçons, préfabriqués en usine, sont raccordés sur le site par soudage ou par brides. 4 types de jonctions sont couramment utilisées : isolation PU, isolation perlite ou foamglass, sous-vide, à baïonnette.

ACCESSOIRES

Purgeur sous vide :
évacue le gaz formé dans la ligne de distribution
débit maxi : 150 l/mn



Séparateur de phase :
assure la distribution de liquide franc à l'utilisation
capacité moyenne : 70 litres



Sous-refroidisseur :
fournit un liquide sous-refroidi capable de compenser des entrées de chaleur
puissance moyenne : 1 KW

Distribution point bas :
évite les entrées de chaleur par la vanne

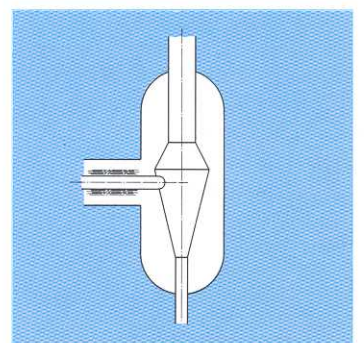
Séparateur BIFASAL :
l'azote liquide par gravité au robinet

Robinetts cryogéniques :
isolation PU ou sous-vide, manuels ou motorisés

Electrovannes cryogéniques

Soupapes

Régulation de niveau





La Division Matériel Cryogénique à Marne-la-Vallée (France).

CARACTERISTIQUES GENERALES

Pression nominale de service : 6 bar (pressions supérieures sur demande)

Lignes souples

DN	10	20	32	50
ø intérieur mm	14	23,7	39,2	57,1
ø extérieur mm				
• embouts rigides	60,3	76,1	88,9	114,3
• flexibles	66	83,5	98,5	154,5
Performances (W/m)	0,6	0,85	1,2	1,6
Poids (kg/m) flexibles isolants	1,2	3,7	4,8	9,2
Rayon de courbure minimal (mm)	435	550	650	1 250
Longueur minimale commercialisée (m)	2,5	2,5	2,5	3,5
Longueur maximale commercialisée (m)	20	20	20	20

Lignes rigides

DN	10	20	32	50	80	100
ø intérieur mm	14	23,7	39,2	57,1	85,7	110,3
ø extérieur mm	60,3	76,1	88,9	114,3	139,7	168
Performances (W/m)	0,38	0,53	0,73	1	1,4	1,75
Poids kg/m	2,9	4,2	5,5	8,5	11,5	15

Les performances indiquées correspondent :
 - à une température froide comprise entre 77 et 90° K
 - à une température chaude de 293° K (20° C)



AIR LIQUIDE

CRYOGENIE

DIVISION MATÉRIEL CRYOGENIQUE

Parc Gustave-Eiffel - 8, avenue Gutenberg, BUSSY-SAINT-GEORGES

77607 MARNE-LA-VALLÉE, CEDEX 3 - FRANCE

Téléphone : (1) 64 76 15 00 - Fax : (1) 64 76 16 99 - Télex : ALDMC 694 102 F

R.C.S. : B 552 096 281



AIR LIQUIDE



l'azote

AIR LIQUIDE



UNITES

Principales grandeurs et unités

Le système légal est le système international d'unités : S.I.

Ses unités de base sont :

GRANDEUR	UNITE	SYMBOLE
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
intensité de courant électrique	ampère	A
température thermodynamique	kelvin	K
quantité de matière	mole	mol
intensité lumineuse	candela	cd

1) UNITES MECANIQUES LEGALES

Les grandeurs : énergie
travail
quantité de chaleur

ont la même unité :

le joule, symbole J

soit en unités de base $m^2.kg.s^{-2}$

En pratique, on utilise souvent le multiple :

kilojoule, symbole kJ, soit $10^3 J$

Le joule correspond au travail produit par une force de 1 newton dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.

Les grandeurs : puissance
flux énergétique ("débit d'énergie")

ont la même unité :

le watt, symbole W

soit en unités de base $m^2.kg.s^{-3}$

De même, cette unité étant souvent petite, on utilise le multiple :

kilowatt, symbole kW, soit $10^3 W$

RAPPELS SUR LES UNITES EMPLOYEES DANS L'INDUSTRIE DU FROID

Unités d'énergie et de puissance.

Les unités d'énergie mécanique et d'énergie calorifique ou frigorifique (calorifique négative) s'expriment dans les mêmes unités.

UNITES MECANIQUES

- Unités d'énergie mécanique : le joule = j
le kilojoule = 1 000 j = Kj
- Unités de puissance mécanique : le watt = W 1 w = 1 joule / seconde
le kilo-watt = 1 000 w = Kw

Le Kw est une unité d'énergie qui correspond à l'énergie fournie par un appareil de puissance de 1 Kw pendant un fonctionnement de 1 heure.

$$1 \text{ Kwh} = \frac{1\text{Kj}}{\text{sec}} \times 3\,600 \text{ sec} = 3\,600 \text{ Kj}$$

UNITES CALORIFIQUES OU FRIGORIFIQUES

- Unités d'énergie calorifique : la calorie = cal (énergie pour élever 1 g d'eau de 1°C)
la kilocalorie = 1 000 calories
la kilocalorie négative = la frigorie
- Equivalence : 1 calorie = 4,18 joules
1 joule = $\frac{1 \text{ calorie}}{4,18}$
1 kilojoule = $\frac{1 \text{ kilocalorie}}{4,18}$
- Unités de puissance calorifique : cal / sec Kcal / sec Kcal / heure Kj / h
le watt = $\frac{1 \text{ joule}}{\text{sec}} = \frac{1 \text{ cal}}{4,18} = 3,6 \text{ Kj / h}$
le Kw = $\frac{1 \text{ Kj}}{\text{sec}} = \frac{1 \text{ Kcal}}{4,18 \text{ sec}}$
- Equivalence : 1 Kcal / h = 1,16 w
1 000 Kcal / h = 1,16 Kw = 1 thermie
1 Kw = 860 Kcal / h
1 Kj / h = 0,278 w

La chaleur massique d'un corps est la quantité de chaleur qu'il faut fournir ou enlever à l'unité de masse de ce corps pour élever ou abaisser sa température de 1 °.

La chaleur sensible, c'est la quantité de chaleur qui provoque la variation de température d'un corps sans modifier son état physique.

La chaleur latente, (de fusion de solidification ou de vaporisation) c'est la quantité de chaleur qui provoque le changement d'état d'un corps sans modifier sa température.

Les relations entre énergie et puissance sont :

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ watt} \times 1 \text{ seconde},$$

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule} / 1 \text{ seconde}$$

2) AUTRES UNITES

température

Dans le S.I., l'unité est le kelvin, noté K.

La température Celsius t est liée à la température thermodynamique T par la relation :

$$t = T - 273,15.$$

Un intervalle de température peut être exprimé soit en kelvins, soit en degrés Celsius. Dans ce cas, $1^\circ\text{C} = 1 \text{ K}$.

remarque : conversion des degrés Celsius et Fahrenheit

$$T^\circ\text{C} = \frac{5}{9}(T^\circ\text{F} - 32)$$

$$T^\circ\text{F} = \frac{9}{5}T^\circ\text{C} + 32$$

énergie électrique (unités tolérées)

L'énergie électrique fournie ou absorbée en 1 heure par un appareil ayant une puissance de 1 kW est :

$$\frac{1\,000 \text{ joules}}{1 \text{ seconde}} \times 3\,600 \text{ secondes} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6$$

soit : $3,6 = 10^6 \text{ J}$ ou $3\,600 \text{ kJ}$ ou encore 1 kW.h

Le kW.h est la quantité d'énergie transférée, en une heure par un flux énergétique de 1 kilowatt.

$$1 \text{ kW.h} = 3\,600 \text{ kJ} = 860 \text{ kcal}$$

énergie calorifique (unités anciennes)

La quantité d'énergie fournie à 1 g d'eau pour élever sa température de 1°C entre $14,5$ et $15,5^\circ\text{C}$ est de 1 calorie, symbole cal, avec 1 kilocalorie = 10^3 calories.

On a :

$$1 \text{ calorie} = 4,18 \text{ joules}$$

$$1 \text{ joule} = 0,24 \text{ calorie}$$

$$1 \text{ joule} = \frac{1 \text{ calorie}}{4,18 \text{ joules}}$$

énergie "frigorigique" (unités anciennes)

On emploie souvent le terme de frigorie : énergie enlevée à 1 kilogramme d'eau pour la refroidir de 1°C. La frigorie est une kilocalorie négative.

$$1 \text{ frigorie} = 1 \text{ fg} = 1\,000 \text{ calories} = 1 \text{ kilocalorie}$$

Ces unités (calorie, frigorie et multiples) ne sont plus légales depuis le 31/12/1977.

puissance calorifique

C'est une quantité d'énergie transférée dans une unité de temps. Plus la quantité d'énergie est grande et plus le temps est court, plus la puissance est grande.

On a :

$$\frac{1 \text{ kcal}}{1 \text{ heure}} = 1,16 \text{ W}$$

$$1 \text{ watt} = 0,86 \text{ fg/h} = 0,86 \text{ kcal/h}$$

puissance frigorigique

La puissance frigorigique (souvent notée Q_0) d'un compresseur ou d'un groupe frigorigique est la quantité de chaleur absorbée par une machine fonctionnant dans des conditions déterminées.

Cette puissance, que l'on exprimait auparavant en kilocalories par heure (kcal/h) ou en frigories par heure (fg/h), s'exprime maintenant en :

kilojoules par heure (kJ/h),
ou en kilowatts (kW)

Les constructeurs donnent le plus souvent la puissance frigorigique de leurs appareils en watts ou en kilowatts.

bilan frigorigique ou bilan thermique

C'est la quantité de chaleur que l'on doit enlever en 24 heures dans une enceinte réfrigérée pour la maintenir à une température constante. C'est la somme de toutes les quantités de chaleur pénétrant dans une chambre froide sur une journée :

apports de chaleur par les parois,
apports de chaleur par les denrées,
apports de chaleur par le service, etc.

Exemple de calcul :

Si le bilan thermique d'une installation est de 576 000 kJ par 24 heures et que le compresseur doit tourner 16 heures par jour, sa puissance frigorigique sera de :

$$\frac{576\,000}{16} = 36\,000 \text{ kJ/h}$$

Sachant que $1 \text{ kJ/h} = 0,278 \text{ W}$, nous aurons donc un groupe de :

$$\begin{aligned} 36\,000 \times 0,278 &= 10\,000 \text{ W} \\ &= 10 \text{ kW} \end{aligned}$$

pression

unité du S.I. :

le pascal, abréviation **Pa**, soit $\text{m}^{-1}.\text{kg}.\text{s}^{-1}$ en unités de base.

1 Pa	= 1 newton/m ²	# 0,1 mm de colonne d'eau en ventilation
1 bar	= 10 ⁵ pascal	
1 p.s.i.	= 0,069 bar	(p.s.i.= pound per square inch)
1 barye	= 1 dyne/cm ²	= 0,1 Pa = 10 ⁻⁶ bar
1 kgp/cm ²	= 10 ⁴ mm d'eau	= 735,5 torr
1 torr	= 1 mm Hg	= 133,3 Pa
1 mm H ² O	= 0,980 mb	

remarque :

pression atmosphérique usuelle :

1,013 bar	= 1 atmosphère normale	= 760 mm H	= 760 torr
1 m H ² O	= 9806,65 Pa	= 98,0665 mbar	(unité non légale)

3) QUANTITES DE CHALEUR

chaleur sensible :

C'est la quantité de chaleur en kilojoules (kJ) qui provoque la variation de température d'un corps sans modifier son état physique.

chaleur latente :

C'est la quantité de chaleur en kilojoules (kJ) qui provoque le changement d'état d'un corps sans modifier sa température.

On distingue :

Chaleur latente de fusion :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg d'un corps pour le faire passer de l'état solide à l'état liquide sans élever sa température.

Exemple : il faut fournir 335,2 kJ (= 80 kcal) à 1 kg de glace à 0°C pour la transformer en eau à 0°C. La chaleur latente de fusion de la glace est donc de 335,2 kJ/kg.

Chaleur latente de solidification :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut retirer à 1 kg de liquide pour le ramener à l'état solide sans changement de température. La solidification étant le phénomène inverse de la fusion, les quantités de chaleur sont identiques.

Exemple : pour solidifier 1 kg d'eau à 0°C, il faut lui soustraire 335,2 kJ.

Chaleur latente de vaporisation :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à 1 kg d'un corps pour le faire passer de l'état liquide à l'état gazeux, sans élever sa température.

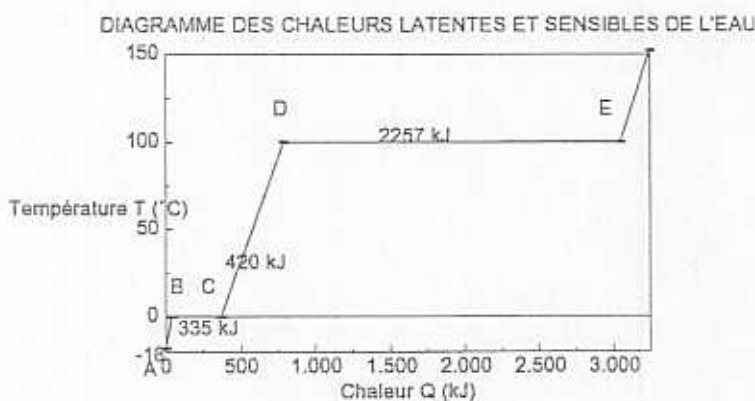
Exemple : la chaleur latente de vaporisation en kilojoules par kilogramme (kJ/kg) à température normale d'ébullition à la pression atmosphérique est de :

1 366,7 kJ/kg pour l'ammoniac (NH₃) ou réfrigérant 717 (à -33,3°C);

2 257 kJ/kg pour l'eau à 100°C et à la pression atmosphérique de 1 013 mbars.

Chaleur latente de liquéfaction :

C'est la quantité de chaleur qu'il faut retirer à 1 kg de vapeur pour la ramener à l'état liquide sans changement de température. Elle s'appelle aussi chaleur latente de condensation. Etant le phénomène inverse de la vaporisation, les quantités de chaleur correspondantes sont identiques.



de A à B :
châuffe de la glace
chaleur sensible

de B à C :
fusion de la glace
chaleur latente

de C à D :
châuffe de l'eau
chaleur sensible

de D à E :
vaporisation de l'eau
chaleur latente

à partir de E :
vapeur surchauffée

chaleur massique :

La chaleur massique d'un corps est la quantité de chaleur Q qu'il faut fournir ou enlever à l'unité de masse de ce corps pour élever ou abaisser sa température de 1 K.

On a donc la formule :

$$Q = m \cdot c \cdot dt \quad \text{avec}$$

Q = quantité de chaleur nécessaire (kJ)
 m = masse à réchauffer ou à refroidir (kg)
 c = chaleur massique (kJ/kg.K)
 dt = différence de température en kelvins (K)

remarque : si c est exprimée en kcal / kg.K, on obtient Q en kcal.

exemple : si l'on veut refroidir 5 kg d'eau de 70 à 15°C, il faudra enlever à cette eau :

$$Q = m \cdot c \cdot dt \quad \text{avec } m = 5 \text{ kg}, c = 4,18 \text{ kJ/kg.K}, dt = 55 \text{ K}$$

donc $Q = 5 \times 4,18 \times 55 = 1\,149,5 \text{ kJ}$ ou 275 Kcal

Valeurs de quelques chaleurs massiques :

pour l'eau :	$c = 4,18 \text{ kJ/kg.K}$ ou 1 Kcal °C
pour la glace :	$c = 2,09 \text{ kJ/kg.K}$
pour le cuivre :	$c = 0,39 \text{ kJ/kg.K}$
pour la viande de boeuf :	$c = 3,14 \text{ kJ/kg.K}$

capacité calorifique d'un corps :

La capacité calorifique C d'un corps de masse m est le produit de sa chaleur massique par sa masse : $C = m \cdot c$

avec C en kJ/K, m en kg, c en kJ/kg.K.

Plus C est élevée, plus le corps est un bon véhicule de chaleur.

C'est de beaucoup l'eau qui a la chaleur massique la plus élevée, c'est donc l'eau qui aura la plus grande capacité calorifique. L'eau sera donc le meilleur véhicule de la chaleur.

Comparaison avec l'air :

l'eau véhicule 4,18 kJ / kg.K ou 1 Kcal / litre / °C

l'air véhicule 1 kJ / kg.K ou 0,24 Kcal / Kg / °C

Il faut donc, pour véhiculer la même quantité de chaleur, une masse d'air sensiblement quatre fois plus importante que celle de l'eau.

Si l'on rapporte ceci aux volumes, la différence est encore beaucoup plus importante :

l'eau véhicule 4,18 kJ/kg.K, on sait que 1 kg d'eau = 1 dm³, l'eau véhicule donc 4,18 kJ/dm³.K;

l'air véhicule 1 kJ/kg.K, le volume massique de l'air à 0°C et à 760 mm de Hg étant de 0,775 m³/kg, l'air véhicule donc 1 kJ / 775 dm³.K.
Il faut donc 775 x 4,18 = 3239,5 dm³ d'air pour véhiculer 4,18 kJ, volume 3239,5 fois plus important que celui de l'eau, et ceci pour véhiculer la même quantité de chaleur.

Autre méthode de calcul :

La chaleur massique de l'air rapportée aux volumes est de 1,3 kJ/m³. Il nous faut donc 1 m³ d'air pour véhiculer 1,3 kJ.
Pour l'eau, nous avons 4190 kJ/m³. Le rapport de ces deux chaleurs massiques rapportées aux volumes : 4190 / 1,3 = 3225 nous confirme donc bien le résultat précédent.

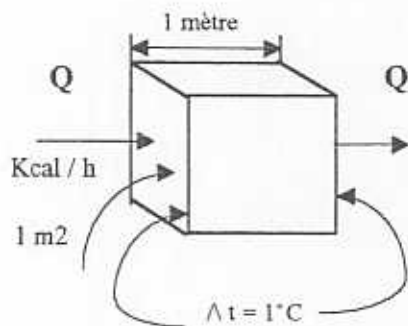
TRANSFERTS (ECHANGES) THERMIQUES

Transmission de chaleur par conduction

Ce mode de transmission de la chaleur a lieu quand deux corps à des températures différentes sont mis en contact direct ou encore quand les parties d'un seul et même corps ne sont pas à la même température

Unité : quantité de chaleur passant par heure dans une surface de 1 m^2 , pour 1 mètre d'épaisseur et 1 K d'écart entre les 2 faces

C'est l'unité de flux Λ en $\text{Kcal} / \text{h m}^\circ\text{C}$ (par m^2)



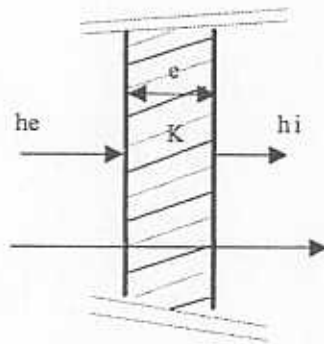
Le coefficient de conductivité thermique d'un matériau joue un grand rôle lorsqu'il s'agit d'isolants: les valeurs de Λ des matériaux de construction et de certains isolants sont données ci dessous.

CONDUCTIBILITE DES PRODUITS (exprimée en $\text{Kcal} / \text{h.m.}^\circ\text{C}$)

Coefficients de conductivité thermique (Λ lambda) sont fonction des propriétés du matériau; il représente le flux de chaleur rapporté à une surface de 1 m^2 qui traverse 1 mètre d'épaisseur de matériau homogène pour 1 K de différence de température entre ses deux faces, les autres côtés du cube ainsi formé n'étant le siège d'aucun échange thermique

	état non surgelé	état surgelé
Eau	0,51	2 (glace)
(On voit qu'il est infondé de dire que le croûtage empêche ou défavorise la congélation ultérieure du produit)		
Produit à 85 % d'eau	0,57	1,40
Viande fraîche	0,43	1,5
Viande de boeuf maigre	0,50	1,15
Viande grasse	0,45	0,90
Argent	360	Cuivre 340
Aluminium	175	Laiton 90
Acier ordinaire	40 - 50	Inox 18 - 8 12
Terre	2	Béton 1,5
Sable	1,2	Brique 1
Porcelaine	0,8	Verre 0,5 - 0,9
Plastique (en générale)	0,3	Bois 0,2
Réfractaire	0,2	Alcool 0,15
Pétrole	0,13	Huile 0,11 - 0,16
Givre	0,08	CO_2 0,074
Mousse de PU	0,03	Air (lame immobile) 0,03

Pertes à travers un mur , une paroi.



- h_e = coefficient de convection extérieure
- h_i = coefficient de convection intérieure
- $h = 15$ en air calme 10 en air très calme
- K = coefficient global

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{e}{\Lambda}$$

Si la paroi est composée de plusieurs couches :

$$\frac{e_1}{\Lambda_1} + \frac{e_2}{\Lambda_2} + \frac{e_3}{\Lambda_3} \text{ remplace } \frac{e}{\Lambda}$$

Si on a un isolant, exemple du PU, on peut négliger $\frac{1}{h_e}$ $\frac{1}{h_i}$ et on a en gros $K = \frac{\Lambda}{e}$

exemple de calcul du flux thermique à travers une paroi

Déterminer les consommations " litres d'azote liquide ou Kg de CO² " par heure d'une baratte ARMOR INOX

Données :

- t_1 = température extérieure + 10 °C
- t_2 = température intérieure - 30 °C
- a_e = coefficient d'échange superficiel intérieur 20 Kcal / m².h.K
- a_i = coefficient d'échange superficiel extérieur 15 Kcal / m².h.K
- e_1 = épaisseur de la paroi acier inox 0,004 mètre
- e_2 = épaisseur de la couche de glace 0,005 mètre
- Λ_1 = coefficient de conductivité thermique de l'acier inox 12 Kcal / m.h.K
- Λ_2 = coefficient thermique de la glace 2 Kcal / m.h.K
- s = surface de la baratte 19 m²
- C_p = chaleur spécifique d'un litre d'azote liquide ou d'un Kg de CO² 68 Kcal

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{a_e} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{a_i}}$$

$$Q = \frac{+10 - (-30)}{\frac{1}{20} + \frac{0,004}{12} + \frac{0,005}{2} + \frac{1}{15}} = \frac{40}{0,05 + 0,00033 + 0,0025 + 0,0666}$$

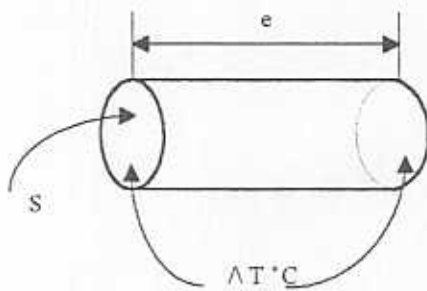
$$K = \frac{1}{0,11943} = 8,37 \text{ Kcal } ^\circ\text{K.m}^2$$

$$Q = 335 \text{ Kcal / m}^2$$

$$\text{Consommation horaire de } \frac{335 \text{ Kcal} \times 19}{68} = 94 \text{ LN}^2 \text{ ou Kg de CO}^2$$

Pertes par conduction le long d'un pont thermique, d'une ligne isolée (flux par mètre) etc...

Exemple : pont thermique par une section S



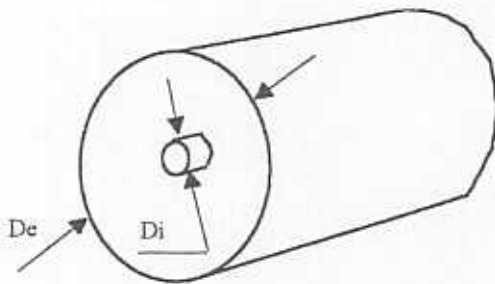
$$Q \text{ Kcal / h} = \frac{S \cdot \lambda \cdot \Delta \cdot T}{e}$$

S = surface en m²

e = longueur du pont thermique en m

λ = coefficient de conductivité

Δ = différence de température int. / ext.



$$\text{Kcal / h} = \lambda \times 2 \mu \times \Delta t \frac{1}{\log \frac{De}{Di}}$$

log De / Di = logarithme népériens du rapport des diamètres "extérieur sur intérieur"

Exemple : De = 0,2 m

Di = 0,02 m

Δt = -196 °C + 24 ° = 200 °C

$$\left(L \frac{De}{Di} = 2,3 \log_{10} \frac{De}{Di} \right)$$

$$\text{Kcal} = 0,03 \times 2 \times 3,14 \times 220 \times \frac{1}{L10} = 18 \text{ Kcal / h et m de longueur}$$

A Z O T E

DONNEES PHYSIQUES

A PRESSION ATMOSPHERIQUE 1,013 BAR

(volume liquide à la température d'ébullition , volume de gaz à 15 °C)

Kg	LITRE	M ³
1	1,24	0,84
0,808	1	0,68
1,19	1,470	1

- température d'ébullition (à 1 atm) 77,347 K - 195, 803 °C arrondie à - 196 °C
- chaleur latente de vaporisation **47,459 Kcal / Kg d'azote liquide ou 38,27 Kcal par litre d'azote liquide** arrondie à 38 Kcal / l
- 1 litre de liquide fournit : 175 litres de gaz à - 196 °C (densité : 4,6 Kg / m³)
680 litres de gaz à + 15 °C (densité : 1,2 Kg / m³)

A PRESSION RELATIVE 1,5 BAR

(Pression idéale pour une utilisation cryogénique)

- 1 litre d'azote liquide pèse 0,767 Kg arrondi à 0,8 Kg
- la température d'ébullition est de - 187 °C
- la chaleur de vaporisation est de 35,6 Kcal / litre d'azote liquide arrondi à 36 Kcal / l
- **1 litre d'azote liquide fournit 75 litres de gaz à - 187 °C et 1,5 bar de pression**

REMARQUE

Commercialement les quantités d'azote liquide en FRANCE sont exprimées en litres, pour un calcul en poids il faut prendre la masse d'un litre de liquide à la pression atmosphérique soit 0,8 Kg / l environ (0,809 exactement)

A Z O T E

Formule chimique : N_2 (*Nitrogen en Anglais*)

L'azote est incolore, inodore et sans saveur. C'est le composant principal de l'air, (78,08 % en volume) L'azote ne peut entretenir ni la respiration, ni la combustion, mais joue un rôle essentiel en tant qu'élément de la matière vivante et participe au processus naturel complexe de la transformation de la matière. C'est un gaz ininflammable.

L'azote est un gaz physiologiquement inerte, non toxique. Par déplacement de l'oxygène de l'air, il peut avoir des effets nocifs sur l'organisme en réduisant la pression partielle de l'oxygène dans les poumons et agir comme asphyxiant. (voir chapitre : sécurité)

Détection des fuites : avant utilisation d'un appareillage devant contenir de l'azote sous pression, tester l'étanchéité du montage. (par formation de bulles avec un agent tensioactif) .

Compatibilité avec les matériaux :

Métaux

L'azote gaz n'est pas corrosif et peut être utilisé en présence de tout métal courant pour les températures ordinaires. Pour la mise en oeuvre de l'azote liquide, les matériaux susceptibles d'être utilisés sont :

- acier au nickel (9% nickel)
- acier inoxydable
- cuivre
- laiton
- bronze au silicium
- aluminium

Matières plastiques

A basse température le Téflon, le Kel-f, conservent un bon comportement et sont souvent utilisés pour la réalisation des joints.

L'azote liquide est employé comme source de frigorifiques, il est utilisé dans des domaines très variés:

- Produit alimentaire, surgélation, broyage, conservation, lyophilisation, transport...
- Métallurgie, trempe sous $0^{\circ}C$, emmanchement par contraction...
- Travaux publics, congélation des sols, congélation de tuyauteries...
- Durcissement de matières plastiques, ébarbage, broyage, tressage....
- Industrie nucléaire, recherche scientifique, piège à froids, cryopompes...
- Effets scéniques, spectacle, formation de brouillard, de neige de glace...
- Cryochirurgie, des yeux, du cerveau, de la peau....

LE DIAGRAMME DE MOLLIER EST UNE REPRESENTATION
"PRESSION -ENTHALPIE" DES CARACTERISTIQUES DES GAZ.
LES TEMPERATURES SONT FIGUREES PAR DES ISOTHERMES

FONCTION "CHALEUR TOTALE " OU ENTHALPIE

$$H = U + PV \quad (\text{exprimée en unité de chaleur par unité de masse du fluide})$$

U = énergie interne

PV = travail extérieur (qui serait produit si le fluide augmentait de volume de 0 au volume considéré sous une pression constante P égale à la pression considérée).

PROPRIETES

1) Fonction caractéristique de l'état du fluide, la variation d'enthalpie ne dépend que de l'état final et de l'état initial

2) Chauffage sous pression constante : La variation d'enthalpie égale la quantité de chaleur reçue par le fluide (ceci se traduit par un déplacement horizontal sur le diagramme de MOLLIER).

3) Dans le cas d'une détente sans échange de chaleur avec l'extérieur, l'enthalpie reste constante (ceci se traduit par un déplacement vertical sur le diagramme de MOLLIER, par exemple dans le cas d'une détente par perte de charge dans un orifice).

Pour mémoire : Transformation isentropique : Transformation adiabatique réversible :
exemple compression ou détente dans un cylindre calorifugé

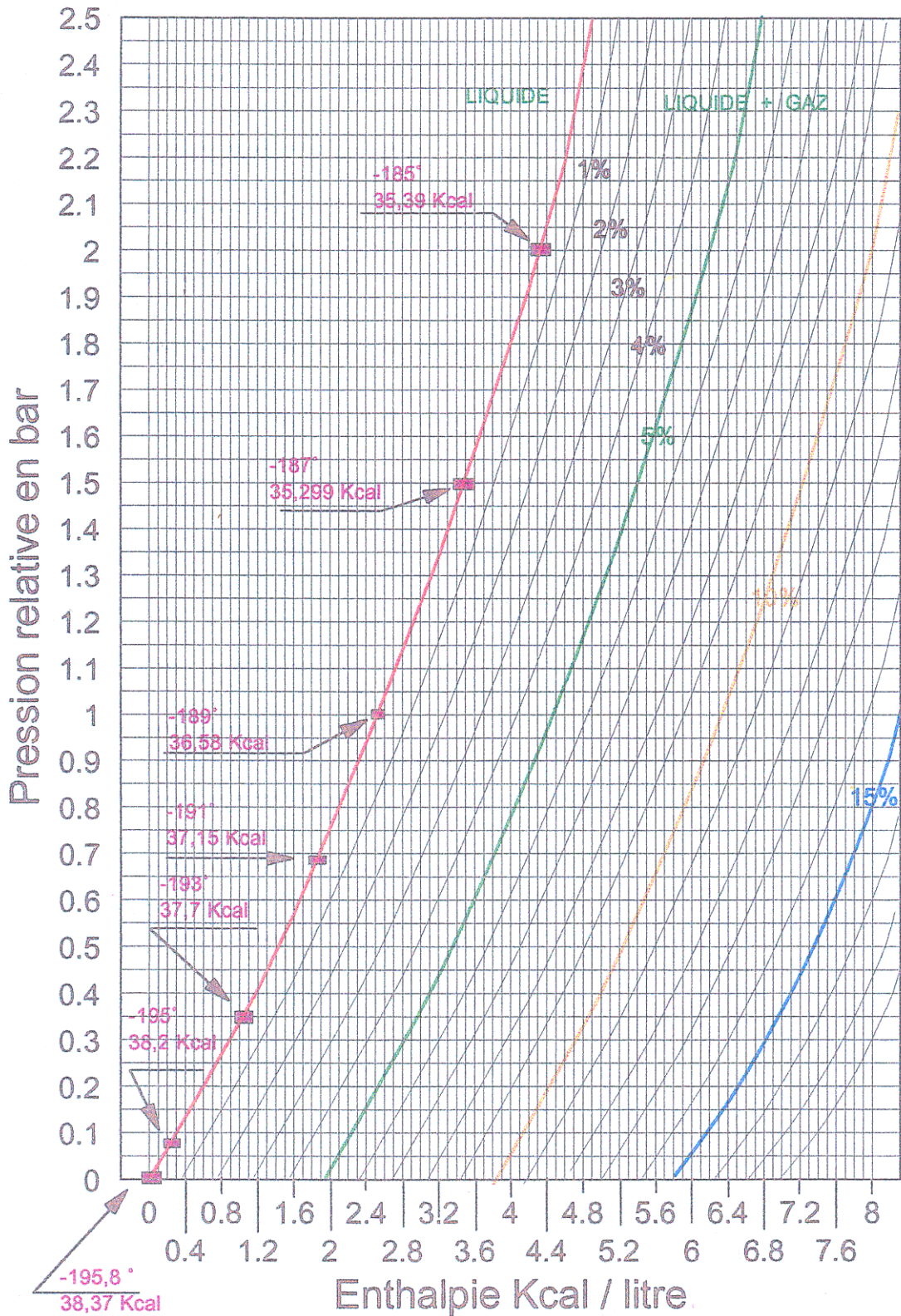
DIAGRAMME DE MOLLIER

POUR

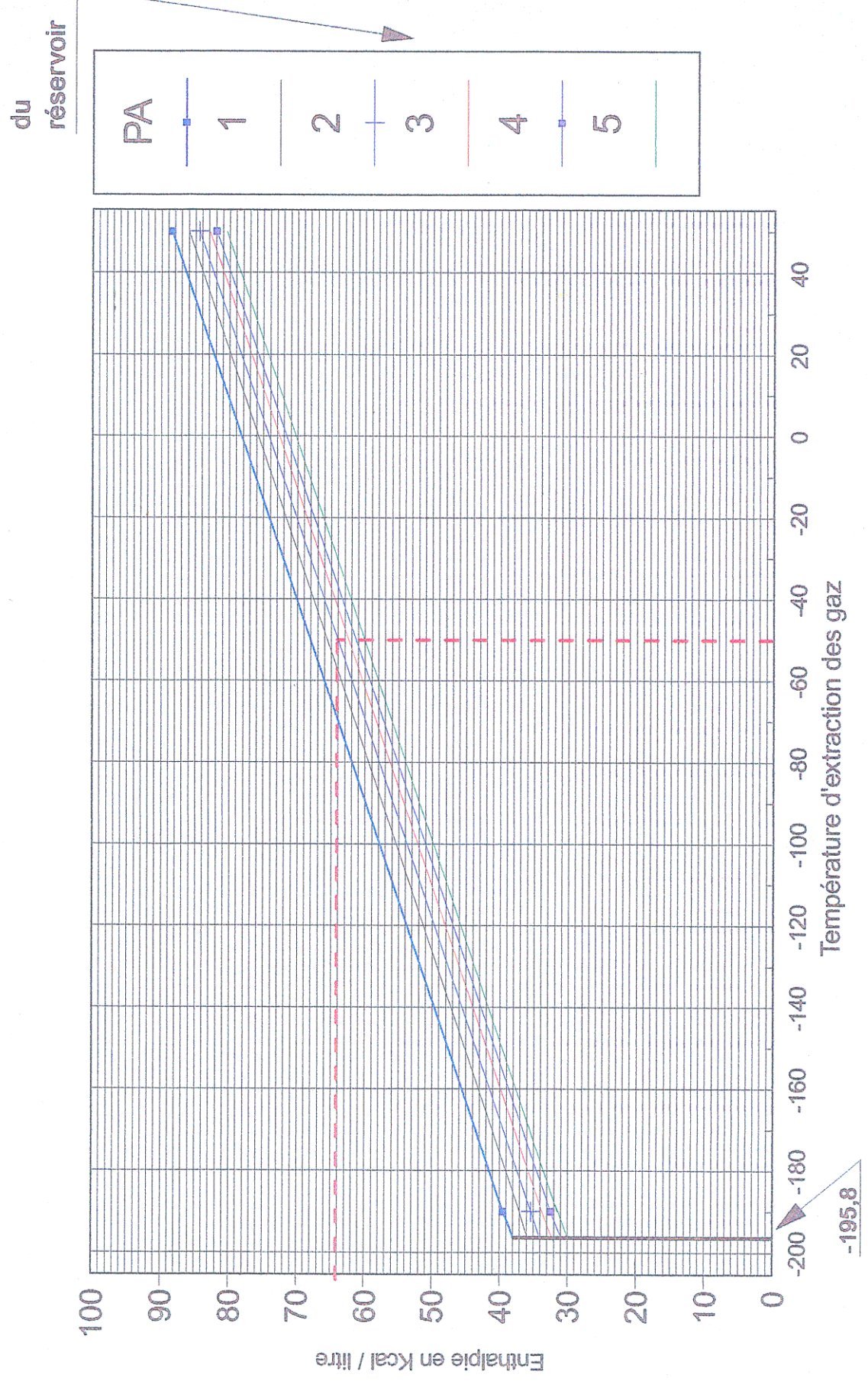
L' AZOTE

Extrait du diagramme de MOLLIER de l'azote

TEMPERATURE EN °C
CHALEUR DE VAPORISATION Kcal / Litre



Enthalpie de l'azote liquide en fonction de la pression du réservoir



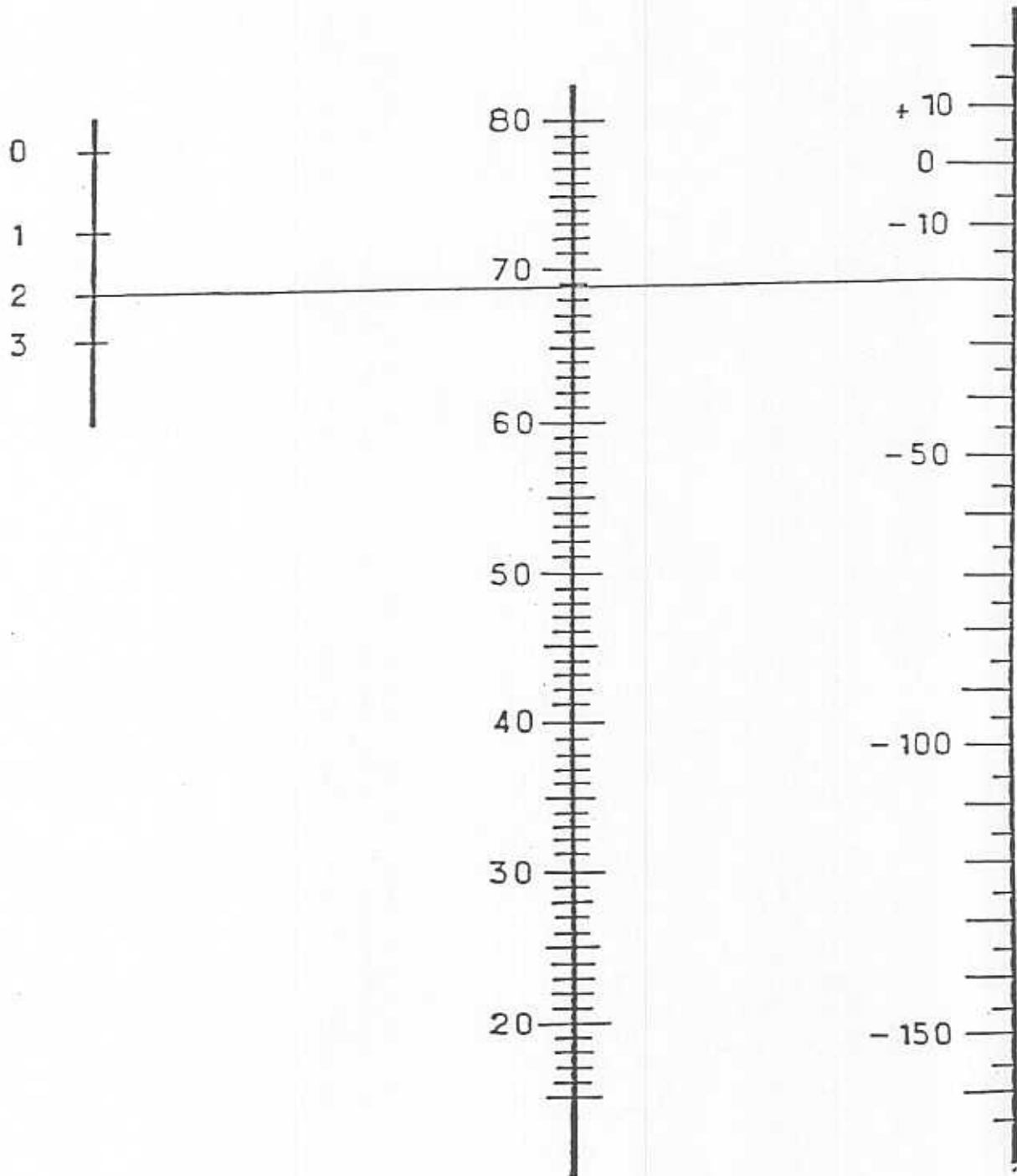
Exemple température d'extraction - 50°C = 64 Kcal / litre

ENERGIE FRIGORIFIQUE DE L'AZOTE

Pression d'équilibre
au réservoir

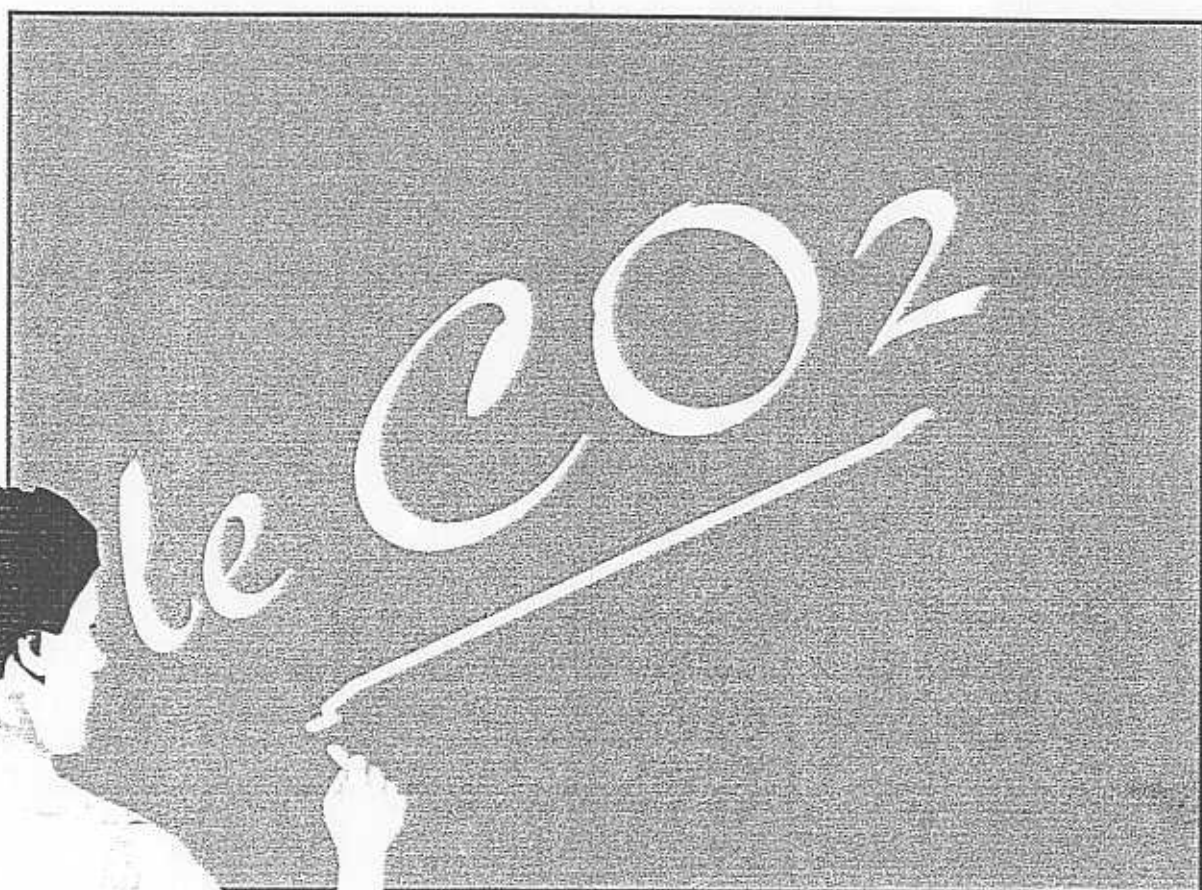
Energie frigorifique libérée
par litre d'azote liquide en
K cal./litre

Température d'utilisation
de l'azote gazeux





AIR LIQUIDE



AIR LIQUIDE



LE CO₂

GENERALITES

Le GAZ CARBONIQUE (CO₂) existe à l'état naturel dans l'atmosphère qui en contient environ 0,03 % ou 300 ppm (partie par million).

Cette teneur est à peu près constante grâce à l'équilibre qui s'établit entre le CO₂ contenu dans l'atmosphère et celui qui est dissous dans les mers ou consommé par les plantes et les animaux (cycle du carbone).

Industriellement le CO₂ est obtenu :

- de sources naturelles (origine volcanique) sous forme de gisements souterrains de gaz ou d'eaux minérales (VICHY)
- de caves de fermentation alcoolique (distilleries)
- de combustion de fuel
- de sous produits (raffineries - usines d'engrais - industries chimiques)

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

- Formule chimique CO₂
- Masse moléculaire (g.mol⁻¹) 44,010
- Densité du gaz par rapport à l'air à 0 °C 1,529
- Masse volumique du gaz à 0 °C (kg m⁻³) 1,977

Point critique (PC)

- Température (°C) 31,1
- Pression absolue (bar) 73,84
- Masse volumique (kg m⁻³) 464

Point triple (PT)

- Température (°C) 56,6
- Pression absolue (bar) 5,18
- Masse volumique (kg m⁻³) 180,4
- Chaleur latente de fusion- l (kg Cal . kg⁻¹) 46,97

Point de sublimation (PS à la pression atmosphérique)

- Température (°C) - 78,5
- Masse volumique (kg m⁻³) 1562
- Chaleur latente de sublimation (kg Cal . kg⁻¹) 136,4

1 kg de solide libère 845 litres de gaz (détendu à 15 °C et 1 bar)

Equilibre solide - liquide - vapeur (voir diagramme de phase du CO₂)

PROPRIETES PHYSIQUES

Le CO₂ peut exister sous les trois états que l'on retrouve toujours dans la nature pour tous les corps.

ETAT SOLIDE - ETAT LIQUIDE - ETAT GAZEUX

ETAT GAZEUX : C'est le plus répandu. Le GAZ CARBONIQUE est :

- incolore
- saveur piquante
- non toxique
- plus lourd que l'air ($d = 1,5$)

ETAT LIQUIDE : Cet état ne peut pas exister à l'air libre.

Pour conserver le CO₂ à l'état liquide il faut établir certaines conditions de température et de pression :

- $> 5,18$ bar
- $< 31,1$ °C
- $> -56,6$ °C

Le CO₂ liquide est incolore et à la même densité que l'eau (un litre pèse un kilo) lorsqu'il est à -20 °C - 20 bar.

ETAT SOLIDE : L'état solide est obtenu par décompression du liquide en dessous de 5,18 bar absolus (4,18 bar au manomètre) ou par refroidissement en dessous de $-56,6$ °C.

C'est un solide blanc, floconneux ayant l'aspect de la neige. Compacté, il prend le nom de glace carbonique ou glace sèche.

QUELQUES DEFINITIONS

- Température critique

Température au dessus de laquelle le CO₂ liquide ne peut plus exister quelle que soit la pression :

$$T_c = +31,1 \text{ °C}$$

- Pression critique

Pression absolue à laquelle du CO₂ gaz ayant une température de $+31,1$ °C commence à se liquéfier :

$$P_c = +74 \text{ bar absolus}$$

- Point triple

C'est le point d'équilibre entre les trois états solide - liquide - gazeux du CO₂.

Il est réalisé pour une température de $-56,6$ °C et une pression absolue de 5,18 bar.

- Sublimation

C'est le passage direct de l'état solide à l'état gazeux.

La température de sublimation de la glace sèche à la pression atmosphérique est de $-78,5$ °C

DIOXYDE DE CARBONE

Formule chimique : CO_2 (Carbon dioxide ou carbonic anhydride en Anglais)

Le dioxyde de carbone ou anhydride carbonique est un gaz dans les conditions ordinaires (15 °C et 760 mm Hg). L'anhydride carbonique existe dans l'atmosphère en concentration variable, comprise entre 0,03 et 0,06 pour cent en volume (300 à 600 ppm). C'est un gaz incolore, inodore, à saveur piquante, ininflammable, chimiquement peu réactif, seulement toxique pour des concentrations élevées :

- Une concentration de 3 à 5 % active les phénomènes respiratoires en agissant sur les centres bulbaires et entraîne des maux de tête sans produire d'effets nocifs chroniques à la suite d'expositions répétées.
- Une teneur de 8 à 15 % provoque des nausées, des vomissements pouvant aboutir à une perte de connaissance du sujet qui, s'il n'est pas évacué au grand air ou traité par oxygénothérapie de réanimation, mourra par insuffisance d'oxygène.
- L'exposition à des concentrations plus élevées entraîne une insuffisance circulatoire rapide avec coma et mort.

Le dioxyde de carbone est le plus puissant des agents vasodilatateurs cérébraux connus.

ATTENTION : Le DIOXYDE DE CARBONE est un gaz plus lourd que l'air. Il s'accumule au niveau du sol et devient dangereux dans les atmosphères confinées. Ne jamais utiliser le dioxyde de carbone sans avoir consulté le chapitre : (sécurité)

La concentration maximale admise et recommandée pour le CO_2 dans l'atmosphère des locaux industriels permettant des exposition de 8 heures par jour pendant 5 jours par semaine sans effet décelable pour la plupart des individus est de : 5 000 ppm-vol ou 9 000 mg.m^{-3}

Détection des fuites : avant utilisation d'un appareil devant contenir du CO_2 sous pression, tester ce montage avec un détecteur de fuites (par formation de bulles avec un agent tensioactif)

Compatibilité avec les matériaux :

Métaux

Le dioxyde de carbone, en présence d'humidité, forme de l'acide carbonique. aussi est-il recommandé pour une installation devant contenir du CO_2 d'effectuer un séchage. Le dioxyde de carbone anhydre est compatible avec les matériaux et alliages usuels :

- acier au nickel ,
- acier inoxydable
- aluminium
- cuivre et alliages
- nickel et ses alliages

Matières plastiques

A la température de $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, le téflon, le Kel-f, conservent un bon comportement et sont souvent utilisés pour la réalisation des joints.

Le dioxyde de carbone stocké sous forme liquide ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 20 bar) est en cryogénie généralement utilisé sous sa forme solide par détente du liquide à la pression atmosphérique. Il est employé comme source de frigories pour :

- Produits alimentaires, refroidissement, surgélation, broyage, transport ...
- Dans les appareils d'extinction d'incendie (projection de neige carbonique)
- En chimie comme agent réfrigérant (utilisations ponctuelles).....
- Caoutchoucs et plastiques, ébarbage, cryobroyage.....
- Effets scéniques, spectacle, formation de brouillard.....
- Laboratoires et centres de recherches comme réfrigérant (glace sèche)
- Sociétés de nettoyage, décapage (clean blast)

Electricité statique

La présence de neige carbonique dans le flux gazeux a pour conséquence la formation d'électricité statique par frottement des particules solides sur les parois de la tuyauterie ou de l'appareil. Il faut donc relier à la terre tous les appareils produisant de la neige carbonique.

Dégagement de dioxyde de carbone. Le CO_2 est susceptible de se dégager dans de nombreuses opérations

- Fermentation alcoolique
- Fermentation de débris de végétaux, putréfaction, fermentation de céréales dans les silos
- Synthèse de l'ammoniac
- Calcination de la chaux
- Combustion des hydrocarbures et des composés organiques
- Maturation des fruits
- Réactions de chimie industrielle
- Rejet naturel, principalement en zone volcanique

Sous l'action d'étincelles électriques le dioxyde de carbone se décompose en :

Oxyde de carbone
Oxygène

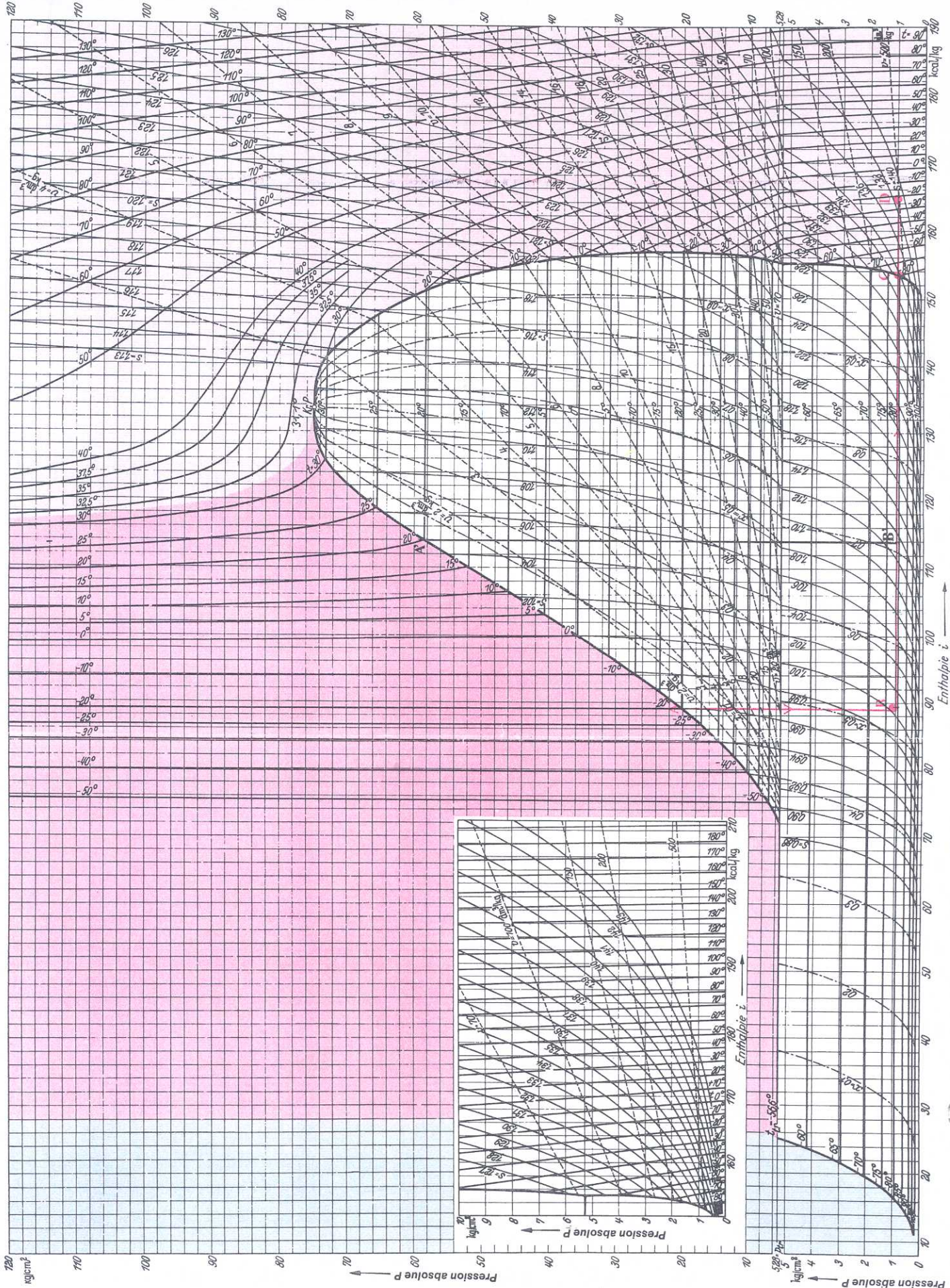


DIAGRAMME ENTHALPIQUE DU CO₂ (diagramme de Mollier)

C'est un ensemble de courbes qui donne les caractéristiques physiques d'un corps à un instant donné.

Il existe pour tous les corps.

Très généralement le diagramme de Mollier du CO₂ nous permettra de connaître :

- sa température
- sa pression
- l'état dans lequel il se trouve (solide - liquide - gazeux)
- son enthalpie

LA PRODUCTION DE FROID

• Définition

Le froid est obtenu par détente du gaz ou du liquide sous pression. C'est un phénomène physique valable pour tous les gaz ou liquides. Le phénomène est inversé lorsque l'on augmente la pression, il y a échauffement du gaz.

La quantité de chaleur cédée ou absorbée par le gaz ou le liquide représente la différence d'enthalpie entre l'état initial et l'état final quelque soit le chemin par lequel on arrive à l'état final.

La détente du liquide et le réchauffement du gaz ont absorbé 82 Kcal/kg de CO₂. Cette quantité de chaleur a été prise à l'environnement immédiat, d'où refroidissement de cet environnement (cellule, tunnel) qui a cédé cette chaleur.

• La production de neige carbonique ("CARBOGLACE" glace sèche)

La détente brusque du liquide CO₂ en dessous de 5,18 bar provoque la formation de neige carbonique et de gaz à une température de - 78,5 °C, lorsque la pression égale la pression atmosphérique.

La proportion de neige et de gaz dépend de l'état initial du liquide (température et pression). Cette proportion est donnée par le diagramme de Mollier.

EXEMPLE

CO₂ L (- 20 °C / 20 bar) → { 47 % solide
53 % gaz

CO₂ L (+ 20 °C / 58 bar) → { 29 % solide
71 % gaz

DEFINITION DU DIPHASIQUE (% liquide et % gaz) DANS UNE LIGNE

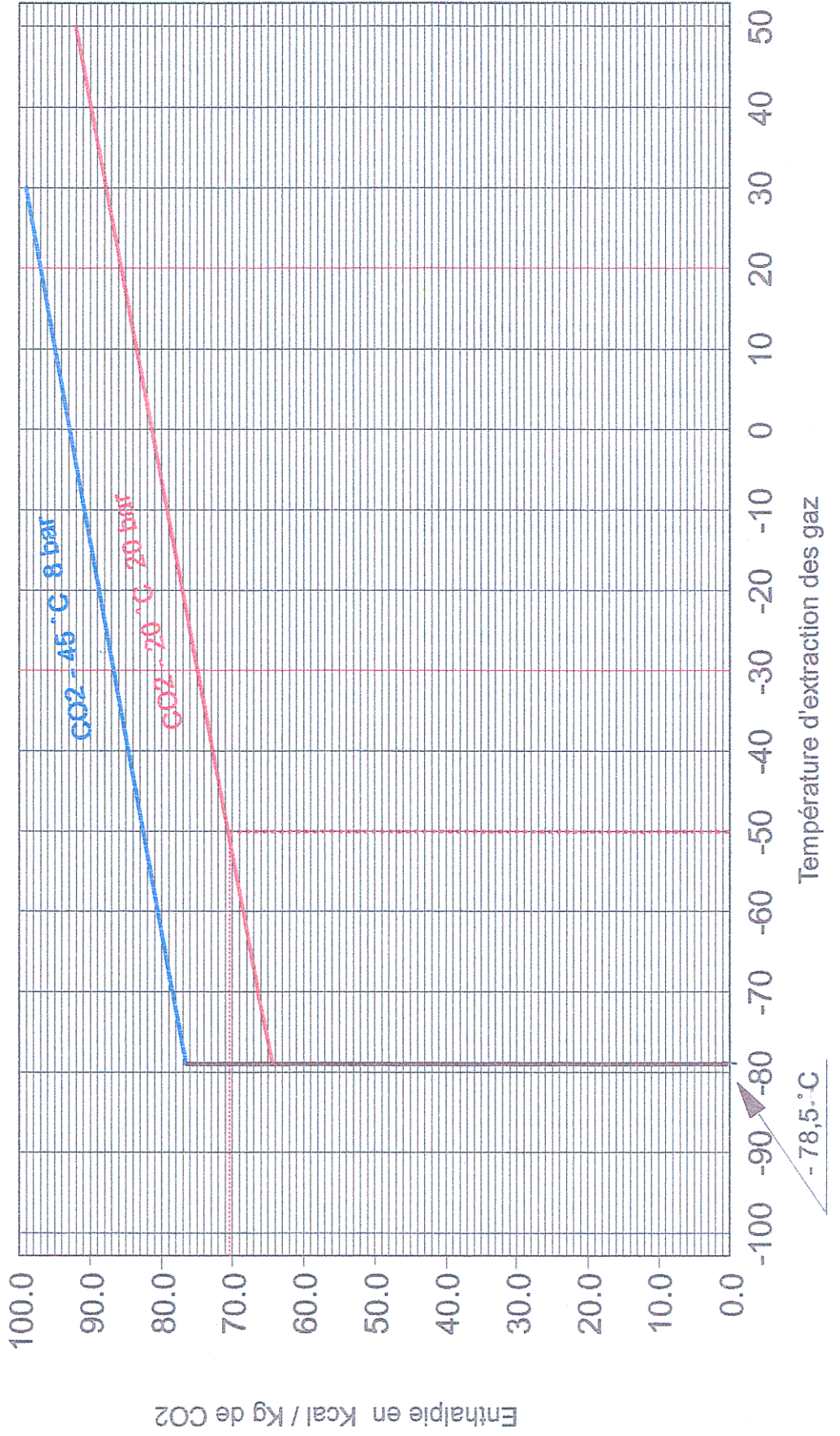
• Définition

Dans une canalisation, un liquide seul sans gaz est appelé un liquide franc.

S'il y a mélange gaz + liquide, c'est un liquide diphasique (deux phases liquide et gaz).

Avec le CO₂ liquide en équilibre, toute perte de charge (chute de pression) ou toute entrée de chaleur dans une canalisation provoque une vaporisation du liquide, donc un liquide diphasique.

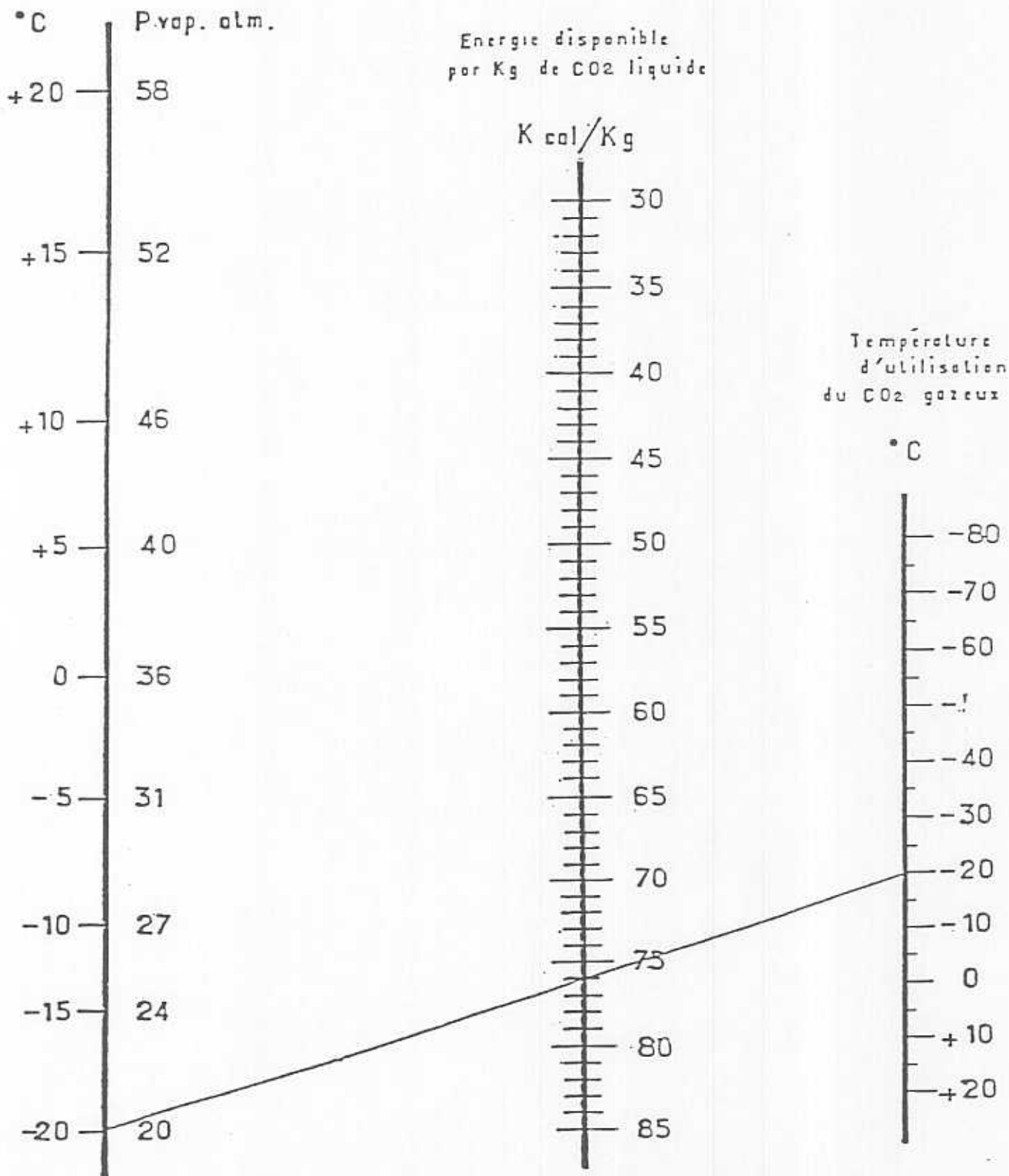
Enthalpie du dioxyde de carbone - 20°C / 20 bar et - 45°C / 8 bar



Exemple température d'extraction - 50°C = 70.5 Kcal / Kg

ENERGIE FRIGORIFIQUE DU CO₂

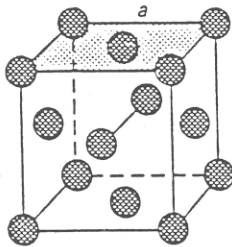
Conditions d'équilibre
au stockage



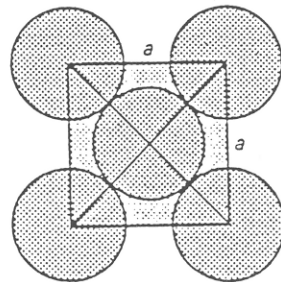
LE CO₂ SOLIDE

I - CARACTERISTIQUES GENERALES

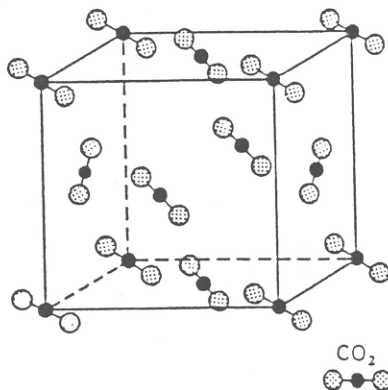
La structure du CO₂ solide est cristalline ; chaque cristal est composé d'un arrangement régulier de molécules, correspondant au type dit "cubique à faces centrées" (C.F.C.). Dans cette configuration, en effet, les molécules occupent les noeuds d'un réseau, selon le schéma suivant :



Motif élémentaire



Compacité



Structure du cristal de CO₂

1. Point de sublimation

La pression au point triple étant de 5,18 bars absolus, il s'ensuit qu'au-dessous de cette valeur le CO₂ ne peut se trouver qu'à l'état solide et/ou gazeux, selon les conditions de température (voir diagramme de phases, chapitre B-1-1.).

Conséquence pratique : à la pression atmosphérique, le CO₂ solide se transforme directement en gaz sans passer par l'état liquide ; on dit qu'il se sublime.

Rappelons que le point de sublimation est l'intersection de la courbe d'équilibre solide-vapeur avec l'isobare 1 bar.

Les caractéristiques de ce point sont résumées dans le tableau suivant :

Température (K) (°C)	Chaleur latente (kal/kg)	Masse volumique liquide (kg/m ³)	Masse volumique vapeur (kg/m ³)
194,65 -78,5	136,40	1.562	2,814

Dans les conditions normales (0°C, 1 atmosphère), 1 kg de CO₂ solide libère environ 509 litres de gaz.

2. Différents aspects du CO₂ solide

Le CO₂ solide peut se trouver sous les aspects suivants :

- neige foisonnée obtenue par détente du liquide à travers une buse ou une électro-vanne,
 - neige sous forme de granulés, obtenue par détente du liquide dans un cyclone,
 - petits cylindres compactés extrudés, appelés pellets, nuggets ou sticks,
 - blocs de glace carbonique de 10 kg pouvant être découpés en plaquettes,
 - CO₂ cristallisé (densité variant entre 1,63 et 1,51 kg/l, en fonction de la température.
- Le CO₂ cristallisé est obtenu expérimentalement par immersion d'un réservoir contenant du CO₂ liquide à 6-7 bars dans l'azote liquide. La pression chute jusqu'à se stabiliser à la valeur de la pression de vapeur saturante du CO₂ à la température correspondante.

La masse de glace obtenue est composée :

- . d'une partie périphérique compacte,
- . d'une partie centrale non compacte.

Les différences entre ces divers états sont :

- . la vitesse de sublimation
- . la densité

3. Rendement de prise en neige

Le diagramme enthalpique "de Mollier" figurant en annexe, permet de déterminer les proportions en masse de neige carbonique obtenue par détente, à partir de diverses conditions de stockage (en équilibre de pression et de température).

C'est ce que l'on appelle le rendement de prise en neige, c'est-à-dire le quotient du poids de neige produit par le poids de CO₂ liquide initial.

Signalons quelques valeurs-repères dans le cas de soutirage de CO₂ par détente jusqu'à la pression atmosphérique, à partir de différents stockages :

- Bouteille à 20°C
 - . sans tube plongeur : environ 2 %
 - . avec tube plongeur : environ 29 %
- Citerne vrac : environ 47 %

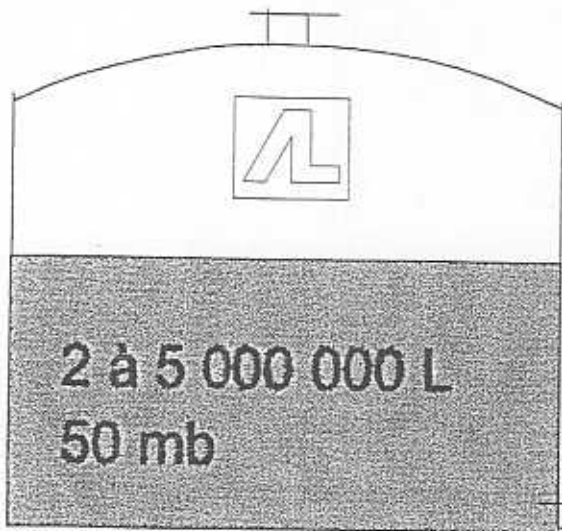


AIR LIQUIDE

Stockages Distribution



TRANSPORT ET DEPOTAGE



A l'usine 0,05 bar - 195°3
(il faut environ 0,7 Kwh pour produire 1 litre d'azote liquide)

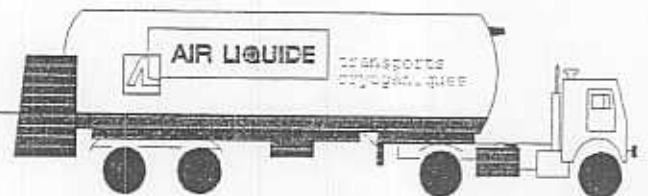
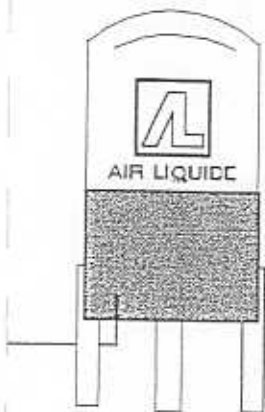
Remplissage du camion
LN2 à 0,18 bar - 194°
h → 0,5 Kcal / l



1 200 à 50 000 litres
horizontal ou vertical

Dépotage : pressurisation de la citerne à 0,5 / 0,8 bar pour amorçage de la pompe; perte de 0,8 % du liquide pour assurer la pressurisation. Energie de pompage 0,8 Kcal / litre soit perte de 1,2 % -191° 0,7 bar = pression d'équilibre

Transport :
la pression augmente de 0,07 bar par 100 Km



Remplissage :

En source : la pression dans le réservoir augmente. En pluie : la pression dans le réservoir diminue car on condense la phase vapeur par pluie de LN2 à -191°C ; la pression peut diminuer jusqu'à 0,7 bar.

POUR EVITER LES PERTURBATIONS PENDANT LES REMPLISSAGES

Il faut pouvoir remplir en pluie ou en source éventuellement simultanément

ANOMALIES : PRESSURISATION EXCESSIVE DU CAMION POUR LE DEPOTAGE

Pressurisation à 2 bar	perte 1,6 %
Pressurisation à 5 bar	perte 3,4 %
Pressurisation à 8 bar	perte 5 %

LE REMPLISSAGE PEUT METTRE EN SUSPENSION LES EVENTUELS DE POTS DU RESERVOIR GLACE HYDRIQUE PAR EXEMPLE : UN FILTRE 150 MICRONS EVITE LES BOUCHAGES.

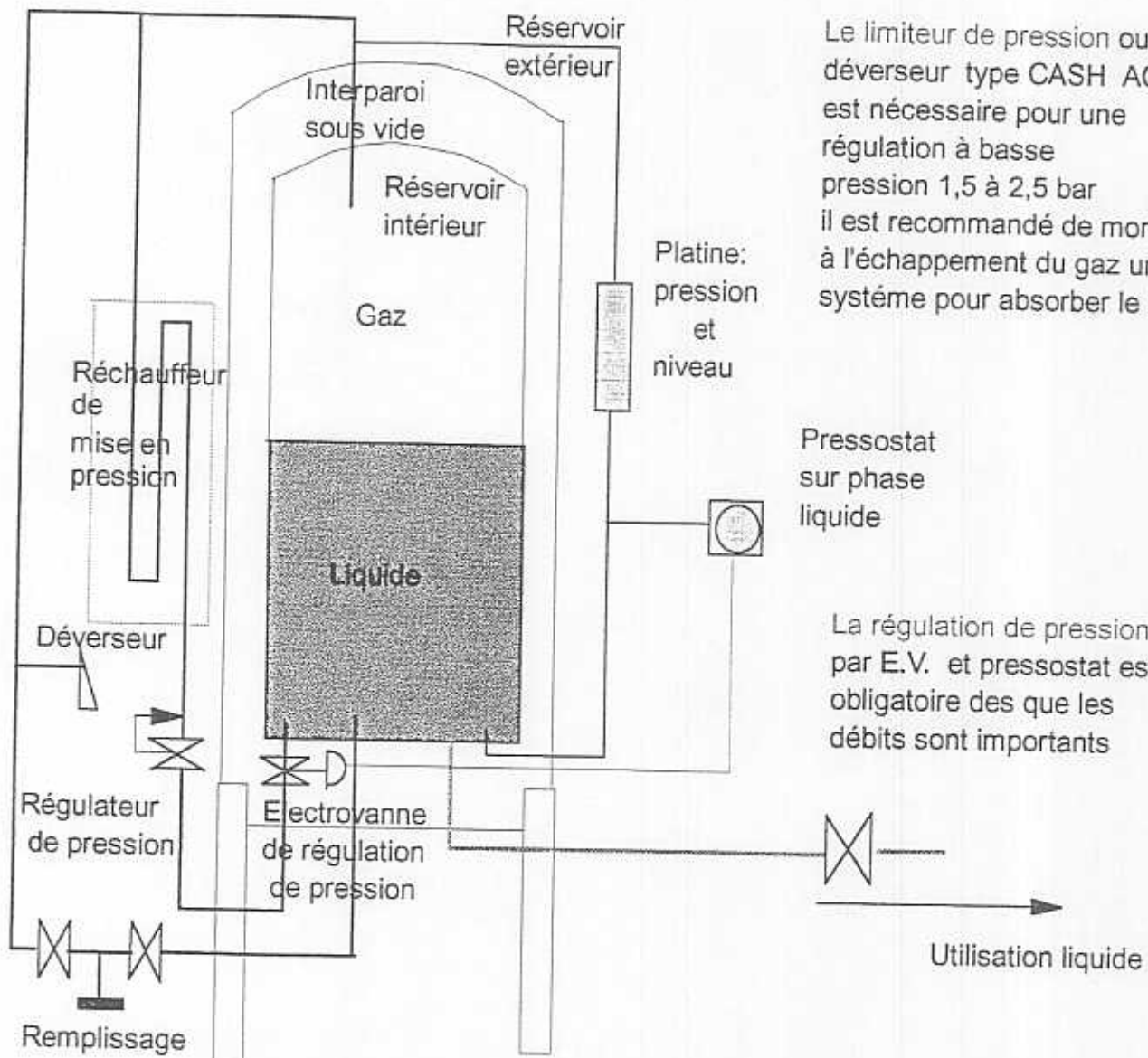
PERTES : Remplissage du camion - Transport - Pressurisation avant dépotage

les pertes sont à la charge d'A.L.

Energie de pompage (1,2 %) à la charge du client, cette perte sert à la pressurisation du réservoir

STOCKAGES

gaz de l'air



Les réservoirs sont livrés en standard avec remplissage A LA FOIS EN SOURCE ET EN PLUIE pour fonctionner normalement pendant le dépotage. Si le remplissage en source n'existe pas il faut réaliser une jonction de remplissage source en gros diamètre avec vanne 2'.

- L'utilisation d'un évaporateur à la place d'un réservoir est possible avec quelques modifications :
- 1) supprimer le circuit économiseur
 - 2) réaliser une mise à l'air pour limiter la pression par déverseur
 - 3) monter une régulation de pression avec un pressostat à prise de pression sur la phase liquide et monter une électrovanne cryogénique sur le circuit mise en pression
 - 4) changer les soupapes M.P. par des B.P
 - 5) changer le ressort du régulateur ou changer l'appareil si nécessaire par un régulateur B.P..

STOCKAGES gaz de l'air

Caractéristiques principales des réservoirs verticaux versions : 00, 01, 02, A, A' (version 00 la plus ancienne)

TYPE	CAPACITE UTILE en litres	TAUX * D'EVAPORATION	DEBIT l / h sous 2 bar	MODELE	HAUTEUR en mm	DIAMETRE en mm	POIDS A VIDE en Kg	PRESSION MAX.
RV 1 200 Cryolor : RV 1 400	1 275	0,51 %	500	00 01 02 A	2 505 2 600 3 020 3 145	1 050 1 033 1 400 1 400	560 560 970 1 300	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar
RV 3 000 Cryolor : RV 3 400	3 190	0,45 %	2 000	00 01 02 A	5 275 5 300 4 350 4 380	1 464 1 454 1 600 1 600	2 315 2 315 1 950 2 350	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar
RV 5 000 Cryolor : RV 5 300	5 050	0,33 %	2 000	00 01 02 A	5 190 5 100 4 480 4 480	1 812 1 800 1 900 1 900	2 589 2 589 3 230 3 230	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar
RV 10 000 Cryolor : RV 11 000	10 000	0,26 %	4 000	00 01 02 A	8 190 8 436 5 700 5 880	1 812 1 812 2 200 2 208	4 114 5 500 4 750 4 890	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar
RV 20 000 Cryolor : RV 23 000	21 560	0,20 %	4 000	00 01 02 A	8 380 8 517 9 700 9 775	2 453 2 453 2 200 2 208	7 800 7 000 8 100 8 580	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar
RV 40 000 Cryolor : RV 45 000	42 360	0,14 %	4 000	02 A A'	9 500 11 324 9 260	3 100 2 840 3 100	12 400 12 195 11 515	2,9 bar 3,9 bar 3,9 bar
RV 50 000 Cryolor : RV 53 000	50 000	0,14 %	4 000	00 01 02 A A'	12 410 12 100 11 400 11 070 12 922	3 068 3 068 3 100 3 100 2 840	21 000 22 500 14 650 14 800 14 800	2,9 bar 2,9 bar 2,9 bar 3,9 bar 3,9 bar

*Taux d'évaporation en % de la capacité utile, par jour, pour l'oxygène (chaleur latente au point d'ébullition -182,97 °C = 50,869 Kcal / Kg)

CALCUL DES PERTES REELLES D'UN RESERVOIR EN FONCTIONNEMENT

Par rapport au volume V de gaz crée par les entrées de chaleur dans le réservoir :

Si la consommation en liquide / jour est $< V$, la pression va monter et le réservoir va dégazer par sa soupape tarée ou son déverseur (il y a perte de gaz)

Si la consommation en liquide / jour est $> V$, La pression va baisser et sera maintenue par la mise en pression (il n'y a pas de perte de gaz)

Pour une bonne utilisation cryogénique il est très important de maintenir la pression amont constante (1,8 bar pression idéale) par un système fiable et suffisamment précis tel qu'un déverseur. Au cas où notre client a besoin d'avoir une pression fine ou de grand débit il faut préconiser le montage d'une électrovanne cryogénique sur le circuit liquide. Cette E.V. est commandée par un pressostat qui doit être branché sur la pression de sortie du liquide. Ceci pour tenir compte des variations de niveau du liquide dans le réservoir.

Exemple pour un 50 000 litres la hauteur du réservoir intérieur étant de plus de 10 mètres la variation de la pression sera de plus de 0,7 bar entre un niveau max. et un niveau mini ! soit une variation de la pression de 40 % !

Le débit maximum de liquide en sortie du réservoir correspond au maximum de capacité du réchauffeur de mise en pression rapide, afin d'éviter la chute de pression. Un débit instantané supérieur est possible, s'il n'est pas continu. En cas de doute consulter CRYOLOR.

EVALUATION DES PERTES PAR LA MONTEE DE LA PRESSION

1) Evaluer le volume de gaz correspondant à l'accroissement de la pression.
Ce volume de gaz correspond à la vaporisation de n litres d'azote liquide, et à une entrée de chaleur Q_1

2) Evaluer l'augmentation de l'enthalpie du liquide sur le diagramme, multiplier par la quantité de liquide contenue dans le réservoir.

A 1,5 bar relatif la formule est :

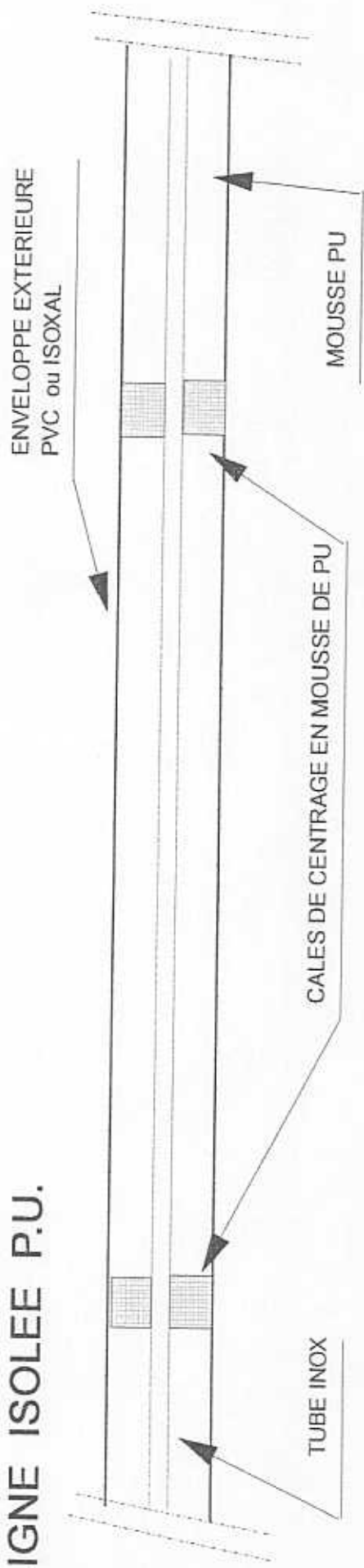
$$Q = \Delta P \times \left(V_t \times \frac{36}{175} + V_e \times 1,6 \right)$$

Exemple : Réservoir (50 000 l) rempli à 50 %
0,1 bar d'augmentation de la pression en 24 heures

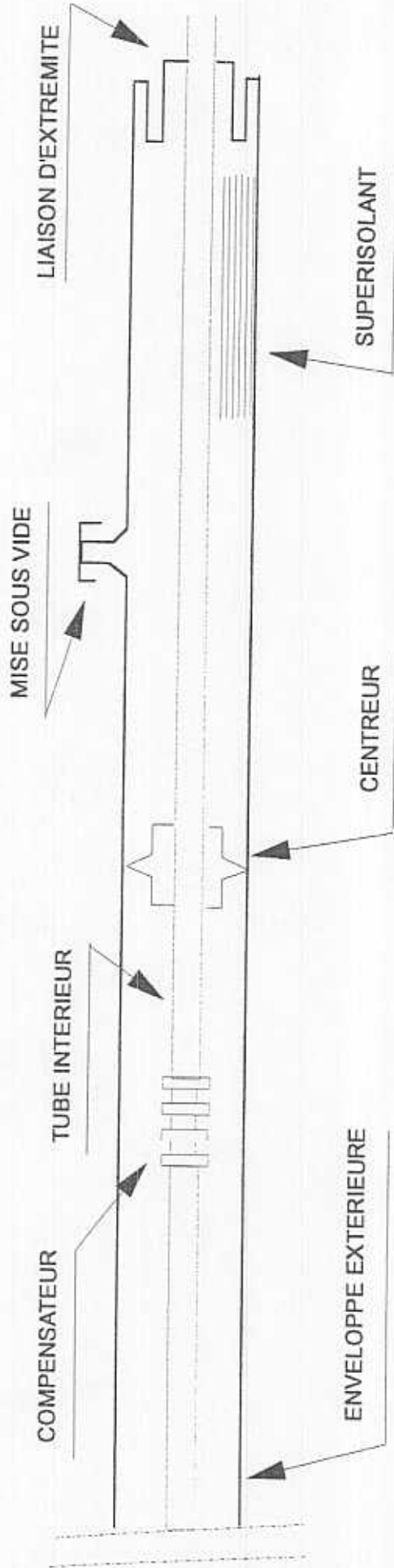
➤ Q	en Kcal / Jour	$Q = 0,1 \times (50\,000 \times 0,205 + 25\,000 \times 1,6)$
➤ ΔP	en bar	$Q = 5\,025 \text{ Kcal / jour}$
➤ V_t	volume total	
➤ V_e	Volume de liquide en litres	

LIGNES DE TRANSFERT AZOTE LIQUIDE

LIGNE ISOLEE P.U.



LIGNE SUPERISOLEE SOUS VIDE.

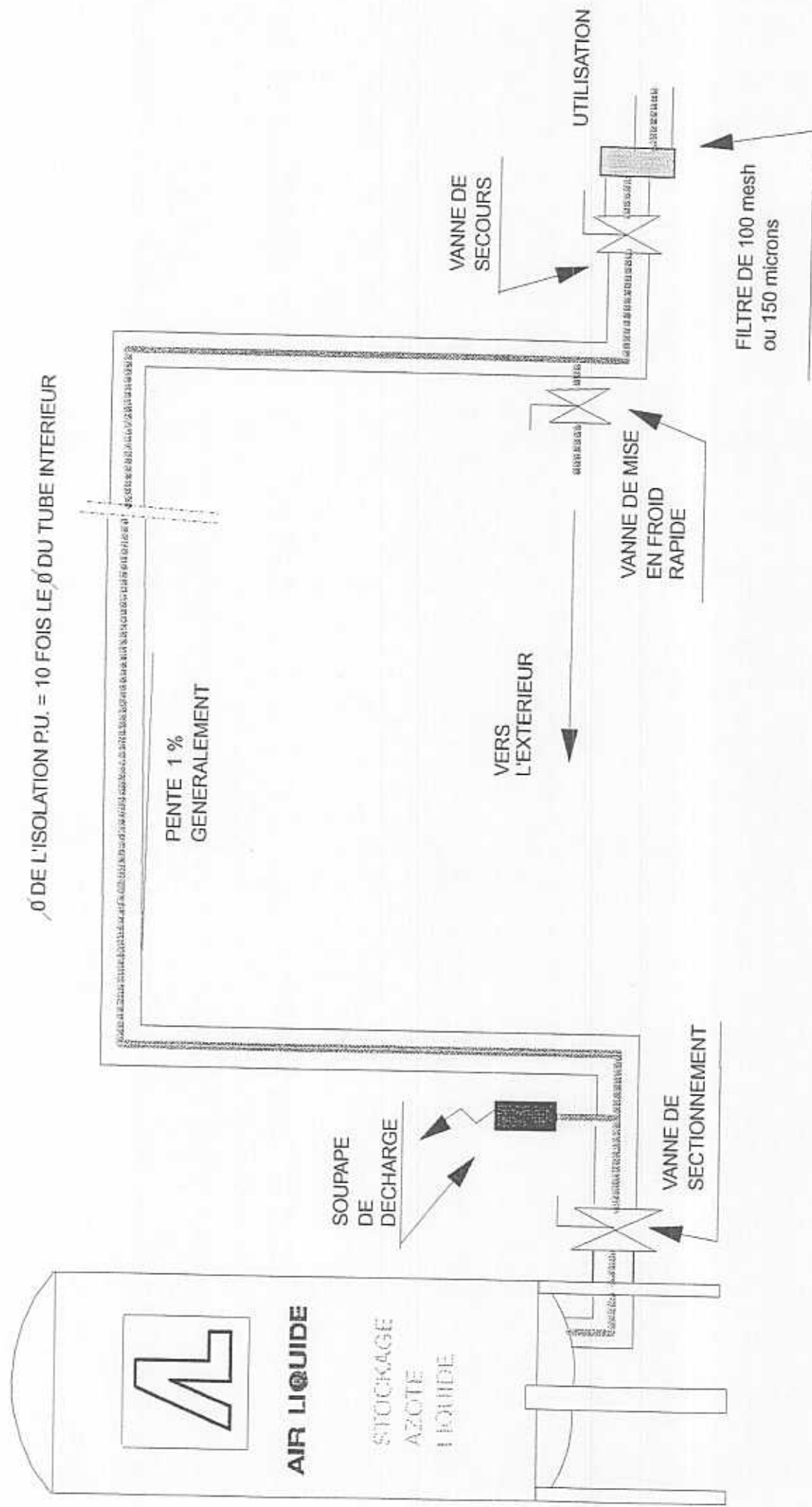


C.E.P.I.A. CRYOGENIE



LIGNE DE TRANSFERT D'AZOTE LIQUIDE

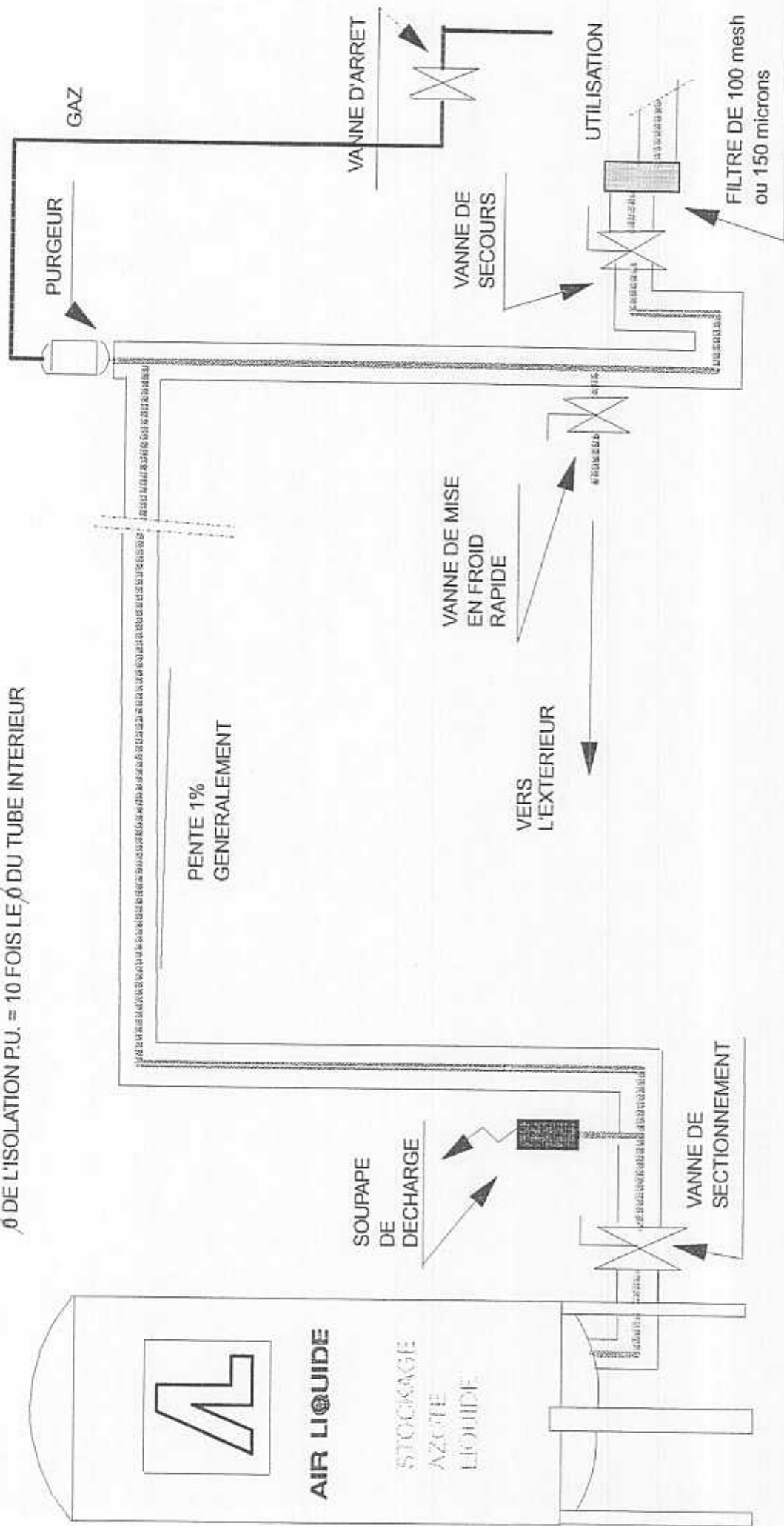
CAS GENERAL



LIGNE DE TRANSFERT D'AZOTE LIQUIDE

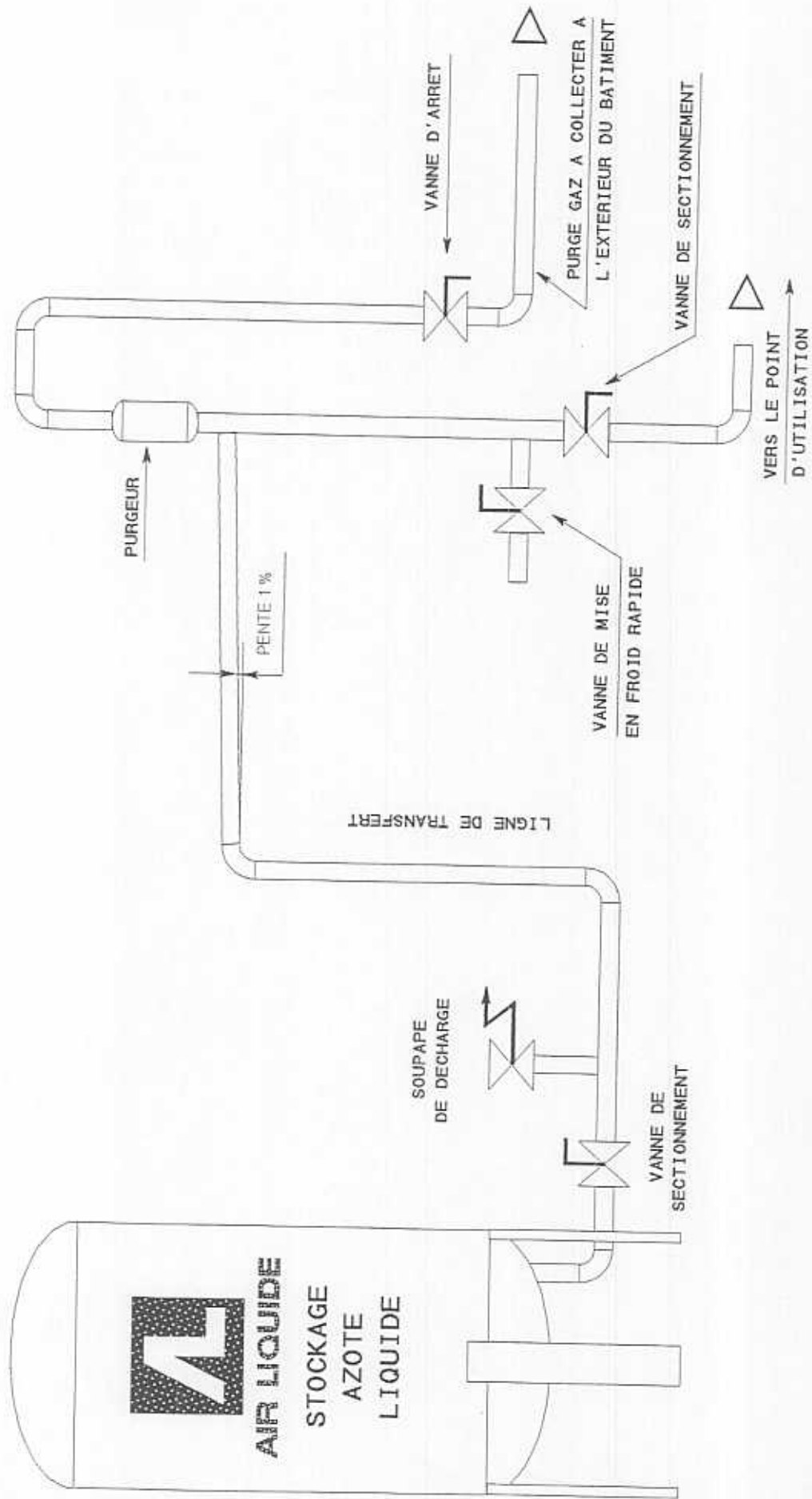
DEBIT < 300 l/h

ϕ DE L'ISOLATION P.U. = 10 FOIS LE ϕ DU TUBE INTERIEUR

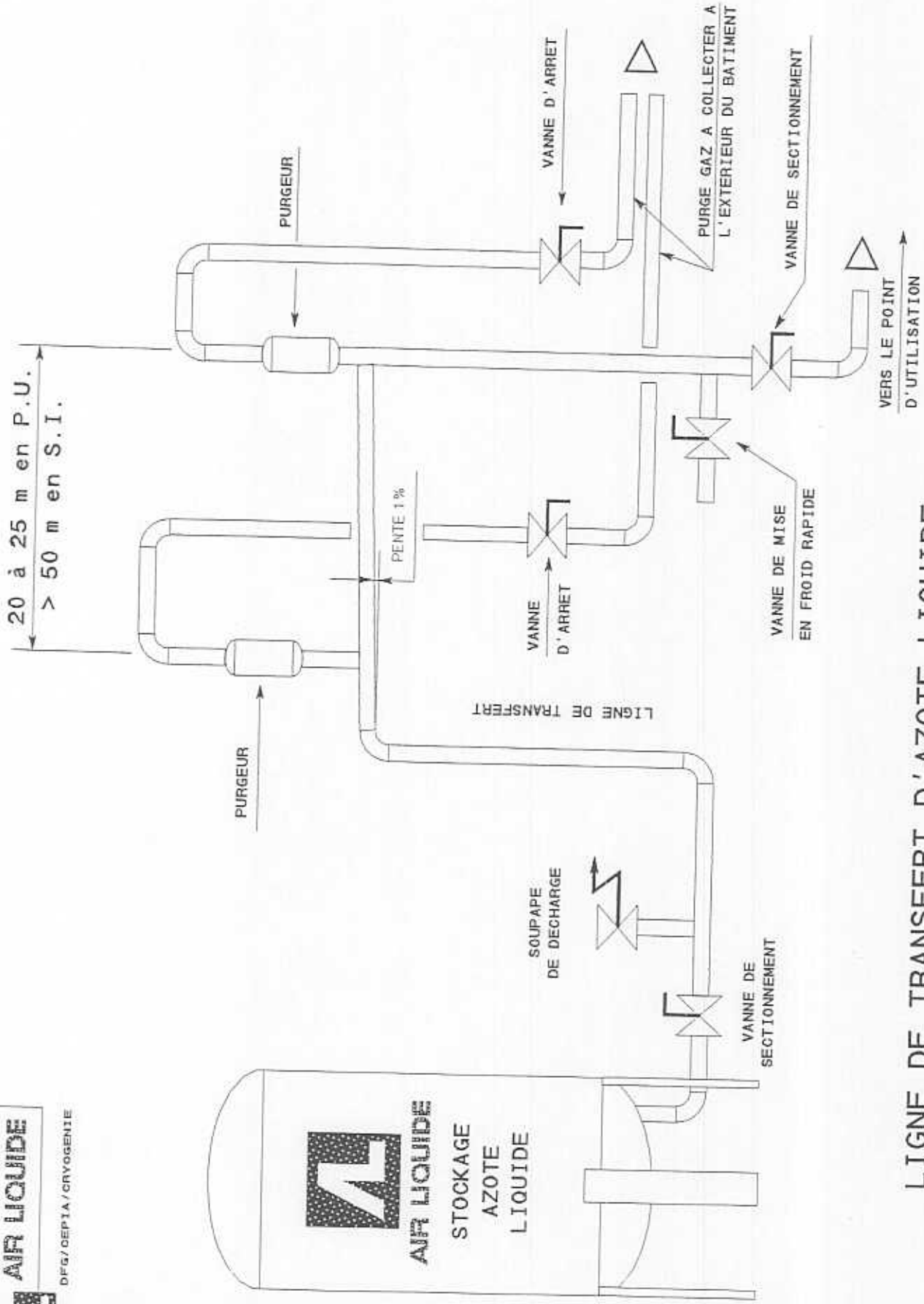


C.E.P.I.A. / CRYOGENIE

AIR LIQUIDE



LIGNE DE TRANSFERT D'AZOTE LIQUIDE
 LIGNE > 20 m - DEBIT > 300 l/h



LIGNE DE TRANSFERT D'AZOTE LIQUIDE
 LIGNE > 20 m - DEBIT < 300 l/h

REALISATION DES LIGNES AZOTE LIQUIDE

DISPOSITIONS GENERALES : STOCKAGE - LIGNE - UTILISATION

STOCKAGES

Stockage horizontal

Avantages :

- moins de variation de la colonne de liquide
- nécessaire au dessus de 50 000 litres

Inconvénients :

- plus cher
- plus encombrant au sol

Stockage vertical

Avantages :

- les plus fréquents, plus classiques
- moins de place au sol

Inconvénients

- variation de la colonne de liquide
- limité à 50 000 litres

Un stockage placé au dessus de l'utilisation est toujours favorable, car on bénéficie de la pression statique du liquide. Le liquide reste monophasique. Il faut absolument éviter les utilisations en cave (sécurité).

EN CAS DE PROBLEME PARTICULIER CONSULTER LE SERVICE SECURITE

Inversement une utilisation au dessus du niveau du stockage est défavorable, car la pression du stockage doit être majorée pour vaincre la colonne de liquide : 0,8 bar pour 10 mètres de différence de niveau, ceci donne une vaporisation supplémentaire de 3,5 % (voir le diagramme) d'ou une perte de rendement non négligeable.

LIGNES

La ligne peut être : soit en caniveau, soit aérienne (la plus fréquente) il faut éviter les points bas d'où on ne peut purger le liquide. Les lignes doivent être ascendantes vers l'utilisation pente 1 %. Pour les lignes ramifiées, prévoir un bouchon gazeux sur les tronçons non utilisés (piquage vers le haut, ou pente ascendante de chaque tronçon).

ACCESSOIRES DE LIGNE

Soupapes

Sur chaque tronçon de tuyauterie fermée par un vanne, une électrovanne ou tout système de fermeture.

Vannes

Une vanne cryogénique doit être montée à proximité de chaque appareil d'utilisation. Cette vanne doit être toujours ouverte, elle n'est là que par sécurité pour arrêter l'azote liquide en cas de fuite. Après chaque utilisation l'azote liquide doit être fermé au réservoir.

Une vanne manuelle ou automatique de mise en froid rapide est à conseiller dès que la canalisation est d'une longueur supérieure à 15 mètres. Fournisseur AIR LIQUIDE.

Purgeur ARMSTRONG

Celui-ci est à conseiller pour le maintien en froid des lignes de petits débits (débit inférieur à 300 litres / h) et dans tous les cas où l'azote liquide doit arriver immédiatement dès l'ouverture de l'électrovanne, dans ce cas des précautions sont à prendre pour éviter un fort givrage de celle-ci (montage sur siphon).

Réservoirs tampon

sous pression ou à pression atmosphérique, au niveau ou en charge. Ce matériel offre des avantages mais est réservé aux installations un peu sophistiquées: petit débit, doses régulières etc.

Régulateur de pression

Pour monter une régulation de pression du stockage (utilisation de l'azote liquide en pulvérisation directe) Le régulateur de pression doit être monté sur la phase liquide du réservoir type de pressostat : GEORGIN précision 0,05 bar. Les détendeurs ne sont pas suffisamment précis, et leur utilisation sur la phase gazeuse entraîne des variations de pression dues à la colonne de liquide.

Filtre

Nécessaire modèle SPRAYING SYSTEMS CO TW tamis 100 mesh (150 microns) taille adaptée à la ligne 1 / 2" à 2 / 1 / 2" généralement 1".

ÉCOULEMENT DE L'AZOTE LIQUIDE DANS UNE CANALISATION

L'écoulement monophasique ou "liquide franc" ne peut être obtenu que par une pompe ou par une mise en pression rapide du réservoir. L'écoulement dans une canalisation sera en règle générale diphasique, du fait de la détente (perte de charge) et des entrées de chaleur.

CALCUL DES ENTREES DE CHALEUR DANS UNE CANALISATION

Calcul valable pour une pression du stockage de 1,5 bar relatif

Par détente pour une perte de charge de 0,2 bar on vaporise 1 % de liquide.
Par entrées de chaleur : 36 Kcal vaporisent 1 litre N2L

$$\text{Titre \% (masse)} = \frac{\Delta P \text{ bar}}{0,2 \text{ b}} + \frac{\text{entrées de chaleur (Kcal)} \times 100}{36 \times \text{débit en litres / heure}}$$

Ne pas oublier la détente si l'utilisation est plus haute que le stockage.

Exemple : $\Delta P = 0,3$ bar, entrées de chaleur 1 100 Kcal, débit 800 litres / h

$$\frac{0,3}{0,2} + \frac{1\ 100 \times 100}{36 \times 800} = 1,5 + \frac{110\ 000}{28\ 800} = 5,3 \%$$

Evaluation des entrées de chaleur

➤ 1 mètre de ligne PU	18 Kcal / h
➤ 1 mètre de ligne SI	1,8 Kcal / h
➤ 1 mètre de tube 20 X 22 nu	250 Kcal / h
➤ 1 vanne isolée à rallonge	10 Kcal / h
➤ 1 vanne non isolée	100 Kcal / h
➤ 1 mètre de flexible nu	250 Kcal / h
➤ 1 tête de 600 litres ordinaire	300 Kcal / h
➤ 1 tête de 600 litres avec dispositif de soutirage	60 Kcal / h

Longueur de ligne équivalente

Majorer de : forfait de 10 mètres ou

- 0,30 m par coude
- 0,50 m pour un té
- 1,00 m pour la mise en vitesse du liquide (1 m / sec)
- 4,00 à 10 m pour une vanne suivant le type de vanne

Réduction de débit due au diphasique

	Titre %	Débit en diphasique par rapport au liquide franc	Inverse
➤	0	1	1
➤	0,5	0,90	1,11
➤	1	0,80	1,25
➤	2	0,68	1,47
➤	3	0,61	1,64
➤	4	0,56	1,79
➤	5	0,52	1,92
➤	10	0,39	2,56

Détermination du diamètre de la tuyauterie

La perte de charge généralement admissible est de 0,2 bar. On divise 0,2 bar par la longueur en mètre équivalente, on obtient la perte de charge par mètre de ligne. Il faut également tenir compte du diphasique en multipliant le débit souhaité par l'inverse défini ci-dessus, il ne reste plus qu'à choisir le diamètre de la ligne compatible avec le débit fictif.

Débit maximum des lignes

Pour une perte de charge maximum de ΔP 0,2 bar. Débit en litres / heure Vitesse = 1 / m sec.

LIGNE EN POLYURÉTHANE (PU)

diamètre intérieur en mm	LONGUEUR EQUIVALENTE			
	20 mètres	40 mètres	70 mètres	90 mètres
11	170	115*	50*	35*
14	400	240*	160*	110*
20	1 140	670*	465*	360*
23	1 950	1 180	790	660
30	3 600	2 540	1 780	460

Ligne PU * Diphasique toujours supérieur à 5 %

LIGNE SUPERISOLÉE (SI)

LONGUEUR EQUIVALENTE

diamètre intérieur en mm	20 mètres	40 mètres	70 mètres	90 mètres
11	220	155	105	85
14	460	340	250	200
20	1 260	910	675	580
23	2 000	1 470	1 080	965
30	3 640	2 845	2 140	1 850

Remarque :

Dans nos applications, il est recommandé de réaliser les lignes longues en tronçons SI standard droit de 6 m de longueur et de compléter en PU pour les singularités (coudes etc...)

Arrêt et vidange de la ligne

En PU 1 mètre de ligne vaporise 0,5 litre / h et crée 37,5 litres de gaz à l'heure; si la ligne est ascendante le gaz repousse le liquide dans le réservoir et la ligne se vide en 30 secondes. Le reflux au stockage pour une ligne en SI qui a 10 fois moins d'entrée de chaleur se fera en 5 minutes.

L'évaporation de l'azote liquide accumulé en point bas de la ligne se fera :

- pour le PU en 30 à 40 minutes
- pour le SI en 5 à 6 heures

Le gaz formé doit s'échapper par une soupape si la ligne est fermée. Il est utile de purger les points bas, soit par l'utilisation soit par une purge spéciale. Il faut bien entendu les éviter le plus possible à la construction.

Mise en froid de la ligne

Compter 0,50 litre par mètre réel pour toutes les lignes (PU ou SI).

La durée de mise en froid (environ 90 %) est de :

SI 15 mn pour 150 mètres

PU 20 mn pour une longueur de 60 mètres

Dans le cas du PU la mise en froid totale dure 1 heure et occasionne de ce fait une variation du diphasique au début de l'utilisation .

La durée du réchauffage à 90 % est de :

SI 15 heures (ne pas oublier que la ligne comporte des parties PU)

PU 1 heure

Calcul des pertes de tuyauteries isolées

Dégazage

Le débit en gaz des orifices destinés à pulvériser le liquide est 0,15 (en masse) du débit en liquide franc.

Le temps de mise en froid sera estimé ainsi :

$$T (\text{ heure }) = \frac{Q_m}{0,15 \times Q_f}$$

Q_m = Quantité d'azote (litres) pour la mise en froid
 Q_f = débit L / h en fonctionnement monophasique
 ou débit équivalent fictif monophasique

Dégazage manuel ou automatique si le temps est trop long

Comparaison des pertes pour une ligne SI et PU dont la définition est la suivante :

Écoulement horizontal, raccordement au réservoir en isolée PU d'une longueur de 1 mètre et en sortie un flexible également d'un mètre, 2 vannes, 6 coudes à 90°, la perte de charge est inférieure à 0,3 bar.

comparaison pour le DN 25

Longueur en mètres 40 72 110

Débit en litres / h	Isolation	ΔP	Quantité de liquide vaporisée	ΔP	Quantité de liquide vaporisée	ΔP	Quantité de liquide vaporisée
660	PU	0,03	19	0,08	38	0,16	59,4
	SI	0,02	5	0,03	9,5	0,06	12,9
1 260	PU	0,08	25,2	0,2	54	0,4	89,5
	SI	0,05	9,2	0,1	14,7	0,18	26,5

Comparaison pour le DN10

Longueur en mètres 20 30

Débit litres / h	Isolation	ΔP	Quantité de liquide vaporisée	ΔP	Quantité de liquide vaporisée
115	PU	0,06	9,2		
	SI	0,02	1,64		
280	PU			0,3	19
	SI			0,17	5

CARACTERISTIQUES GENERALES : Pression nominale de service 6 bar

Lignes rigides

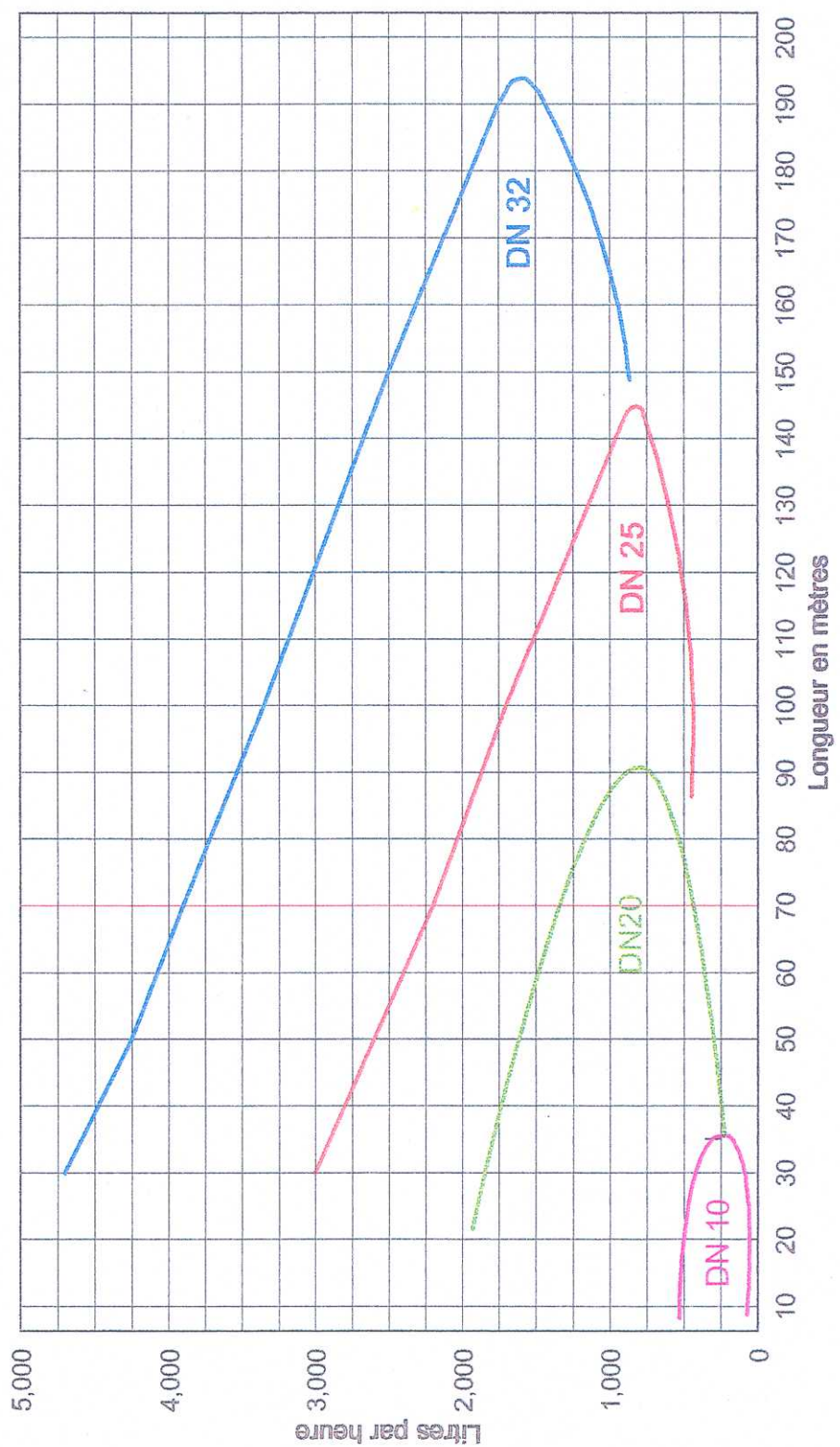
DN	10	20	32	50	80	100
Diamètre intérieur en mm	14	23,7	39,2	57,1	85,7	110,3
Diamètre extérieur en mm	60,3	76,1	88,9	114,3	139,7	168
Performances (W/m)	0,38	0,53	0,73	1	1,4	1,75
Poids Kg/ m	2,9	4,2	5,5	8,5	11,5	15

Lignes souples

DN	10	20	32	50
Diamètre intérieur en mm	14	23,7	39,2	57,1
Diamètre extérieur embouts rigides	60,3	76,1	88,9	114,3
flexibles	66	83,5	98,5	154,5
Performances (w / m)	0,6	0,85	1,2	1,6
Poids Kg / m flexibles isolants	1,2	3,7	4,8	9,2
Rayon de courbure minimale mm	435	550	650	1 250
Longueur minimale m	2,5	2,5	2,5	2,5
Longueur maximale m	20	20	20	20

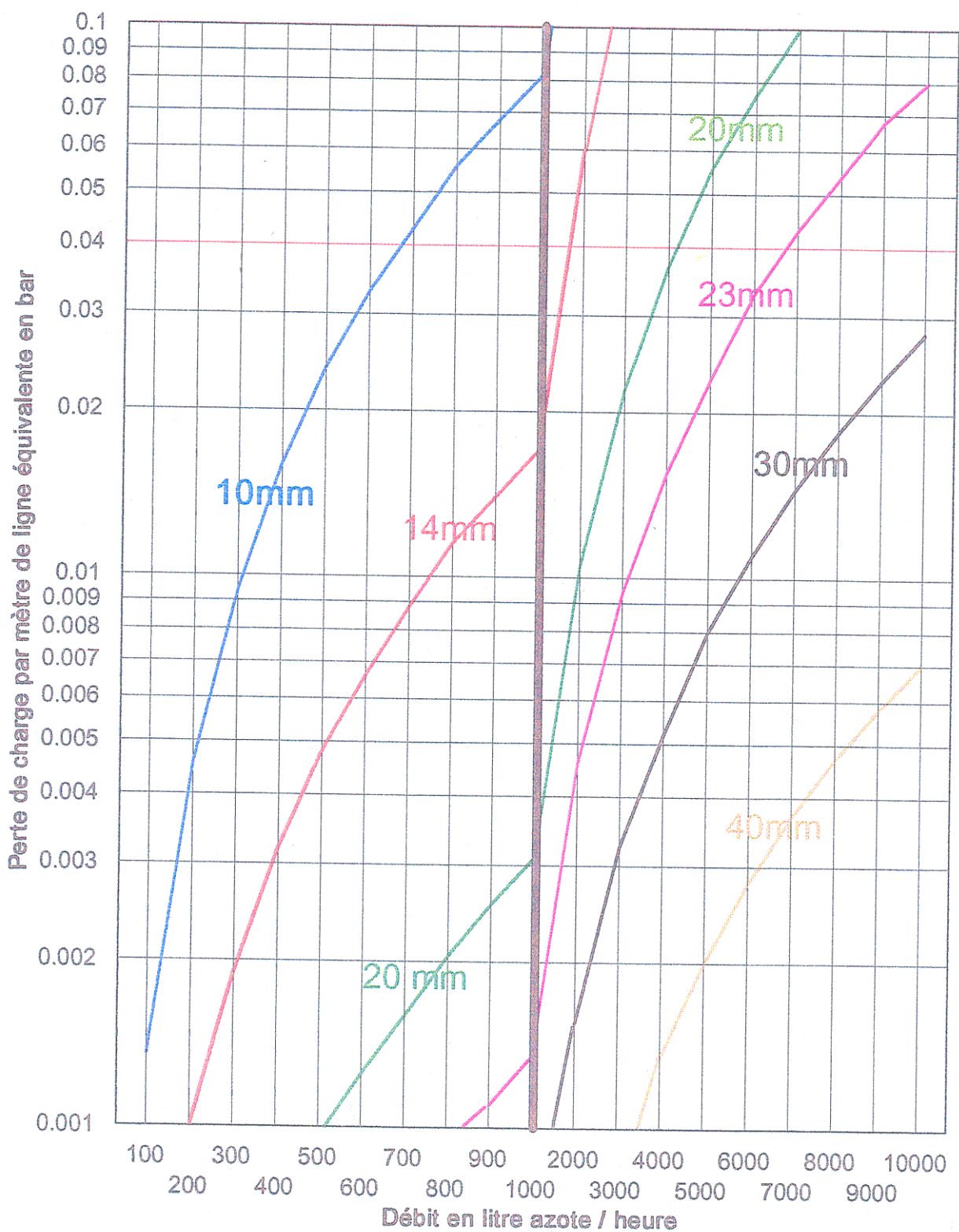
Performances pour des températures froides comprises entre 77 et 90 K (- 196°C et -183°C)
et des températures chaudes de 293 °K (+20°C)

COURBES POUR DETERMINER RAPIDEMENT LE DIAMETRE DES CANALISATIONS EN SUPERISOLEES



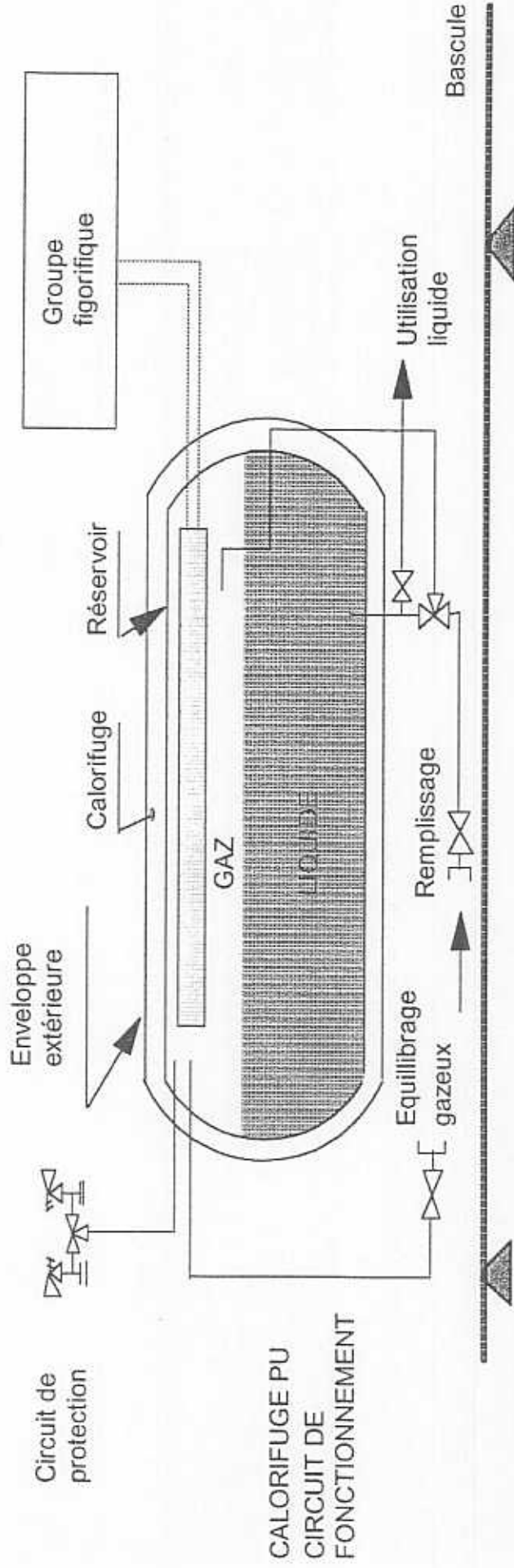
Pertes de charge par mètre de ligne azote liquide franc à 1,5 B

Diamètres intérieurs des canalisations



STOCKAGES

Dioxyde de carbone - 20 °C 19 bar



CALORIFUGE PU CIRCUIT DE FONCTIONNEMENT

CIRCUIT DE REMPLISSAGE

Les véhicules livreurs approvisionnent les réservoirs à l'aide d'un flexible de remplissage liquide et d'un flexible d'équilibrage gaz: la phase gaz est ainsi renvoyée dans le véhicule livreur au fur et à mesure du remplissage

CIRCUIT DE PROTECTION

Si la pression dans la capacité atteint la pression maximale de service, 2 soupapes et 2 disques de rupture assurent la protection de l'appareil. Un robinet d'inversion permet de toujours maintenir en service une soupape et un disque de rupture

CIRCUIT DE REFRIGERATION

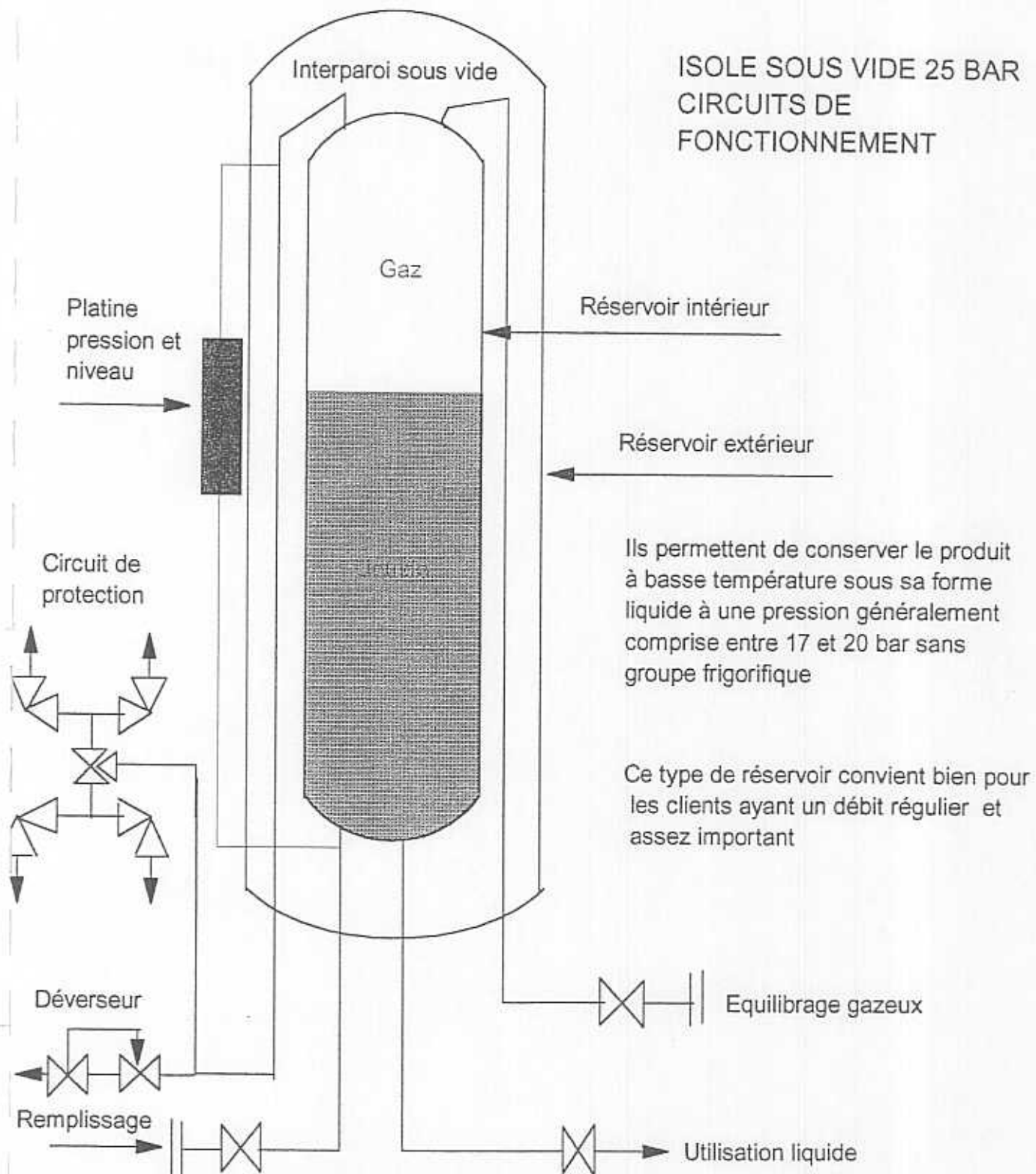
Le maintien de la température du stockage est assuré par le fonctionnement du groupe frigorifique. La reliqufaction de la phase gazeuse de la capacité est obtenue par l'intermédiaire d'un condenseur monté dans la phase gazeuse.

NOTA

Attention pour le montage d'une pompe sur le circuit d'utilisation client, consulter la DTI (Boucle CO2)

STOCKAGES - 20°C 19 bar

Dioxyde de carbone



ISOLE SOUS VIDE 25 BAR
CIRCUITS DE
FONCTIONNEMENT

Ils permettent de conserver le produit à basse température sous sa forme liquide à une pression généralement comprise entre 17 et 20 bar sans groupe frigorifique

Ce type de réservoir convient bien pour les clients ayant un débit régulier et assez important

Les circuits de remplissage et de protection sont identiques au modèle isolé PU

NOTA

Ces réservoirs ne permettent pas le montage d'une pompe sur le circuit d'utilisation client. Il est également possible sous certaines modifications d'adapter au CO2 un évaporateur 15 bar. Pression d'utilisation 13 ou 14 bar - 30 °C

STOCKAGES Dioxyde de carbone (CO2)

Caractéristiques principales des réservoirs horizontaux calorifugés

RESERVOIR	CAPACITE utile (Kg)		PRESSION de service (bar)	POIDS plein (Kg)	HAUTEUR hors tout (m)	LONGUEUR hors tout (m)	DIAMETRE (m)	DEBIT * gaz max. continu (Kg/h)		DEBIT** gaz max. instantané (Kg/h)	
	3 450	20						5 400	2,02	4,62	1,53
3,3 T	8 335	20	12 000	2,565	5,19	2,08	2,08	5,54	260		
15 T	15 040	20	21 500	2,565	8,00	2,08	2,08	8,90	480		
30 T	32 090	20	45 000	3,325	9,04	2,78	2,78	13,80	1 020		
45 T	45 690	20	63 000	3,325	9,04	2,78	2,78	18,70	1 460		
60 T	63 030	20	86 000	3,89	11,74	3,28	3,28	22,00	2 010		

**Réservoir : 18,7 bar, température - 20 ° C
Température extérieure : 15 ° C

**Réservoir rempli à 30 % de sa capacité
Chiffres doublés si réservoir rempli à 50 % de sa capacité

**Réservoir plein à 90 %
Pression d'utilisation 11,5 bar
Durée du soulfrage de deux heures

Le débit maximal en soulfrage liquide est le même pour tous les réservoirs, car équipés de la même sortie diamètre 1,1/2" pour la tuyauterie. Débit ~10 000 l/heure sous forme liquide, correspondant à une vitesse de 2,50 m/seconde dans la tuyauterie

Caractéristiques principales des réservoirs verticaux isolés sous vide type RCV

RESERVOIR	VOLUME total (l)	CAPACITE utile (l)		CHARGE CO2 (Kg)	DEBIT max. (Kg/h)	POIDS vide (Kg)	POIDS plein (Kg)	DIAMETRE en (mm)	HAUTEUR en (mm)
		1	2						
RCV 3,3	3 230	3 070	3 230	120	3 500	6 730	1 600	4 380	
RCV 7,7	7 660	7 280	7 660	120	7 340	15 000	1 900	6 200	
RCV 16	15 800	15 000	15 800	400	11 500	27 300	2 200	7 750	
RCV 32	32 000	30 400	32 000	400	22 100	54 100	2 840	8 720	

1 : Capacité à la jauge de trop plein
2 : Masse spécifique du CO2 sous 16 bar = 1,053 Kg / l

3 : Débit maximal de soulfrage permis par le réchauffeur électrique tout en maintenant une pression de 16 bar dans le réservoir

REALISATION DES LIGNES : DIOXYDE DE CARBONE (CO₂)

DISPOSITIONS GENERALES : STOCKAGES - LIGNES - UTILISATION

STOCKAGES

Stockage horizontal calorifugé PU

Avantages :

- nécessaire au dessus de 30 tonnes
- a toujours un groupe frigorifique, ce qui évite les pertes de liquide cryogénique lors d'utilisation uniquement en liquide
- réservoir sur pesons d'où un contrôle aisé des consommations journalières

Inconvénients :

- plus encombrant au sol
- maintenance du groupe frigorifique
- bruit du groupe frigorifique principalement la nuit

Stockage vertical isolé sous vide

Avantages :

- moins de place au sol
- moins de maintenance (en général pas de groupe frigorifique)

Inconvénients :

- limité à 30 tonnes
- sans groupe frigorifique, pertes de liquide cryogénique si utilisation faible ou irrégulière

Un stockage placé au dessus de l'utilisation est toujours favorable (liquide sous refroidi) mais jamais d'utilisation au dessous de la surface du sol = SECURITE ou règles très strictes d'utilisation (forte ventilation, analyseur etc..)

EN CAS DE PROBLEME PARTICULIER CONSULTER LE SERVICE SECURITE

Inversement une utilisation au dessus du stockage entraîne une détente du liquide : une élévation de 10 m de hauteur du CO₂ liquide réduit sa pression de 1 bar et vaporise 1,28 % en masse pour le - 20 °C / 20 bar et 2 % pour le - 45 °C / 8 bar (ceci donne un diphasique)

LIGNES

La ligne peut être : soit en caniveau (ventilé), soit aérienne (la plus fréquente) il faut éviter les points bas d'où on ne peut purger le liquide. Les lignes doivent être ascendantes vers l'utilisation pente 1 % pour favoriser le reflux du liquide au réservoir. Pour les lignes ramifiées, prévoir un bouchon gazeux sur les lignes non utilisées, piquage vers le haut, pente ascendante de chaque tronçon.

ACCESSOIRES DE LIGNE

Soupapes

Sur chaque tronçon isolé par des vannes, une électrovanne ou tout système de fermeture où le liquide peut être emprisonné. Collecter les purges et sorties de soupapes pour les rejeter à l'extérieur.

Vannes

Une vanne cryogénique doit être montée à proximité de chaque appareil d'utilisation. Cette vanne doit toujours être ouverte, elle n'est là que par sécurité pour arrêter le CO₂ liquide en cas de fuite. Après chaque utilisation le CO₂ liquide doit être fermé au réservoir.

Purgeur ARMSTRONG

Celui-ci est à conseiller pour le maintien en froid des lignes de petits débits (débit inférieur à 100 Kg / h) et dans tous les cas le CO₂ doit arriver immédiatement dès l'ouverture de l'électrovanne, dans ce cas des précautions sont à prendre pour éviter un fort givrage de celle-ci (montage sur siphon)

Filtre

Nécessaire modèle SPRAYING SYSTEMS 9830 3/4" TW tamis 100 mesh (150 microns) taille adaptée à la ligne 1/2" ou 1"

ÉCOULEMENT DE CO₂ LIQUIDE DANS UNE CANALISATION

L'écoulement monophasique ou "liquide franc" ne peut être obtenu que par une pompe ou par une mise en surpression du réservoir. L'écoulement dans une canalisation sera en règle générale diphasique, du fait de la détente (perte de charge) et des entrées de chaleur. Ce phénomène est moins sensible que pour l'azote liquide.

CALCUL DES ENTREES DE CHALEUR DANS UNE CANALISATION (Cas des lignes simples, les boucles relèvent d'une étude spéciale)

Par détente : une perte de charge de 0,5 bar vaporise 0,64 %
par entrées de chaleur : 68 Kcal vaporise 1 Kg de CO₂ liquide

$$\text{Titre \% masse} = 1,28 \times \Delta P \text{ (bar)} + \frac{\text{entrées de chaleur en Kcal / h}}{68 \times \text{débit de CO}_2 \text{ en Kg / h}}$$

Ne pas oublier la détente si l'utilisation est plus haute que le stockage

Exemple : $\Delta p = 0,6$ bar , entrée de chaleur 800 Kcal débit 500 Kg / h

$$1,28 \times 0,6 + \frac{800}{68 \times 500} = 0,8 \%$$

Evaluation des entrées de chaleur

➤ 1 mètre de flexible courant non isolé	36 Kcal / h
➤ 1 mètre de ligne PU int. 20 mm ext. 150 mm	4 Kcal / h
➤ 1 mètre de ligne PU int. 20 mm ext. 100 mm	5 Kcal / h
➤ 1 mètre de ligne ARMAFLEX épaisseur 30 mm	6,5 Kcal / h
➤ 1 vanne non isolée	15 Kcal / h

Longueur de ligne équivalente

Compter une longueur supplémentaire forfaitaire de 10 mètres ou compter :

- 0,30 mètre pour un coude
- 0,50 mètre pour un té
- 1 mètre pour la mise en vitesse du liquide
- 4 à 10 mètres pour une vanne

Réduction du débit due au diphasique
(diphasique à 20 bar)

	Titre % masse	Débit en diphasique rapport au liquide franc	Inverse
▼	0	1	1
▼	1	0,95	1,05
▼	2	0,90	1,11
▼	3	0,85	1,18
▼	5	0,75	1,33
▼	10	0,59	1,70

Perte de charge en ligne en fonction du débit : multiplier le débit réel par l'inverse ci-dessus, reporter dans l'abaque $\Delta P / m$ - débit des tuyauteries de différents diamètres, multiplier par la longueur équivalente.

Détermination du diamètre de la tuyauterie

Admettre une perte de charge totale de 0,5 bar par exemple, diviser par la longueur équivalente, reporter dans l'abaque en correspondance avec le débit réel multiplié par l'inverse ci-dessus pour tenir compte du diamètre, prendre le diamètre supérieur.

Débit maximum des lignes

Pour une perte de charge maximum de ΔP 0,5 bar. Débit en Kg / h de CO₂. Entrée de chaleur 5 Kcal / h / m

LONGUEUR DE LIGNE EQUIVALENTE

diamètre intérieur en mm	20 mètres	40 mètres	70 mètres	90 mètres
8	210	130	80 *	50 *
10	450	290	200	156 *
14	1 260	830	570	490
20	2 900	1 940	1 370	1 175
30	8 250	5 530	4 070	3 470

* Diphasique toujours supérieur à 5 %

Mise en froid des lignes PU

On met en froid immédiatement le tube intérieur, puis la moitié environ de l'isolation, progressivement, de l'ambiante à la température du fluide.

Valeurs pour le CO₂

chaleur par mètre et poids CO₂ vaporisé

tube	diamètre isolation	CO ₂ - 20 °C / 20 b		CO ₂ - 29 °C / 12 b		CO ₂ - 45°C / 8 b	
		Kcal / m	Kg CO ₂ / m	Kcal / m	Kg CO ₂ / m	Kcal / m	Kg CO ₂ / m
16 X 18	100	4,6	0,07	5,6	0,08	7,5	0,09
20 X 22	150	8,3	0,12	10,1	0,14	13,5	0,17
20 X 25	150	12,3	0,18	15	0,21	20	0,25
25 X 30	200	20	0,29	24,5	0,34	32,5	0,4

On note l'intérêt des tubes minces, qui doivent être compatibles avec les sollicitations mécaniques (pression, vibrations...)

Temps approximatif de mise en froid

Le débit en gaz est 0,22 du débit instantané d'utilisation en liquide franc (arrondi à 0,2)

$$\text{Temps en minutes} = \frac{Q_m \times 60}{0,2 \times Q_f}$$

➤ Q_m = quantité de CO₂ pour la mise en froid (vaporisé en Kg)

➤ Q_f = débit instantané d'utilisation en liquide franc (en Kg / heure)

Exemple :

Longueur de la canalisation 45 mètres

$$Q_m = 0,18 \text{ Kg CO}_2 / \text{m} \times 45 \text{ mètres} = 8,1 \text{ Kg}$$

$$Q_f = 250 \text{ Kg / heure}$$

$$\text{Temps en minutes} = \frac{8,1 \text{ Kg} \times 60}{0,2 \times 250 \text{ Kg}} = 9 \text{ minutes } 72 / 100$$

Temps de mise en froid en minutes CO₂ - 20°C / 20 bar, ligne vaporisant 0,15 Kg / m pour la mise en froid.

Débit instantané Kg / heure		Longueur de ligne en mètres			
		Temps en minutes			
en liquide franc	en diphasique 3 %	30 m	60 m	90 m	120 m
200	150	6,75	13,5	20,2	27
500	375	2,7	5,4	8,1	10,8
1 000	750	1,35	2,7	4	5,4
1 500	1 125	0,9	1,8	2,7	3,6
2 000	1 500	0,7	1,4	2	2,7
3 000	2 250	0,5	0,9	1,4	1,8
4 000	3 000	0,3	0,7	1	1,4

Temps en CO₂ - 29 °C / 15 bar = multiplier par 1,2
 - 45 °C / 8 bar = multiplier par 1,4

Remarques.

Un purgeur est valable pour le dégazage, mais ne facilite que faiblement la mise en froid, il faut contrôler le débit de gaz qu'il est susceptible d'évacuer.

En cas de temps trop long prévoir un dégazage manuel ou automatique

Remise en froid après arrêt de 10 minutes = 0,15 à 0,20 du temps nécessaire à la mise en froid complète; prévoir un purgeur tous les 30 mètres de ligne, en partie haute et à l'utilisation si une arrivée immédiate de liquide est nécessaire.

Arrêt des installations

reflux au stockage dans une ligne ascendante vers l'utilisation, la vaporisation par entrée de chaleur fait refluer le liquide au stockage environ :

- 6' pour le CO₂ - 45 °C / 8 bar
- 11' pour le CO₂ - 29 °C / 15 bar
- 16' pour le CO₂ - 20 °C / 20 bar

La vaporisation du liquide restant dans les points bas de la ligne se fait en un temps long de 4 à 6 heures

Deux dispositions différentes en cas d'arrêt

Maintien en pression ou dépressurisation de la ligne. Dans tous les cas les sorties des éventuels purgeurs automatiques doivent être fermées (pour éviter la formation de neige soit dans le purgeur soit dans la ligne).

➤ 1) Maintien en pression de la ligne

Fermer la sortie gaz des éventuels purgeurs automatiques pour que la ligne reflue dans le réservoir, le liquide accumulé dans les points bas se vaporise et le gaz reflue au stockage, les soupapes ne fonctionnant pas.

Inconvénients :

Risque de fuites au niveau de l'utilisation, prévoir un tronçon purgé du liquide et mise en communication avec l'extérieur.

Risque en cas de rupture accidentelle de la ligne.

Disposition possible : maintien en pression de la ligne et fermeture de la vanne de liquide sortie du réservoir , by-pass de la vanne de liquide avec clapet antiretour permettant le reflux du gaz au réservoir.

Inconvénient :

Clapet antiretour pas toujours étanche. Il est toujours préférable de simplifier au maximum les installations.

➤ 2) dépressurisation de la ligne

Attendre le reflux du liquide au réservoir. Purger les points bas de leur liquide.

Inconvénient :

Lors de la remise en service, il sera nécessaire de pressuriser en gaz la ligne à partir de la phase gaz de la citerne.

Variation de la pression dans le cas de soutirage rapide d'un réservoir

CO₂ - 20 °C 20 bar (absolu)

Plein 1/1	Pression 20 bar	T°C - 20 °C	Débit 100 %	Q X Δ H = 100*
1/2	18 bar	- 23 °C	94 %	97
1/4	15,2 bar	- 28 °C	84 %	90
Vide 0	13 bar	- 33,5	76 %	83

* Q = débit d'un orifice donné

Δ H = Enthalpie

CO₂ - 45 °C 8 bar

La variation de pression est plus faible mais comme le point triple est proche, il sera bon de prévoir un vaporiseur annexe pour maintenir la pression du réservoir en cas de vidange de plus de 50 %

Plein 1/1 pression 8 bar

1/2 7,2 bar

1/4 6,6 bar

Vide 0 5,8 bar

Conclusion :

Le soutirage rapide de liquide n'amène pas la pression sous le point triple, mais on risque de faire de la neige dans les équipements aval. Il est nécessaire de maintenir la pression

LIGNE DE TRANSFERT DE DIOXYDE DE CARBONE

VANNE D'ARRÊT OBLIGATOIRE
SUR L'ÉVENT DU PURGEUR

INSTALLATION LIGNE SIMPLE

PURGEUR
ÉVENTUEL

Ø DE L'ISOLATION
(voir le tableau)

LIAISON GAZ / LIQUIDE POUR
PRESSURISATION DE LA
LIGNE AVANT LA MISE
EN SERVICE

VANNE DE
SECTIONNEMENT

VANNE
UTILISATION

SOUPAPE

LIGNE ASCENDANTE
1 %

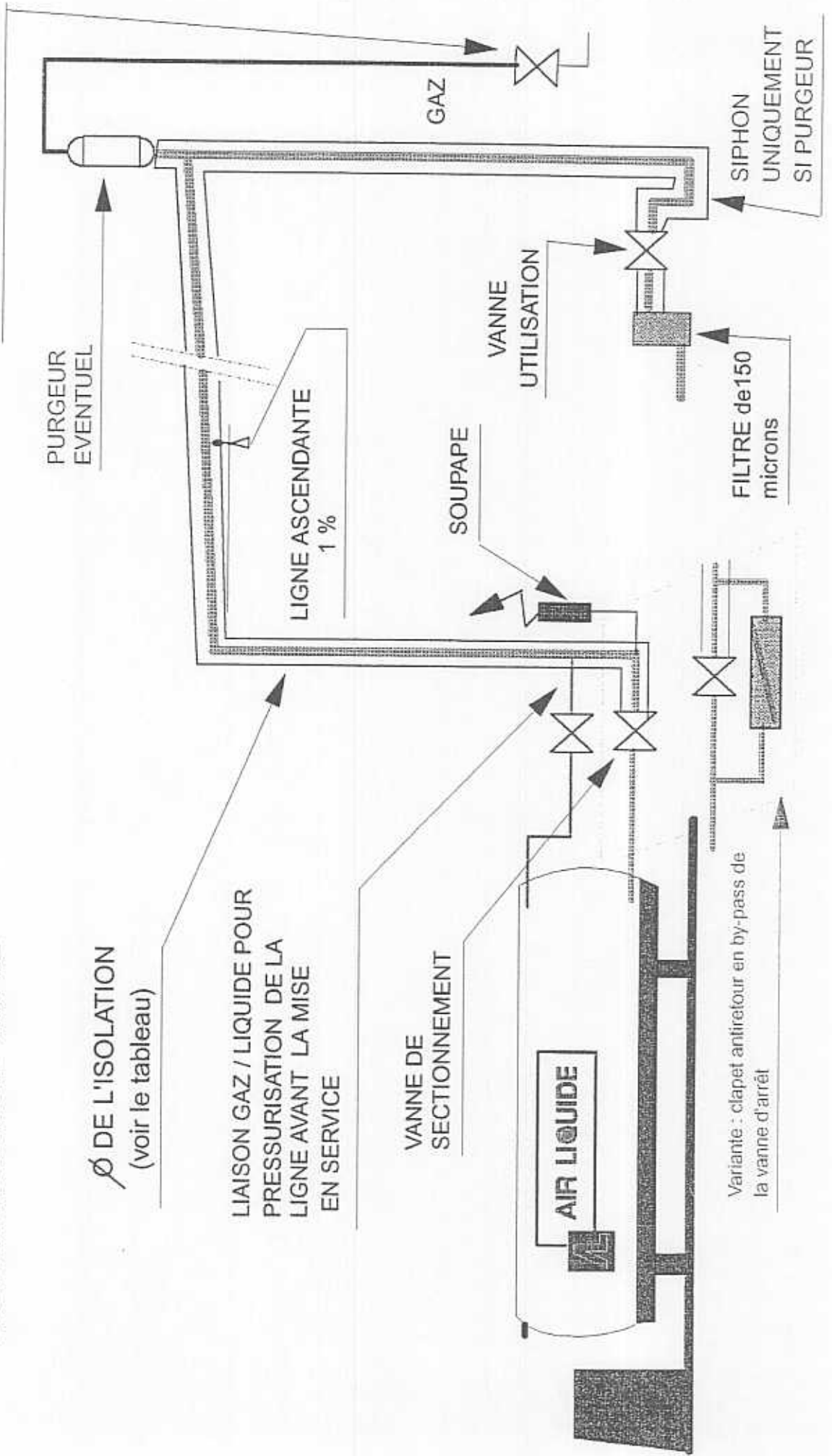
GAZ

SIPHON
UNIQUEMENT
SI PURGEUR

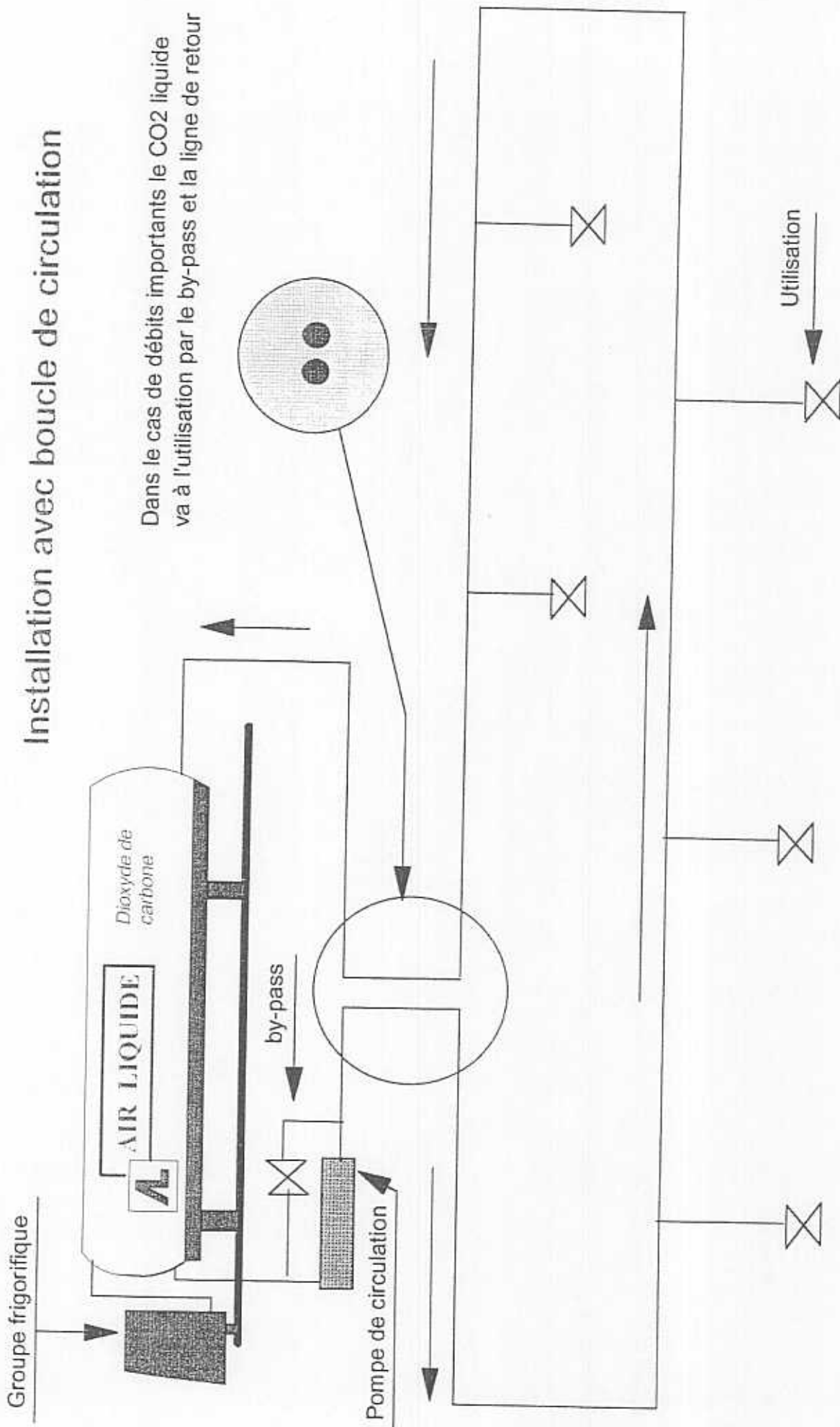
FILTRE de 150
microns

AIR LIQUIDE

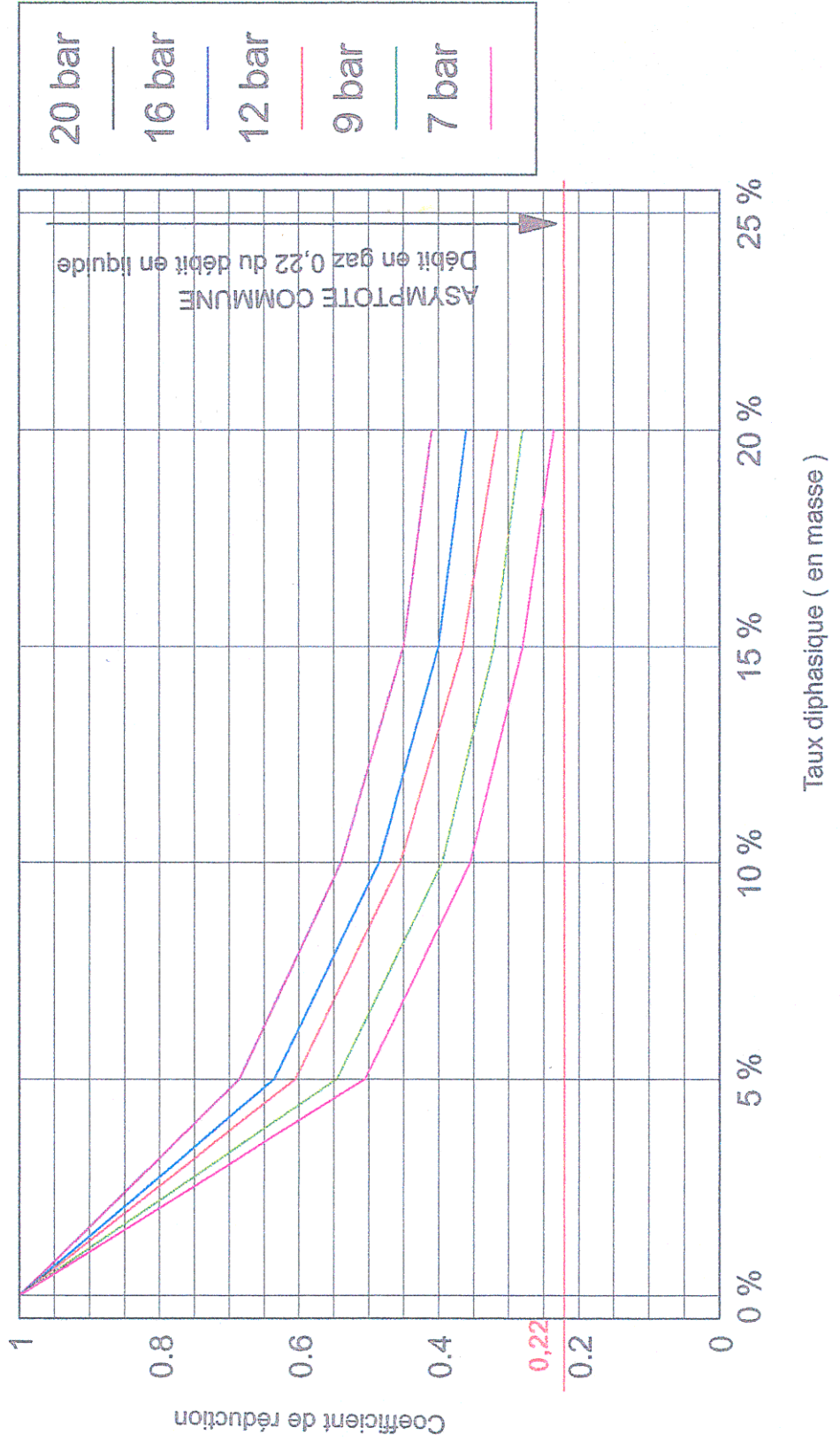
Variante : clapet antiretour en by-pass de
la vanne d'arrêt



LIGNE DE TRANSFERT DE DIOXYDE DE CARBONE



COEFFICIENT DE REDUCTION DE DEBIT PAR RAPPORT AU DEBIT EN LIQUIDE FRANC





AIR LIQUIDE

Les
applications

AIR LIQUIDE



EXTRUSION-SOUFFLAGE

PRINCIPE.

L'EXTRUSION-SOUFFLAGE PERMET LA FABRICATION DE CORPS CREUX EN PLASTIQUE (BOUTEILLES, BIDONS, FUTS, RESERVOIRS DE VOITURES, ETC...).

POUR LES PIECES AYANT UNE FORTE EPAISSEUR, COMME LES RESERVOIRS DE VOITURE PAR EXEMPLE, LE TEMPS DE REFROIDISSEMENT EST TRES LONG, LE PLASTIQUE ETANT MAUVAIS CONDUCTEUR.

LE PROCEDE ALEX AUGMENTE LA VITESSE DE REFROIDISSEMENT EN INJECTANT DE L'AIR REFROIDI A L'INTERIEUR DU CORPS CREUX PENDANT LA FABRICATION DE LA PIECE.

CONSOMMATIONS

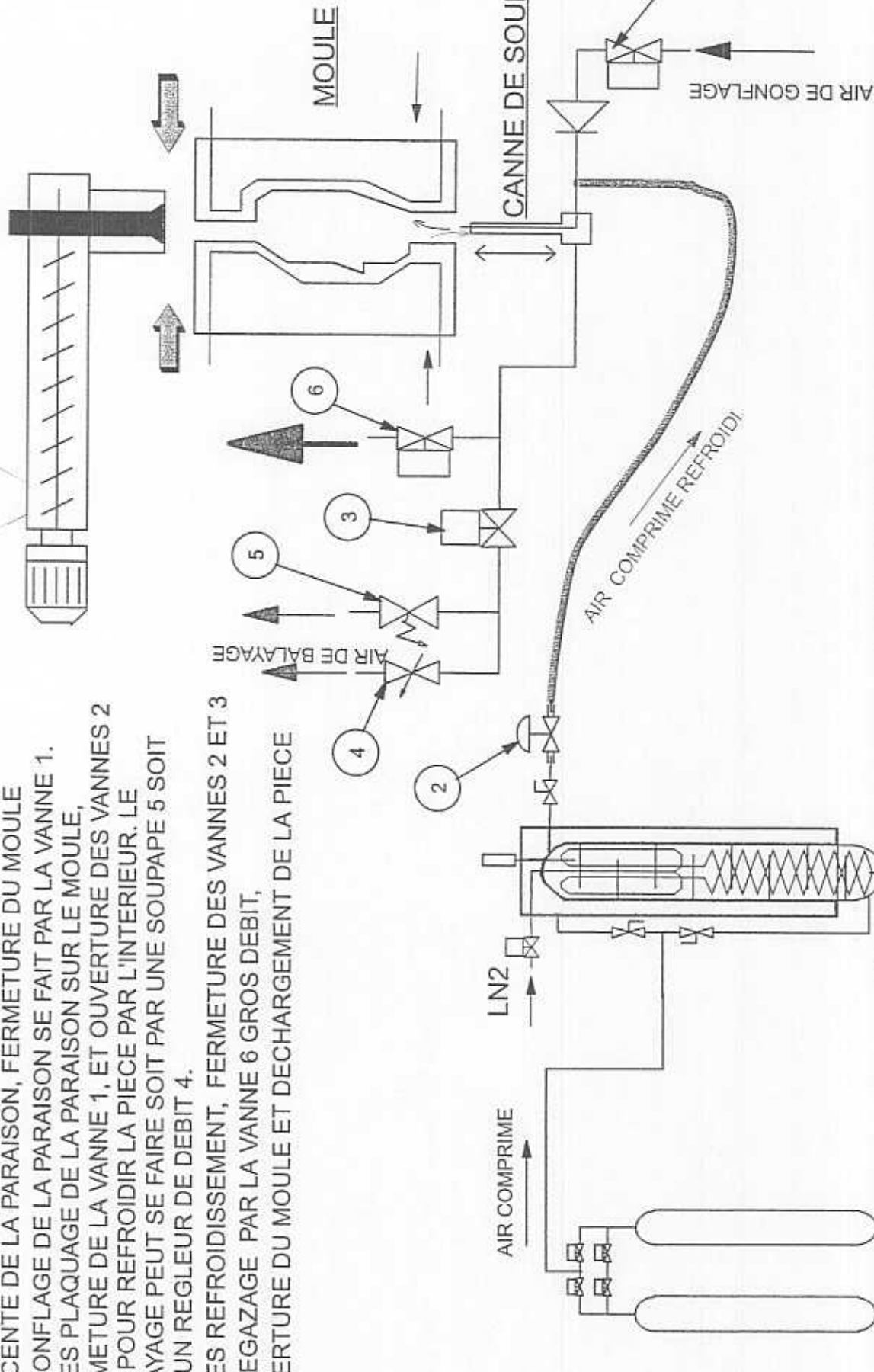
LES CONSOMMATIONS D'AZOTE SONT DE L'ORDRE DE 0.4 LITRES DE LN2 / KG DE PIECE.

CYCLE DE FABRICATION

DESCENTE DE LA PARAISSON, FERMETURE DU MOULE
LE GONFLAGE DE LA PARAISSON SE FAIT PAR LA VANNE 1.
APRES PLACAGE DE LA PARAISSON SUR LE MOULE,
FERMETURE DE LA VANNE 1, ET OUVERTURE DES VANNES 2
ET 3 POUR REFROIDIR LA PIECE PAR L'INTERIEUR. LE
BALAYAGE PEUT SE FAIRE SOIT PAR UNE SOUPEPE 5 SOIT
PAR UN REGLEUR DE DEBIT 4.

APRES REFROIDISSEMENT, FERMETURE DES VANNES 2 ET 3
ET DEGASAGE PAR LA VANNE 6 GROS DEBIT,
OUVERTURE DU MOULE ET DECHARGEMENT DE LA PIECE

VIS D'EXTRUSION



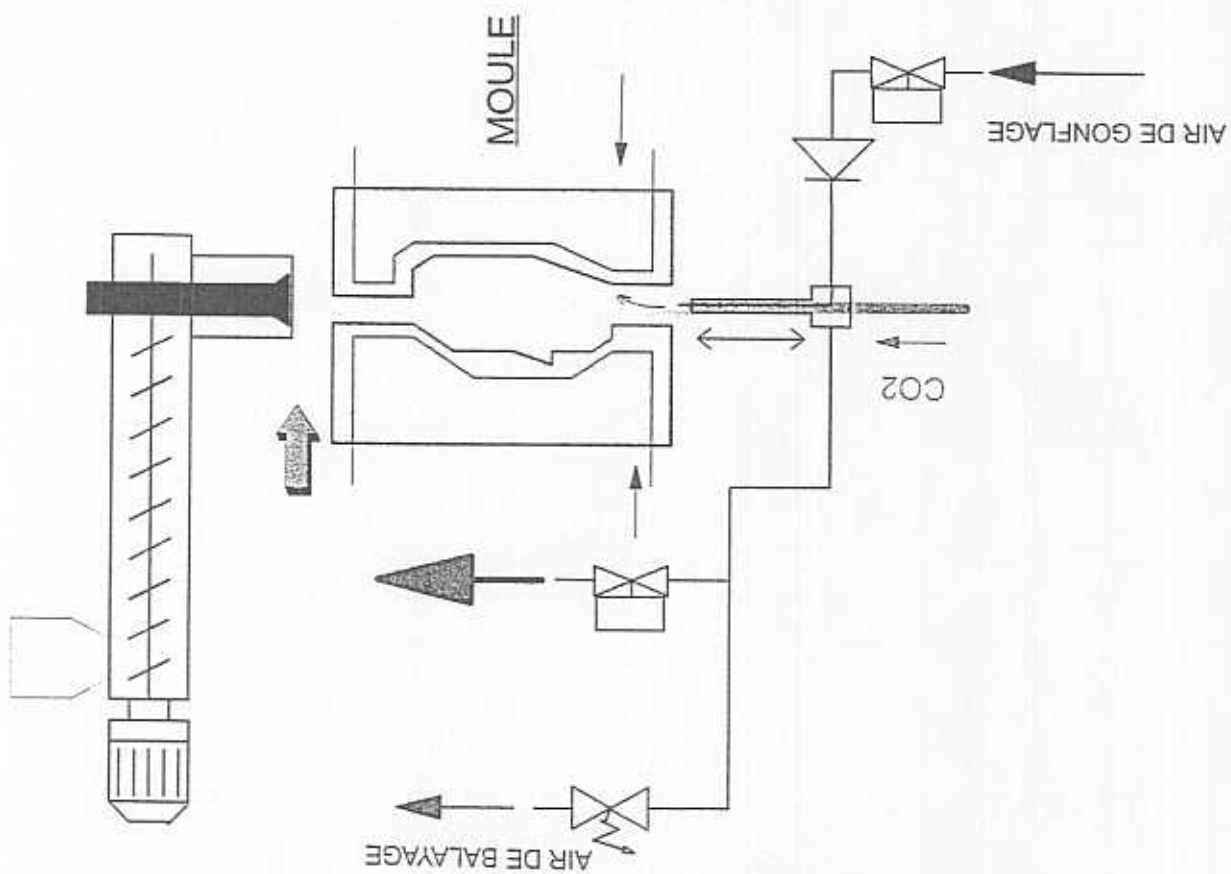
EXTRUSION SOUFFLAGE PAR LE PROCEDE ALEX

REFROIDISSEUR D'AIR

SECHEUR D'AIR

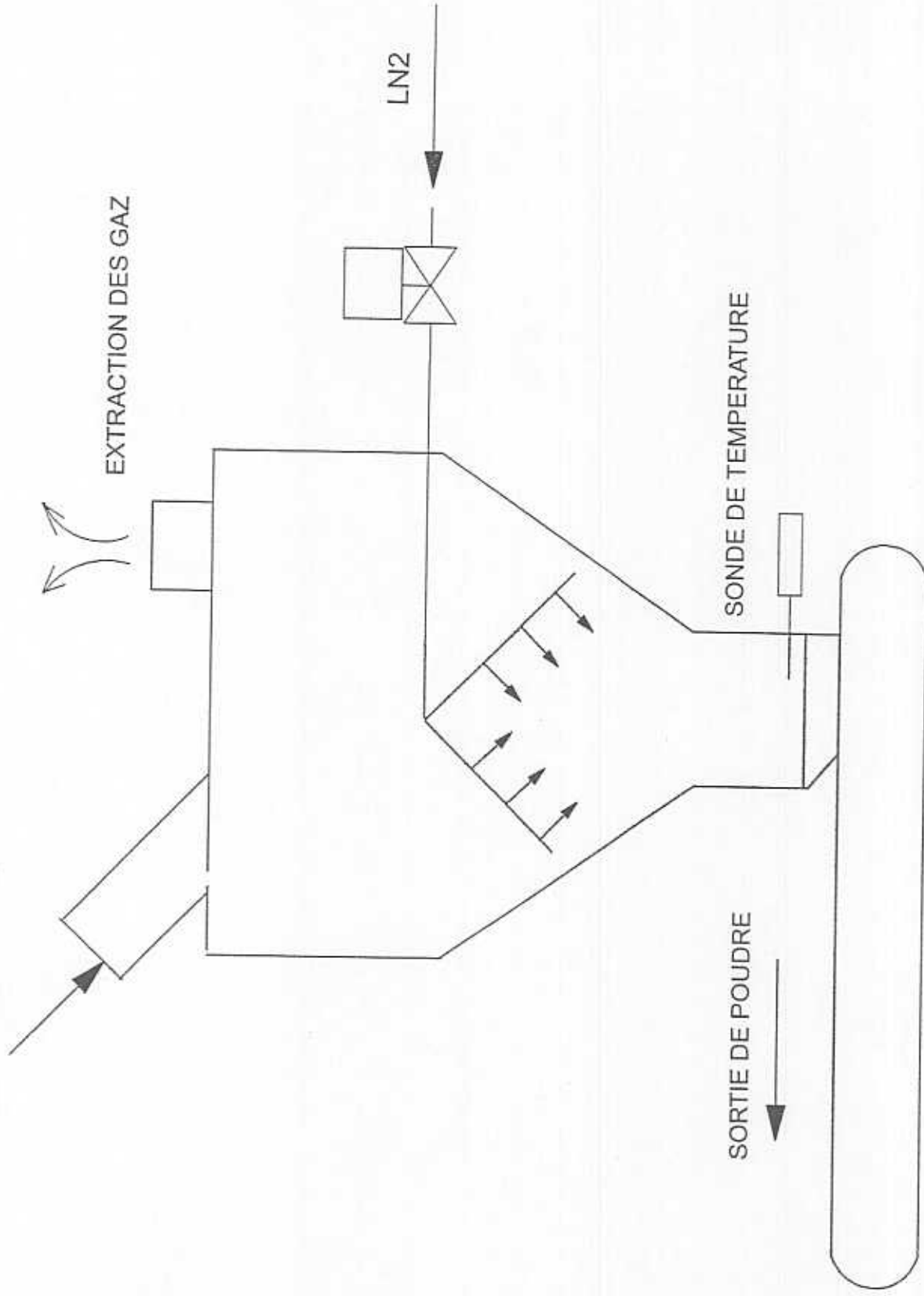
AIR LIQUIDE

*Investissement haut + facile
ms essais + points bus*



EXTRUSION SOUFFLAGE AVEC LE CO2

ARRIVEE DE POUVRE



TAPIS DE TRANSFERT

REFROIDISSEMENT DE POUVRE

CRYO-CINTRAGE.

PRINCIPE.

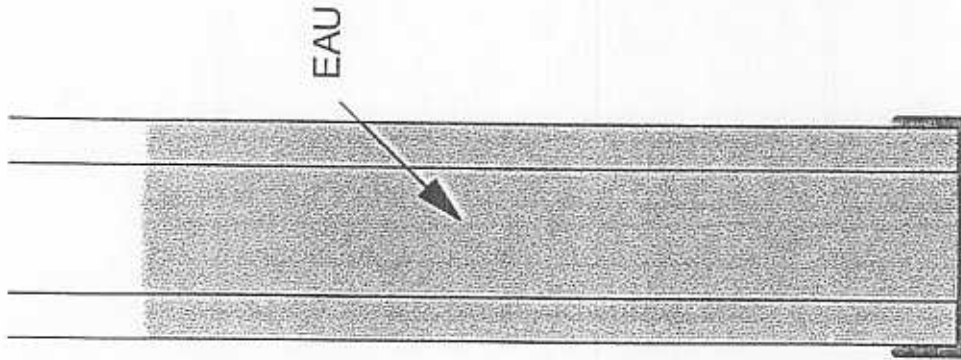
LE CRYO-CINTRAGE PERMET DE CINTRER DES TUYAUX CONCENTRIQUE EN UTILISANT LA GLACE COMME MANDRIN. ACTUELLEMENT ON L'UTILISE DANS L'INDUSTRIE AUTOMOBILE POUR LES POTS CATALYTIQUES.

LA MISE EN OEUVRE CONSISTE A REMPLIR LES TUBES D'EAU, A SURGELER CELLE-CI A - 80°C ENVIRON ET A LES COUDER DANS UNE CINTREUSE.

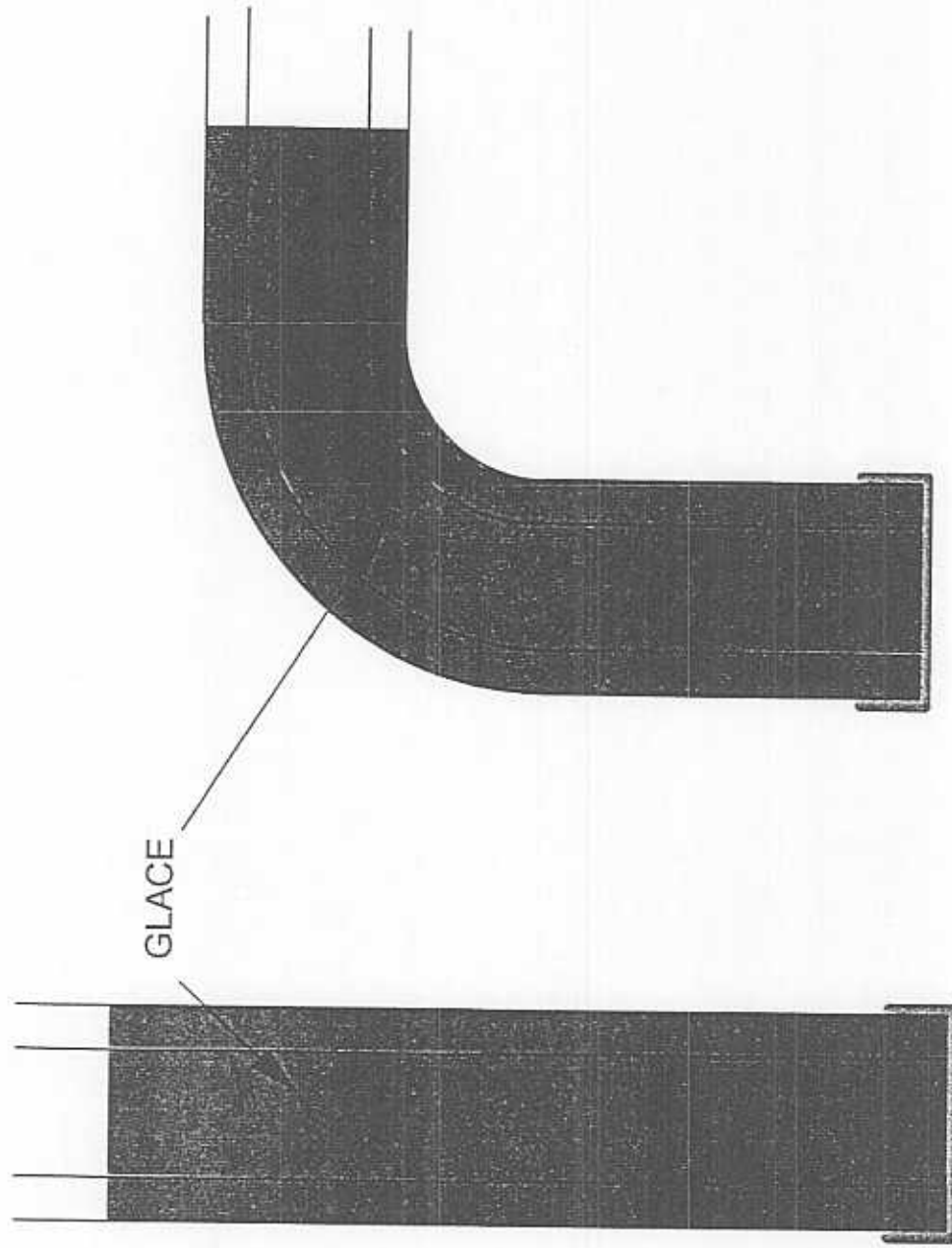
CONSOMMATIONS

FONCTION DES TUYAUX A CINTRER

TUBES AVANT
CINTRAGE

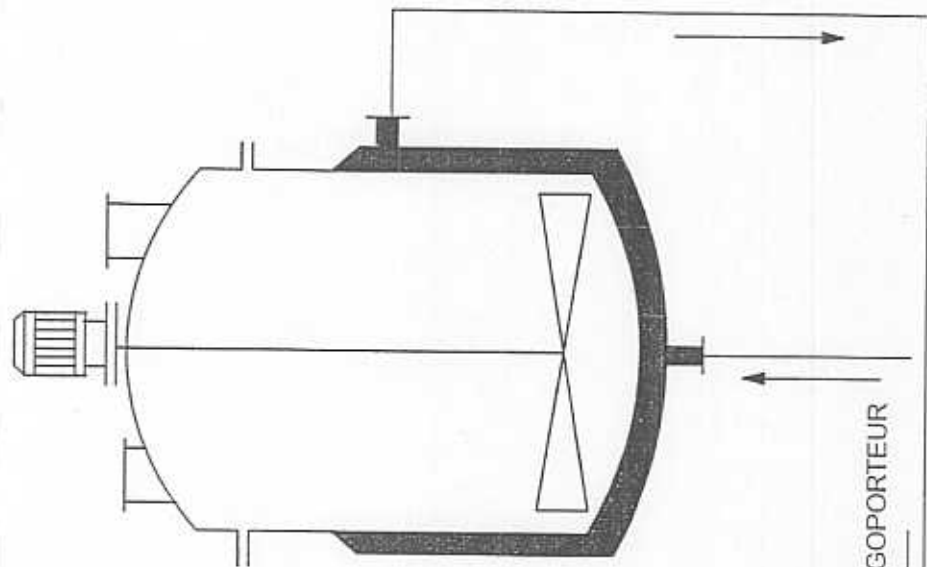


TUBES APRES
CINTRAGE

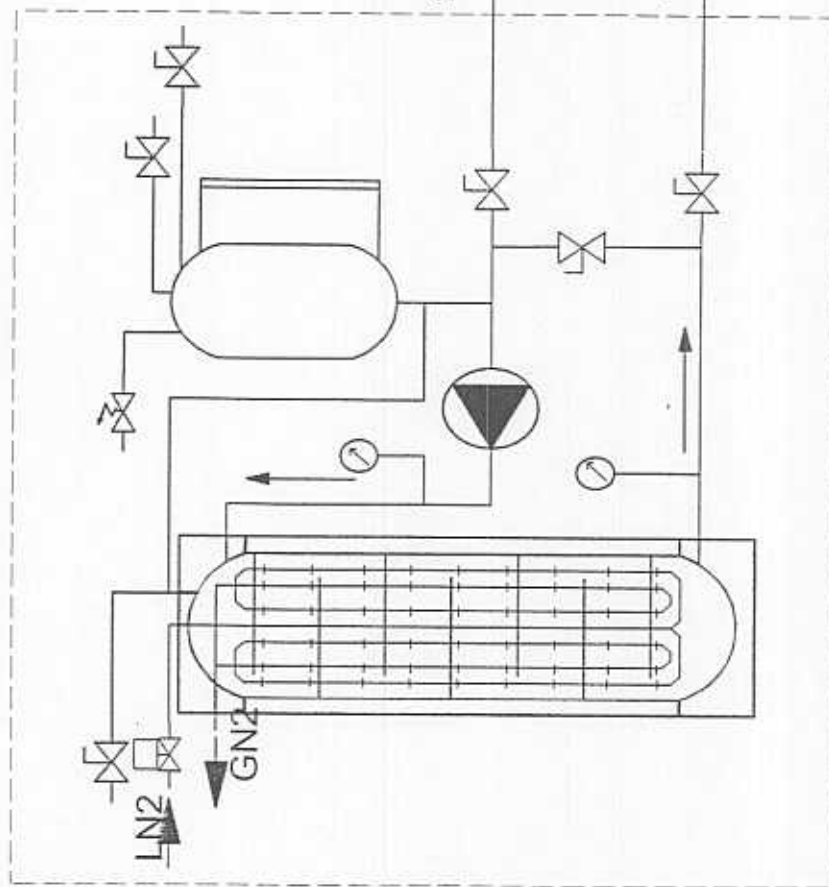


CRYO-CINTRAGE DE TUBES

REACTEUR



CENTRALE FROIDE

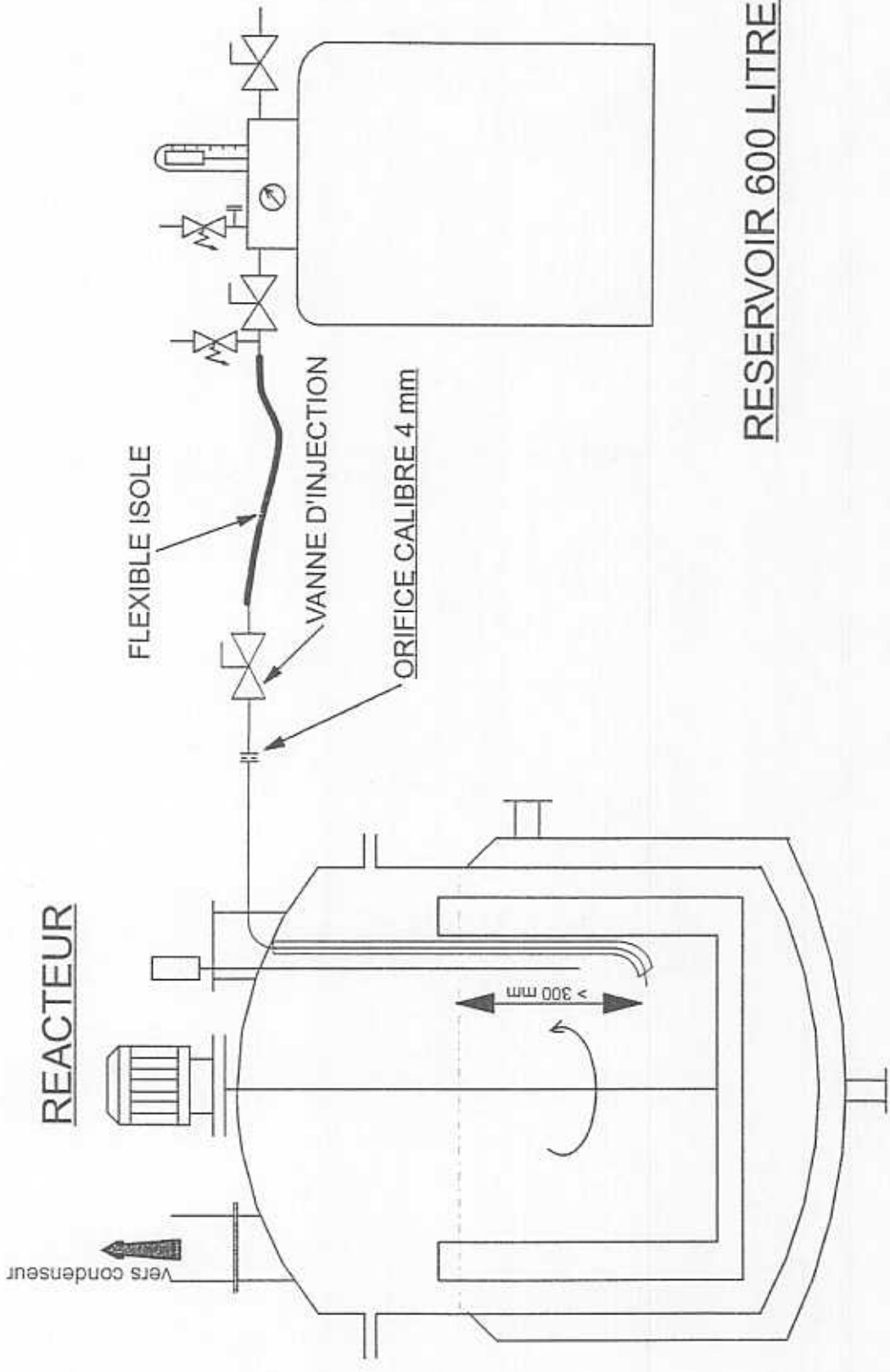


RETOUR FLUIDE FRIGOPORTEUR

ALLER FLUIDE FRIGOPORTEUR

*Alkohool
Glycol
CaCl*

REFROIDISSEMENT DE REACTEUR PAR CENTRALE FROIDE

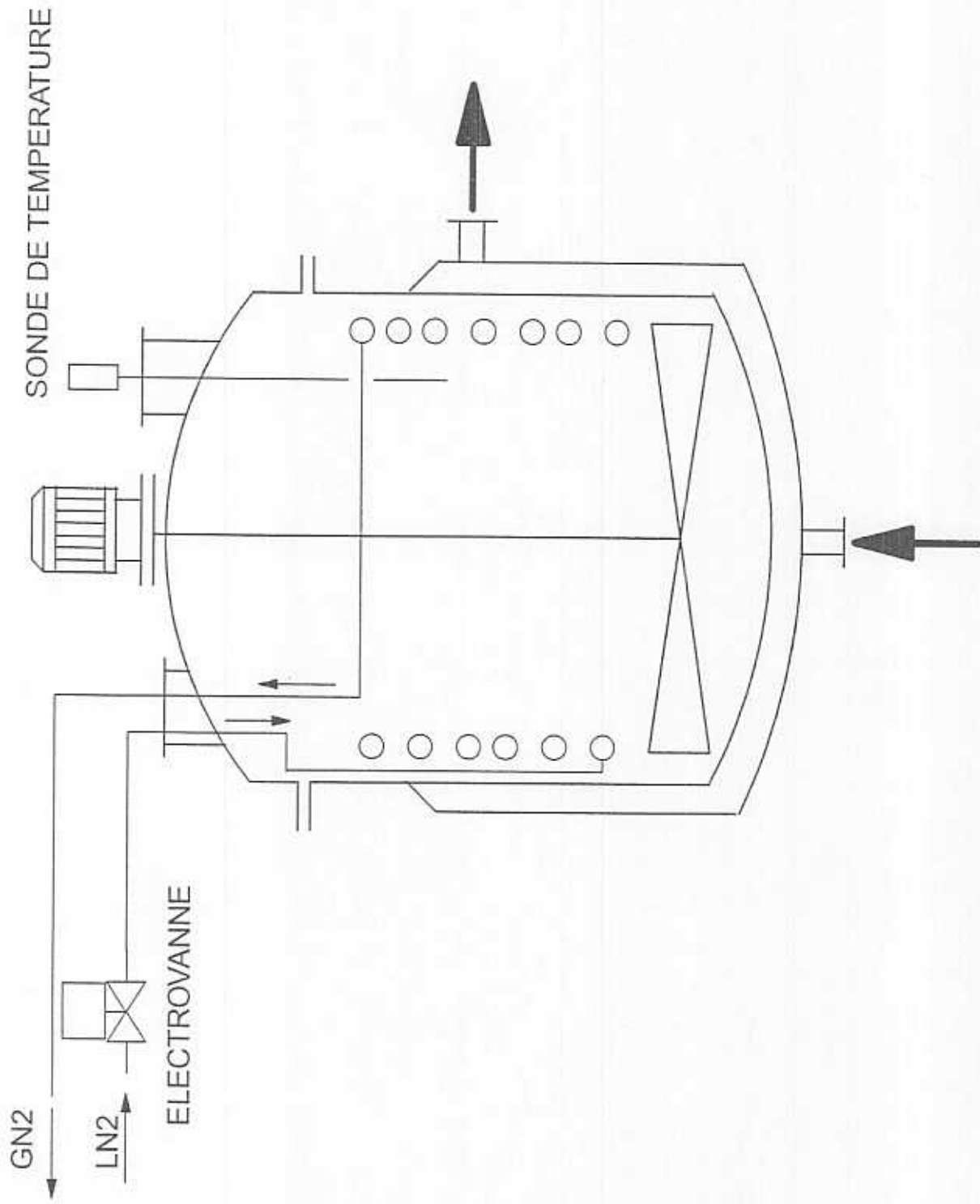


AFFAIRE CLARIANT

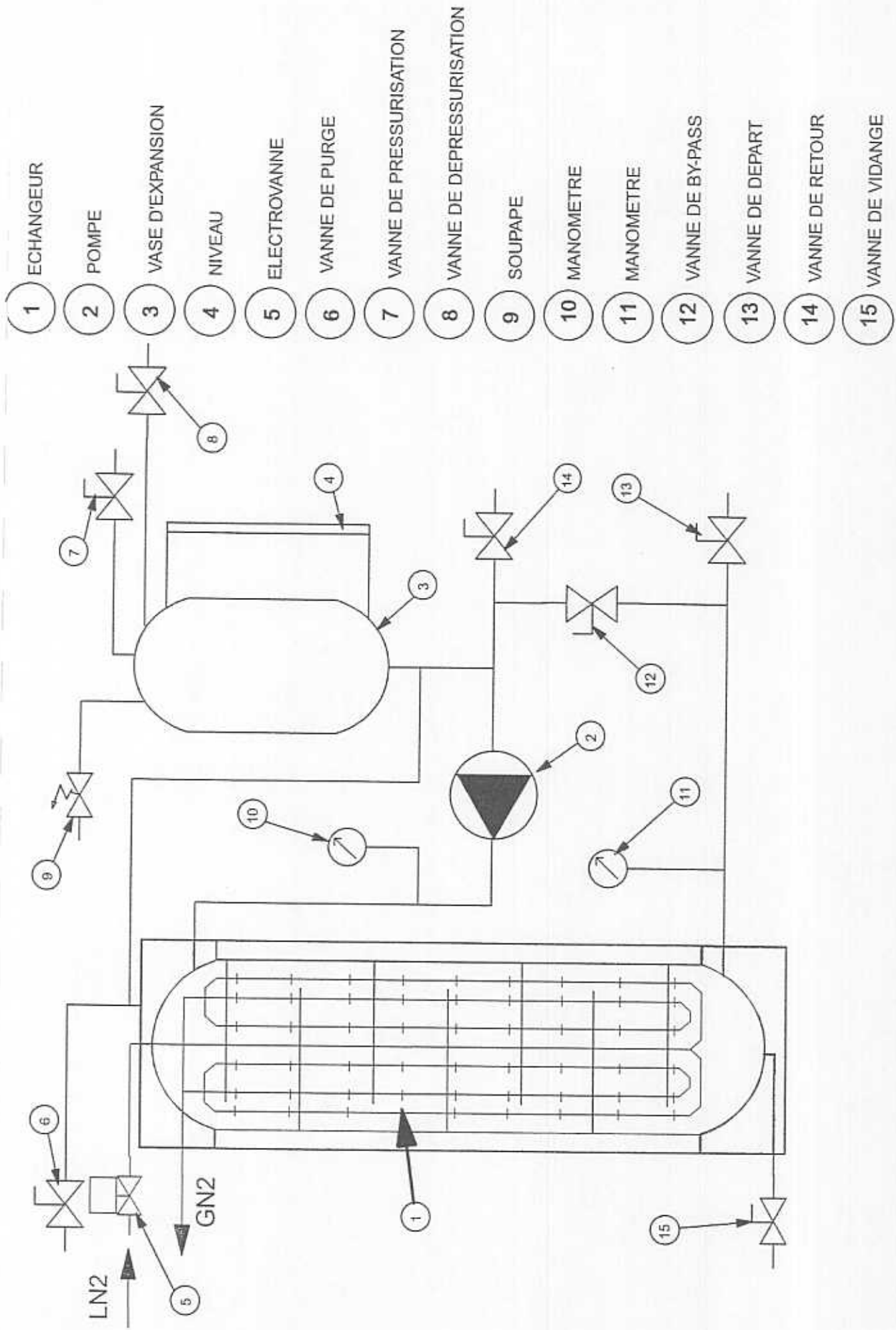
SCHEMA DE PRINCIPE DU REFROIDISSEMENT

PAR INJECTION DIRECTE DE LN2 DANS LE REACTEUR

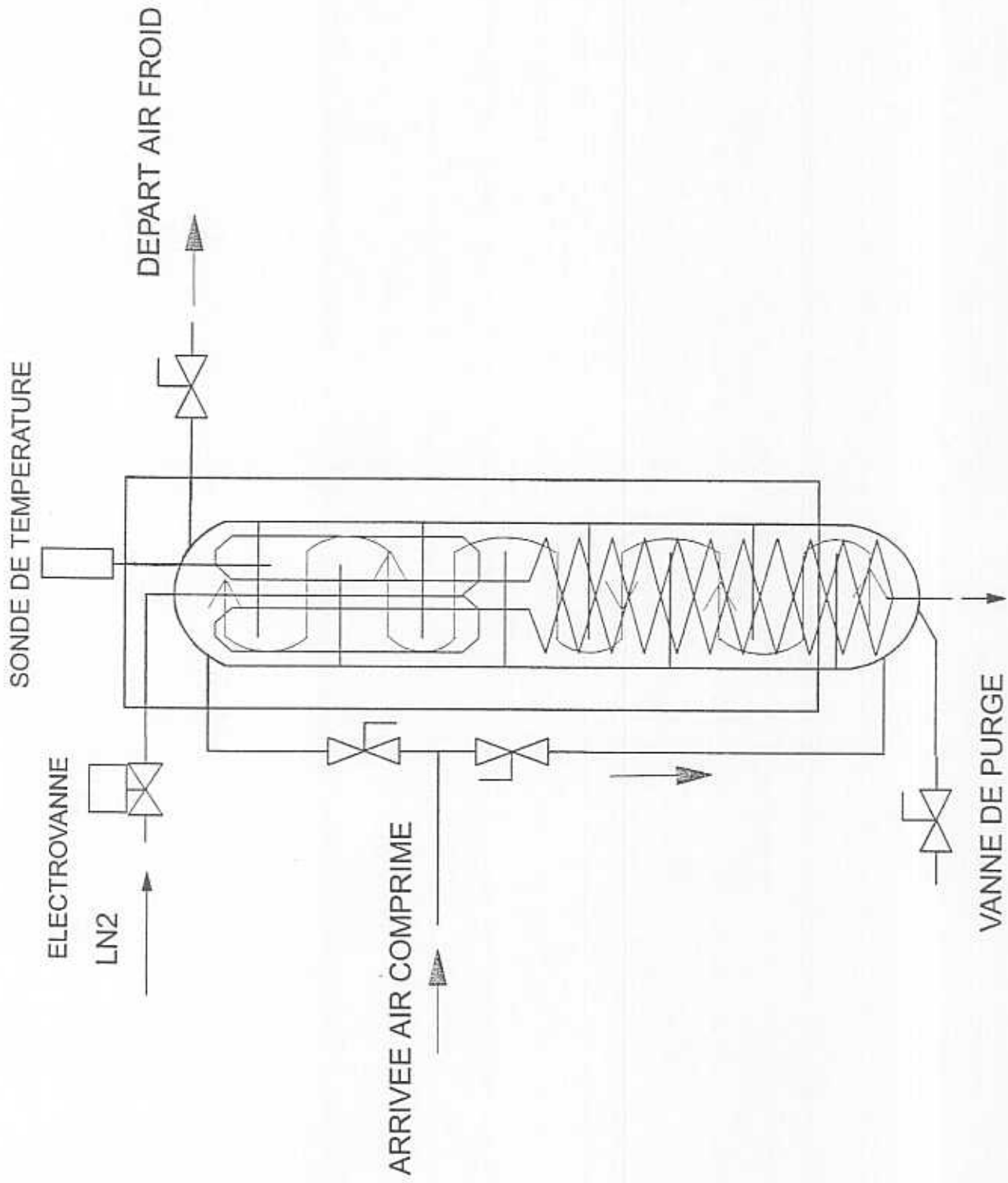
REACTEUR



REFROIDISSEMENT D'UN REACTEUR AVEC UN ECHANGEUR LN 2



SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE CENTRALE FROIDE



REFROIDISSEUR D'AIR

BROYAGE A TEMPERATURE CONTROLEE.

PRINCIPE.

LE BROYAGE PERMET LA REDUCTION DES PARTICULES AYANT UNE TAILLE INFERIEURE A 2 mm. EN GENERAL LE RAPPORT DE REDUCTION EST DE 10 IL PEUT ALLER JUSQU'A 25 .

IL EXISTE DIFFERENTES SORTES DE BROYEURS, BROYEUR A ATTRITION, A PERCUSSION , A BOULET ET A JET D'AIR.

ENVIRON 98 % DE L'ENERGIE DE BROYAGE SE TRANSFORME EN CHALEUR.

POUR EVITER L'ECHAUFFEMENT DU PRODUIT ON UTILISE LE BROYAGE A TEMPERATURE CONTROLEE PAR INJECTION DE FLUIDE CRYOGENIQUE, IL CONCERNE SURTOUT LES BROYEURS A PERCUSSION .

LE BILAN THERMIQUE PEUT S'ETABLIR COMME SUIT.

$$P0 + P1 + P2 + P3 + P4 = 0$$

P0 EST LA PUISSANCE DE REFROIDISSEMENT DU LN2.

P1 LA PUISSANCE EVACUEE PAR LE PRODUIT.

P2 PUISSANCE EVACUE PAR LE CIRCUIT D'AIR.

P3 PERTES THERMIQUES.

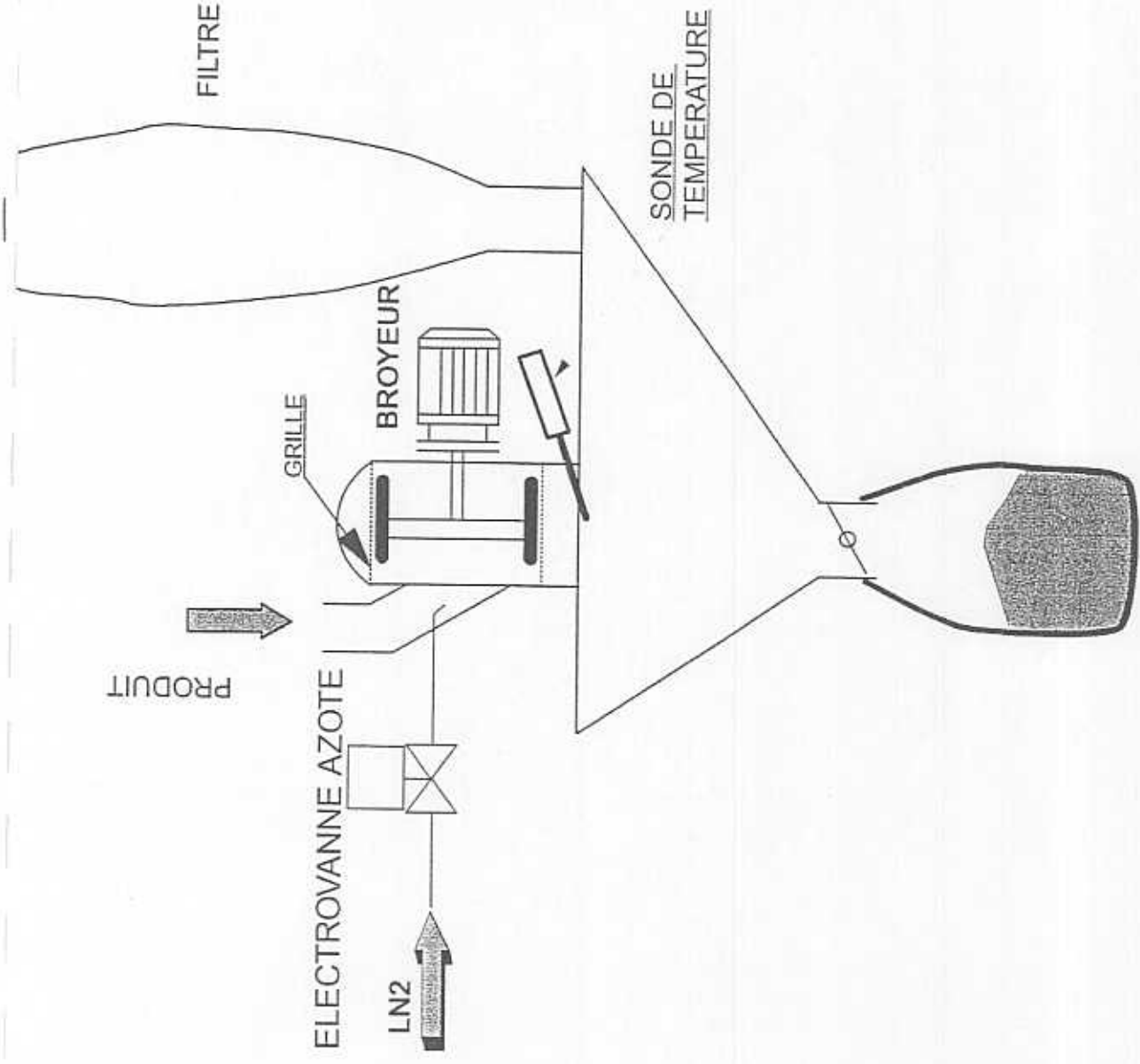
P4 PUISSANCE EFFECTIVE DU MOTEUR.

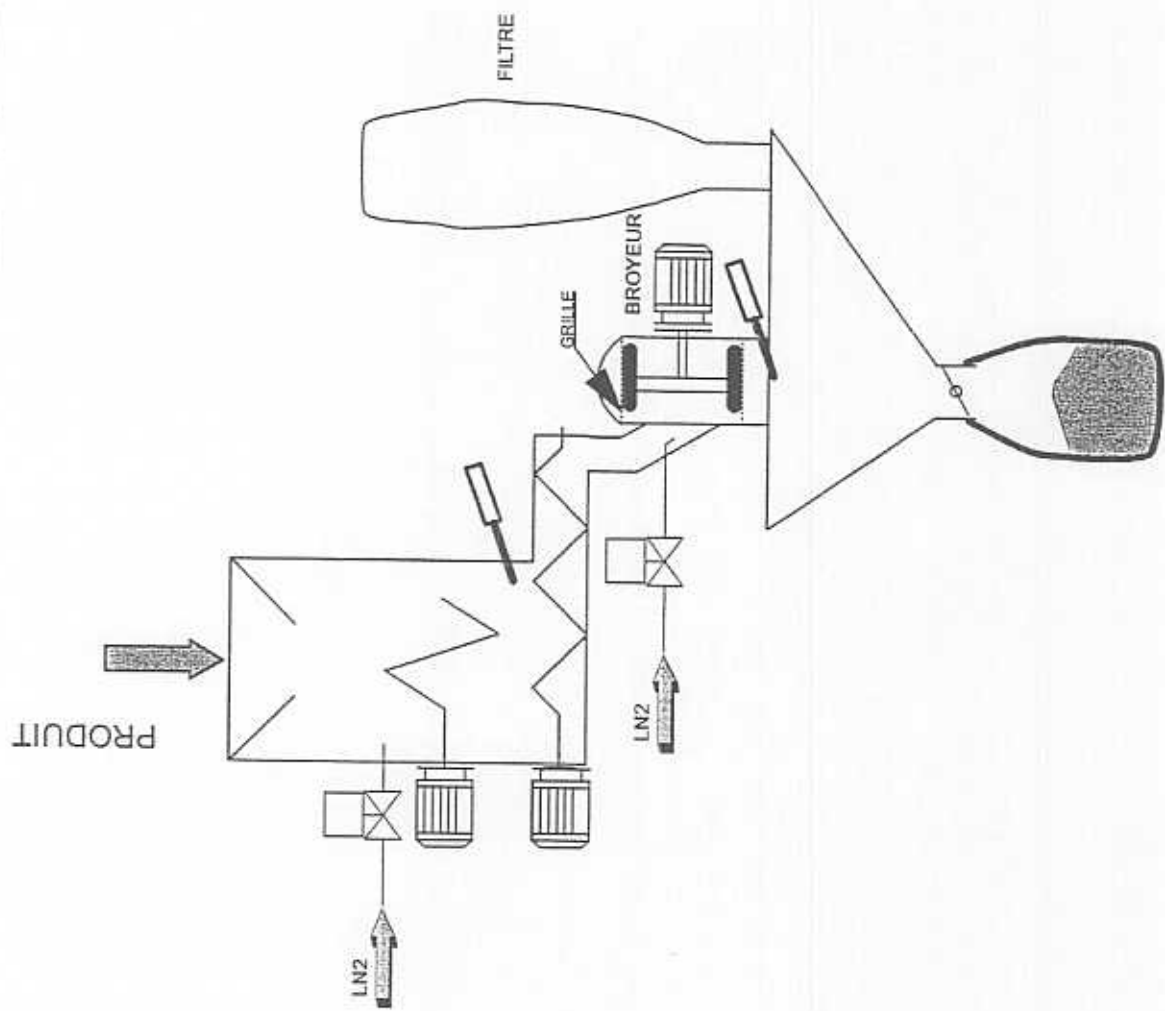
LA CONSOMMATION D'AZOTE LIQUIDE VARIE EN FONCTION DU TYPE DE BROYEUR , DU PRODUIT ET DES CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION.

CONSOMMATIONS

ELLE EST EN MOYENNE ENTRE 0.05 ET 0.3 LITRES DE LN₂/KG.

BROYAGE A TEMPERATURE CONTROLEE





INSTALLATION DE CRYO-BROYAGE

METALLISATION SOUS VIDE.

PRINCIPE.

LA METALLISATION SOUS VIDE PERMET LA PRODUCTION DE COUCHE MINCE D'UN MATERIAU EN TRANSFORMANT CELUI-CI EN VAPEUR ET EN LE CONDENSANT SUR LA SURFACE D'UN PRODUIT DE BASE. IL EST IMPERATIF DE TRAVAILLER A TRES BASSE PRESSION (INFERIEURE A 10^{-4} TORR). LE COUT D'UNE MACHINE EST D'ENVIRON 1 MF.

POUR OBTENIR CES BASSES PRESSIONS ON UTILISE GENERALEMENT DES POMPES A DIFFUSION D'HUILE.

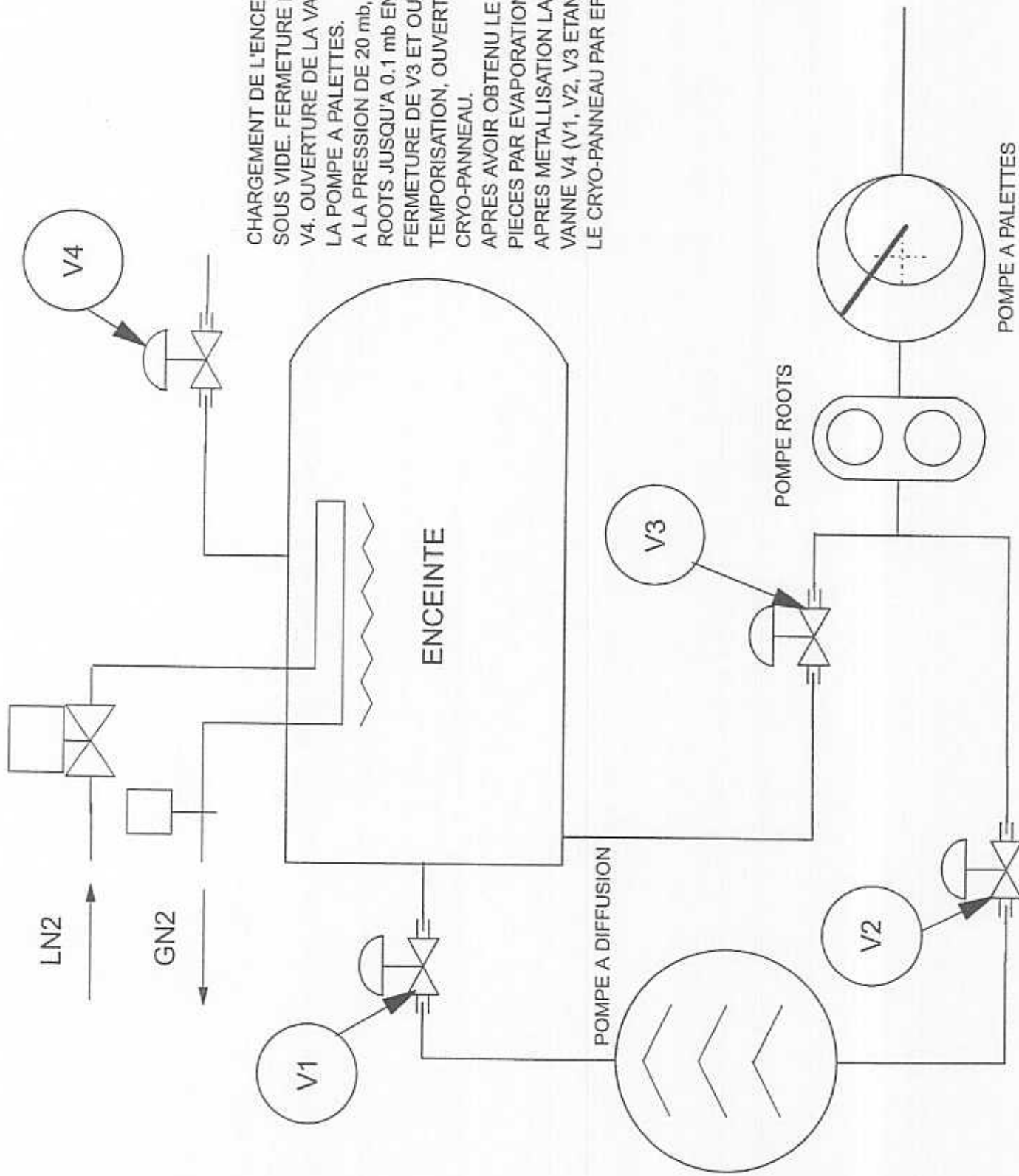
CES POMPES ASPIRENT MAL LES MOLECULES D'EAU ET EN FIN DE POMPAGE LA PRESSION DE L'EAU EST TOUJOURS SUPERIEURE A LA PRESSION PARTIELLE DES AUTRES GAZ.

LES CRYO-PANNEAUX (OU PIEGES) PERMETTENT DE CONDENSER CETTE VAPEUR D'EAU, D'ACCELERER LA DESCENTE EN VIDE ET DE L'AMELIORER.

AVEC L'UTILISATION DES CRYO-PANNEAUX LES TEMPS DE POMPAGE SECONDAIRE SONT REDUITS DE 20 A 50 %.

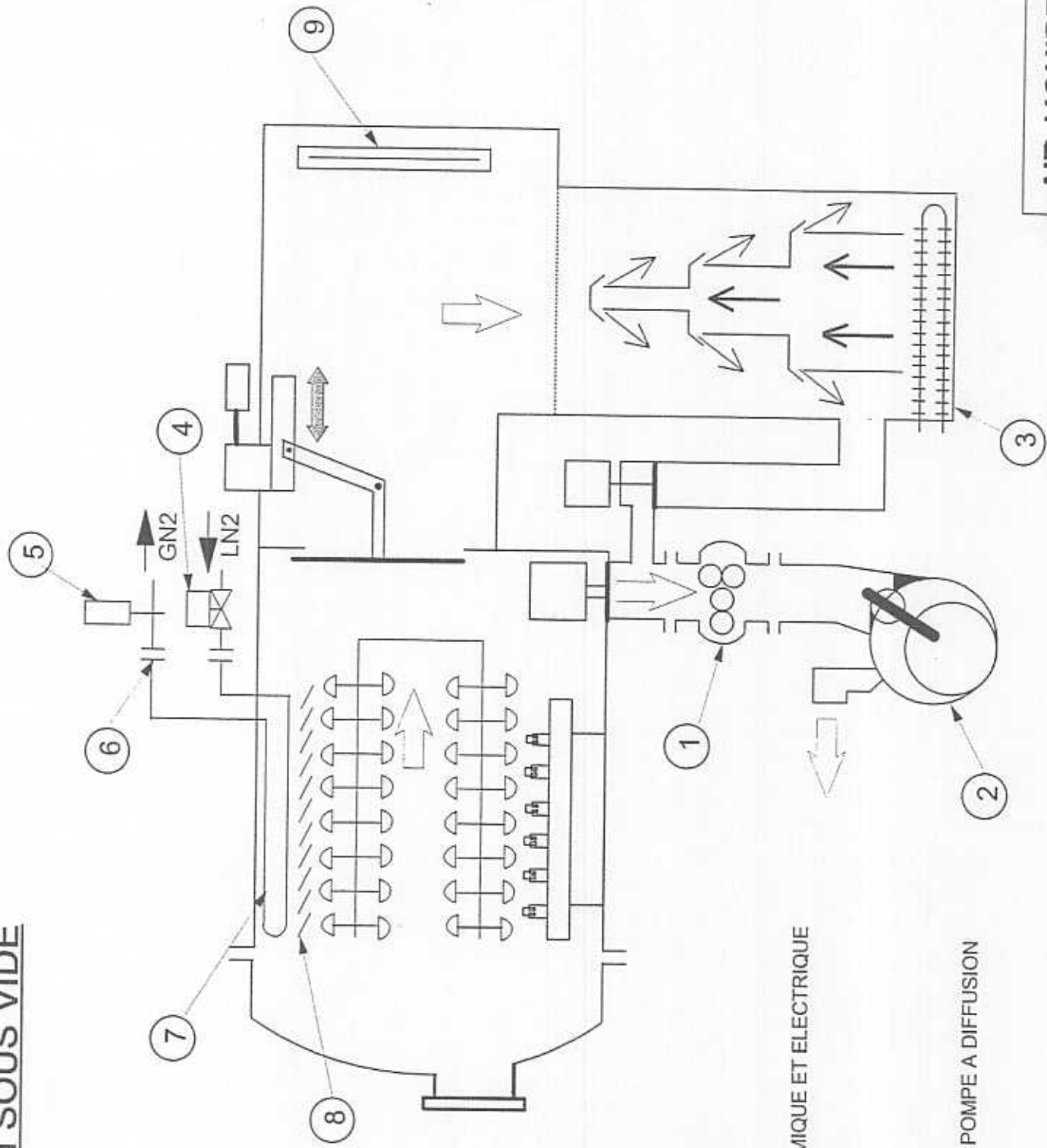
CONSOMMATIONS

LES CONSOMMATIONS D'AZOTE SONT ESSENTIELLEMENT DUES A LA MISE EN FROID DES PIEGES. EN MOYENNE DE 3000 A 10000 LITRES DE LN2 PAR MOIS SAUF DANS LE CAS DE PRODUIT HYGROPHOBE.



CHARGEMENT DE L'ENCEINTE DE METALLISATION
 SOUS VIDE. FERMETURE DE LA PORTE ET DE LA VANNE
 V4. OUVERTURE DE LA VANNE V3 ET MISE EN ROUTE DE
 LA POMPE A PALETTES.
 A LA PRESSION DE 20 mb, MISE EN ROUTE DE LA POMPE
 ROOTS JUSQU'A 0.1 mb ENVIRON.
 FERMETURE DE V3 ET OUVERTURE DE V2, APRES
 TEMPORISATION, OUVERTURE DE V1. MISE EN FROID DU
 CRYO-PANNEAU.
 APRES AVOIR OBTENU LE VIDE DESIRE, ON METALLISE LES
 PIECES PAR EVAPORATION DU METAL.
 APRES METALLISATION LA REMISE A L'AIR SE FAIT PAR LA
 VANNE V4 (V1, V2, V3 ETANT FERMEES) ET ON REGENERE
 LE CRYO-PANNEAU PAR EFFET JOULE OU GAZ CHAUDS

METALLISATION SOUS VIDE



- 1 POMPE ROOTS
- 2 POMPE A PALETTES
- 3 POMPE A DIFFUSION
- 4 ELECTROVANNE LN2
- 5 SONDE DE TEMPERATURE
- 6 BRIDES D'ISOLEMENTS THERMIQUE ET ELECTRIQUE
- 7 PIEGE CRYOGENIQUE
- 8 ECRAN THERMIQUE
- 9 PIEGE DE PROTECTION DE LA POMPE A DIFFUSION

CRYO-TRESSAGE

PRINCIPE.

POUR AUGMENTER LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE TENUE A LA PRESSION DES TUYAUX CAOUTCHOUC OU SIMILAIRE ON RENFORCE CEUX-CI PAR UN TRESSAGE TEXTILE OU AUTRE. LES VITESSES DE TRESSAGE SONT DE L'ORDRE DE 1 A 4 METRES PAR MINUTE

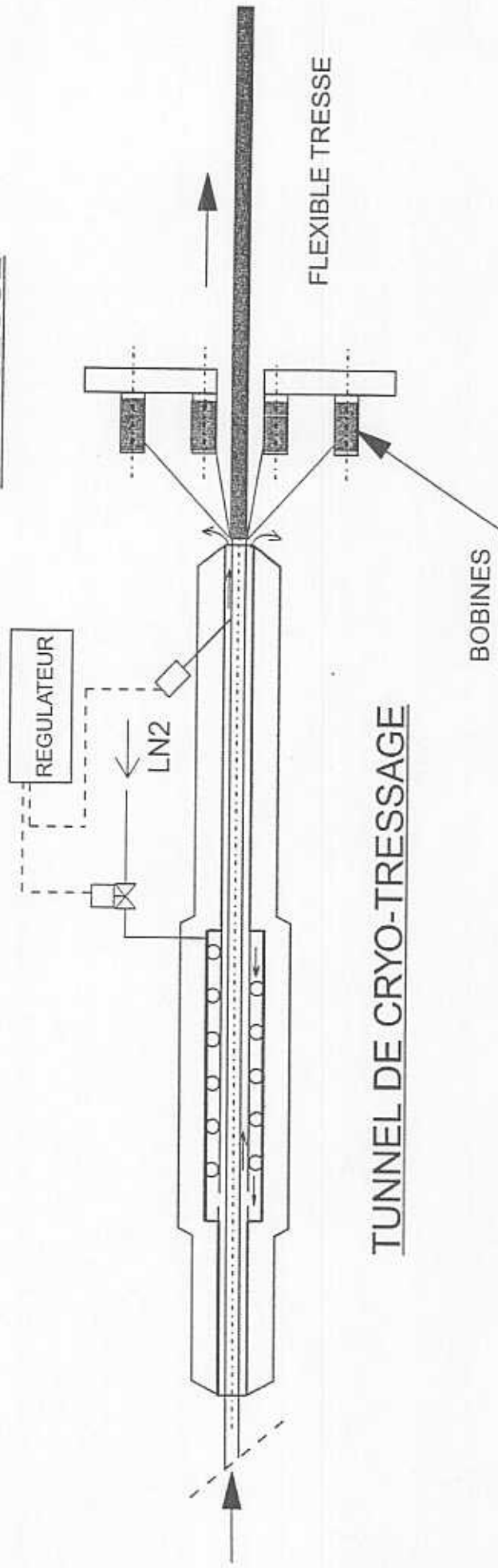
POUR EVITER L'ECRASEMENT OU LA DEFORMATION DU TUYAU LORS DU TRESSAGE ON UTILISE UN MANDRIN. OU LA CRYOGENIE QUI SUPPRIME L'UTILISATION D'UN MANDRIN PAR DURCISSEMENT DU TUYAU A TRESSER.

IL EXISTE LA TECHNIQUE DU SPIRALAGE, LES FILS NE SE CROISENT PLUS MAIS SONT ENROULES AUTOUR DU TUYAU. LES VITESSES DE SPIRALAGE PEUVENT ATTEINDRE 20 METRES PAR MINUTE.

CONSOMMATIONS

LES CONSOMMATIONS SONT FONCTION DU TUYAU A TRESSER.

TRESSEUSE



TUNNEL DE CRYO-TRESSAGE

SCHEMA DE PRINCIPE DU CRYO-TRESSAGE DE FLEXIBLES