

5/98

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique*

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

*Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Génie Mécanique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

**ETUDE, ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT DES ORGANES
DU BANC D'ESSAI DE COMBUSTION.**

Présenté par :

Mr. BOUGRAB HAKIM

Proposé et dirigé par :

*Mrs. B. BENKOUSSAS
S. LARBI*

PROMOTION

JUIN 1998

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

*Pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
en Génie Mécanique*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THEME

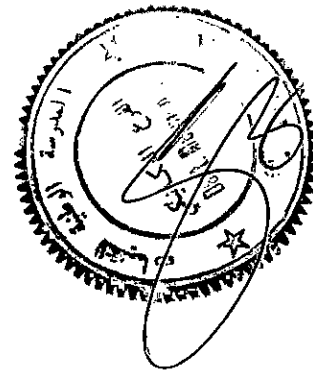
**ETUDE, ANALYSE ET DIMENSIONNEMENT DES ORGANES
DU BANC D'ESSAI DE COMBUSTION.**

Présenté par :

Mr. BOUGRAB HAKIM

Proposé et dirigé par :

*Mrs. B. BENKOUSSAS
S. LARBI*



J. Larbi

PROMOTION

JUIN 1998

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

A MA MÈRE ET MON PÈRE ;

POUR TOUS LES SACRIFICES QU'ILS ONT CONSENTI ;

A MES SCEURS ET MES FRÈRES ;

A TOUTE MA FAMILLE ;

A MENEL, NOUR-EL-HOUDA ET FEYROUSE ;

A TOUTE MA PROMOTION ;

A TOUS MES AMIS ;

A NOUAM ;

A MES DEUX PROMOTEURS, M. S. LARBI ET M. B. BENKOUSSAS ;

A TOUS LES ENSEIGNANTS DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE ;

A TOUS LES TRAVAILLEURS DE LA BIBLIOTHÈQUE DE L'E.N.P ;

JE DÉDIE CE TRAVAIL.

HAKIM.

REMERCIEMENTS

JE REMERCIE DIEU TOUT PUISSANT DE M'AVOIR DONNÉ LA VOLONTÉ ET LE COURAGE AFIN D'ARRIVER À LA FINALITÉ DE CE MODESTE TRAVAIL .

JE REMERCIE AUSSI MA FAMILLE, À QUI REVIENT LA GLOIRE DE M'AVOIR ÉDUQUÉ , ENCOURAGÉ ET SOUTENU.

JE TIENS TOUT PARTICULIÈREMENT À REMERCIER MES DEUX PROMOTEURS M. S. LARBI ET M. B. BENKOUSSAS, D'AVOIR ACCEPTÉ DE DIRIGER CETTE ÉTUDE.

JE REMERCIE ÉGALEMENT LES MEMBRES DE JURY, QUI ONT ACCEPTÉ DE DISCUTER ET D'EXAMINER CE TRAVAIL .

MES REMERCIEMENTS VONT AUSSI À TOUS LES ENSEIGNANTS QUI ONT CONTRIBUÉ À MA FORMATION.

J'ADRESSE AUSSI MA PROFONDE RECONNAISSANCE À TOUS CEUX QUI DE PRÈS OU DE LOIN, ONT CONTRIBUÉ À L'ÉLABORATION DE CE MÉMOIRE.

SANS OUBLIER NOS PRÉCIEUX AMIS, POUR LEURS AIDES, LEURS ENCOURAGEMENTS ET LEUR DISPONIBILITÉ.

ملخص :

يتمثل هذا العمل في دراسة لإجراء الحسابات التصميمية لبعض أجزاء منظومة تجريب الإحتراق لمخبر تحويل الطاقة باستعمال الغاز الطبيعي المميع (غ. ط. م) كوقود. تفحصنا مشكل تخزين ال غ. ط. م من جانبيه الميكانيكي و الحراري و تتعلق النتائج المقدمة بسك الخزان و سمك العازل و كذا نسبة التبخر و دليل البنية.

RESUME :

Le présent travail consiste en une étude de dimensionnement de certains organes du banc d'essai de combustion du laboratoire du conversion d'énergie, utilisant le gaz naturel liquéfié (G.N.L) comme fuel.

Nous avons examiner le problème du stockage de G.N.L, sous ses aspects mécanique et thermique. Les résultats présentés sont relatifs au calcul de l'épaisseur du réservoir et de l'épaisseur d'isolant, ainsi qu'au taux d'évaporation et d'indice de structure.

ABTRACT :

This work consists in design computing study for, some organs of experimental system for combustion of laboratory of energy conversion, using liquefied natural gas (L.N.G) as fuel.

We have examined the problem of storage of L.N.G, from its mechanical and thermal aspects. The results presented are relative to the computing of thickness of the reservoir and the thickness of the isolator, and also to the evaporation and the index of structure.

SOMMAIRE

- INTRODUCTION

I- FORMATION DU GAZ NATUREL

1.1- Le gaz naturel dans les conditions géologiques	3
1.1.1- Régime hydrostatique	3
1.1.2- Régime géostatique	3
1.1.3- Variation de la pression en fonction de la profondeur	3
1.1.4- Variation de la solubilité en fonction de la profondeur	3
1.2- Diversité de la composition des gisements de gaz naturel	7
1.3- Origine des constituants du gaz naturel	8
1.3.1- Hydrocarbures	8
1.3.2- Constituants non-hydrocarbures	10
1.4- Formation des gisements de gaz naturel	11
1.5- Propriétés physico-chimiques du gaz naturel	12
1.5.1- Nature des constituants présents dans le gaz naturel	12
1.5.2- Propriétés volumiques	14
1.6- Intérêt du gaz naturel	18
1.7- Production du gaz naturel	19
1.7.1- Pièges structuraux	19
1.7.2- Pièges stratigraphiques	19
1.7.3- Opération de forage	20
1.7.4- Traitement du gaz naturel	20

II- LIQUEFACTION DU GAZ NATUREL

2.1- Définition de la liquéfaction d'un gaz	22
2.1.1- Cryogénie	22
2.2- La liquéfaction pour l'ingénieur	24
2.3- Liquéfaction du gaz naturel	25
2.4- Procédés de liquéfaction	25
2.4.1- Cascade classique pour liquéfier la gaz naturel	25
2.4.1.1- Description générale du procédé	26

2.4.2-	Cascade incorporée	28
2.4.2.1-	Description générale du procédé	28
2.5-	Les différentes caractéristiques du G.N.L	31
2.5.1-	Composition du G.N.L	31
2.5.2-	Caractéristiques physiques du G.N.L	31
2.5.3-	Caractéristiques thermodynamiques du G.N.L	36
2.5.3.1-	Pouvoir calorifique	36
2.5.3.2-	Chaleur de vaporisation	38
2.5.3.3-	Chaleur spécifique du G.N.L	38
2.6-	Liquéfacteur Philips PLA-107	40
2.6.1-	Introduction	40
2.6.2-	Représentation schématique simplifiée du liquéfacteur	40
2.6.3-	Description générale du cycle de Stirling inversé	42
2.6.4-	Principe de fonctionnement du liquéfacteur Philips Pla-107	44
2.6.5-	Tête de condenseur	44
2.6.6-	Transmission de mouvement	44

III- STOCKAGE DU GAZ NATUREL LIQUEFIE

3.1-	Stockage du G.N.L	47
3.1.1-	Introduction	47
3.1.2-	Réservoirs cylindriques à axe horizontal	47
3.1.3-	Réservoirs sphériques	47
3.2-	Choix du matériaux	48
3.2.1-	Qualité des matériaux	48
3.2.2-	Propriétés des matériaux	48
3.2.2.1-	Propriétés thermiques	49
3.2.2.2-	Propriétés mécaniques	57
3.2.3-	Analyse du choix	63

IV- DIMENSIONNEMENT DU RESERVOIR DE STOCKAGE

4.1-	But du calcul	66
4.1.1-	Indice de structure	66
4.1.2-	Taux d'évaporation	66

4.2- Calcul schématique du réservoir	66
4.3- Optimisation du réservoir	66
4.3.1- Calcul du diamètre intérieur (D_i) de la virole	68
4.3.2- Calcul de l'épaisseur de la virole (e_v)	69
4.4- Variation de l'épaisseur (e_v) de la virole	70
4.4.1- Variation de l'épaisseur (e_v) en fonction de la pression (P)	70
4.4.2- Variation de (e_v) en fonction du diamètre (D_i)	71
4.4.3- Influence de la charge de rupture à la traction R sur (e_v)	71
4.5- Variation du volume total (V_t)	72
4.5.1- Influence de la pression (P) sur (V_t)	72
4.5.2- Influence de l'épaisseur (e_v) sur (V_t)	73
4.5.3- Influence de (R) sur (V_t)	74
4.6- Calcul de l'épaisseur du fond (e_f)	75
4.6.1- Influence de (P) sur (e_f)	75
4.6.2- Influence de (R) sur (e_f)	76
4.7- Isolation thermique du réservoir de stockage	77
4.7.1- Introduction	77
4.7.2- Différents types d'isolants	78
4.7.2.1- Mousses	78
4.7.2.2- Poudres	79
4.7.2.3- Superisolants	80
4.7.2.4- Vide	83
4.7.3- Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolations	83
4.8- Calcul des pertes par évaporation	84
4.8.1- Calcul du flux de chaleur total ϕ	84
4.8.2- Calcul de débit du G.N.L évaporé	96
4.8.3- Calcul du taux d'évaporation du G.N.L	99
4.8.4- Calcul de l'indice de structure	103

- CONCLUSION

NOMENCLATURE

- ν : Viscosité cinématique [centistokes].
- μ : Viscosité dynamique [centipoises].
- ρ_{acier} : Masse volumique de l'acier inoxydable [kg / m^3].
- ρ_{isolant} : Masse volumique de l'isolant [kg / m^3].
- τ : Temps moyen de diffusion [s].
- χ : Résistance électrique [$\Omega \cdot \text{m} / \text{K}$].
- α : Coefficient d'efficacité relatif des soudures.
- α : Angle qui caractérise la calotte [$^\circ$].
- $\beta = \alpha / 2 - \arcsin \{ (H - R'_i) / R_s \}$ [$^\circ$].
- $\varphi = (\frac{1}{2})(\pi - \alpha)$ [$^\circ$].
- ΔH_v : Chaleur latente de vaporisation [KJ / kg].
- ϕ : Flux de chaleur total [W].
- ϕ_1 : Flux de chaleur latéral qui passe à travers la partie cylindrique [W].
- ϕ_2 : Flux de chaleur qui passe à travers une calotte [W].
- A : Allongement en pourcentage [%].
- $A(H) = \text{Sin} \{ (\frac{1}{2}) \arcsin (1,3 H - 1) + 33,69 \}$ [m^2].
- $B(e, e_v) = R_{11} + R_{12} + R_{13}$ [$\text{m} \cdot \text{K} / \text{W}$].
- C : Surépaisseur de corrosion [mm].
- $C(e, e_v) = R_{21} + R_{22} + R_{23}$ [$\text{m} \cdot \text{K} / \text{W}$].
- C_p : Chaleur spécifique [$\text{KJ} / \text{Kg} \cdot \text{K}$].
- C_e : Capacité thermique massique associée aux électrons libres [$\text{KJ} / \text{kg} \cdot \text{K}$].
- C_{ph} : Capacité thermique massique associée aux réseau cristallin [$\text{KJ} / \text{Kg} \cdot \text{K}$].
- d_i : Densité du constituant (i).
- dv : Vitesse instantanée [m / s].
- D : Fonction de Debye.
- D_i : Diamètre intérieur de la virole [m].
- D_e : Diamètre extérieur de la virole [m].
- DN_i : Domaine d'inflammabilité [K].
- e : Epaisseur d'isolant [mm].
- e_1 : Epaisseur de sécurité [mm].
- e_f : Epaisseur du fond [mm].
- e_v : Epaisseur de la virole [mm].
- E : Module d'élasticité [MPa].
- F : Force de résistance [N].
- $G(H) = \pi \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta) \}$.
- h : Constante de Planck, $h = 6,55 \cdot 10^{-34}$ [J . s].
- H : Hauteur du G.N.L contenu dans le réservoir de stockage [m].
- IS : Indice de structure.
- K : Conductivité thermique [$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$].
- K_e : Conductivité thermique électronique [$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$].
- K_{ph} : Conductivité thermique du réseau [$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$].
- K_p : Conductivité thermique de la paroi [$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$].
- K_{isolant} : Conductivité thermique de l'isolant [$\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$].

- K_B : Constante de Boltzmann, $K_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W / m² . K].
- L_1 : Longueur de la partie cylindrique du réservoir de stockage [m].
- L_{ph} : Libre parcours moyen des phonons [m].
- L_e : Libre parcours moyen des électrons entre deux diffusions [m].
- M_A : Masse molaire de l'air [g / mole].
- M_j : Masse molaire de l'élément (j) [g / mole].
- M_{ce} : Masse du carburant évaporé [kg / s].
- M_{rv} : Masse du réservoir vide [kg].
- M_c : Masse du carburant [kg].
- M_e : Masse de l'électron, $M_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$ [Kg].
- n : Nombre d'électrons par unité de volume.
- N/V : Nombre d'atomes par unité de volume.
- P : Pression [bars].
- P_i : Point d'inflammation [K].
- P_r : Pression réduite.
- P_{pc} : Pression pseudo-critique [bars].
- PCI : Pouvoir calorifique inférieur [KJ / m³] ou [KJ / mole].
- PCS : Pouvoir calorifique supérieur [KJ / m³] ou [KJ / mole].
- R_{i1} : Résistance thermique de la couche (i) du réservoir [m . k / W].
- R_{int} : Rayon intérieur du cylindre [m].
- $R_1 = R_{int} + e_v$ [m].
- $R_2 = R_1 + e$ [m].
- R_{ext} : Rayon extérieur du cylindre [m].
- $R_{ext} = R_2 + e_1$ [m].
- R_S : Rayon intérieur de la calotte [m].
- R : Limite élastique [MPa].
- R_T : Limite de rupture [MPa].
- $R'_{int} = R_S$ [m].
- $R'_1 = R_S + e_v$ [m].
- $R'_2 = R'_1 + e$ [m].
- $R'_{ext} = R'_2 + e_1$ [m].
- S : Surface de la couche où glisse le fluide [m²].
- S_{int}, S_1, S_2, S_3 : Surfaces des calottes pour différents rayons [m²].
- T : Température [K].
- TE : Taux d'évaporation [s⁻¹].
- T_r : Température réduite.
- T_{pr} : Température pseudo-critique [K].
- TV_i : Tension de vapeur d'un constituant (i) [bars].
- T_{cong} : Température de congélation [K].
- $T_{éc}$: Température d'écoulement [K].
- T_D : Température de Debye [K].
- V : Vitesse de son dans le solide [m / s].
- V_v : Volume de la virole [m³].
- V_F : Vitesse de Fermi [m / s].
- V_f : Volume du fond [m³].
- V_T : Volume total du réservoir [m³].
- V_{cyv} : Volume de la partie cylindrique vide [m³].

- V_{cv} : Volume de la calotte vide [m³].
- X : Coefficient de sécurité.
- X : Distance [m].
- Y_i : Fraction molaire du constituant (i) [%].
- Z : Facteur de compressibilité.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La modélisation mathématique et numérique des processus aussi complexes que la combustion doit passer nécessairement par une validation expérimentale des résultats théoriques obtenus, afin de mieux comprendre les mécanismes physiques réels intervenant dans ce genre de phénomènes et de mieux les simuler en temps réel.

Le développement sans cesse croissant de l'informatique et des méthodes de calcul numérique, doit être conçu comme étant un outil de simulation des processus physiques si l'on est certain que le modèle mathématique décrit correctement les phénomènes et non pas comme une fin. Il va de soit qu'un travail théorique n'est scientifiquement fondé que s'il est validé expérimentalement, et qu'une étude expérimentale n'est fiable que si elle passe par plusieurs testes de reproductibilités garantissant ainsi la reproductibilité des phénomènes dans les mêmes conditions.

L'allure vertigineuse des innovations technologiques de ce siècle, ainsi que le soucis de simuler des situations naturelle et industrielle au laboratoire, a connu de lourds investissements dans le domaine expérimental par la mise au point de bancs d'essais.

Le banc d'essai de combustion dont dispose le laboratoire de thermo-fluides en est un exemple type. Il est composé essentiellement de liquéfacteurs, de réservoirs de stockage cryogénique, d'un échangeur de chaleur, d'une soufflante, d'une chambre de combustion et d'une console de commandes.

Néanmoins, ce dispositif expérimental remonte aux années soixante dix [5], et nécessite par conséquent un contrôle préalable de ses organes, et une actualisation de l'instrumentation de mesure utilisée.

L'objectif vise à travers ce travail de remettre en marche le banc d'essai de combustion et de revoir le dimensionnement des réservoirs de stockage sous leurs aspects mécanique (résistance aux contraintes appliquées) et thermique (isolation thermique).

L'étude des liquéfacteurs avait déjà fait l'objet de plusieurs études [8 et 9], mais pour la production d'air liquide seulement. La production du gaz naturel liquéfié n'avait fait l'objet d'aucune étude spécifique.

Notre travail est reparti en quatre chapitres principaux :

- Le premier est relatif à la formation du gaz naturel et à son exploitation.
- Le second traite de la liquéfaction du gaz naturel où sont rappelées ses caractéristiques physico-chimiques et ses applications industrielles.
- Le troisième, correspond au problème de stockage et le choix du matériau ayant des propriétés thermique et mécanique désirées.
- Le calcul du dimensionnement des réservoirs de stockage, et de l'épaisseur d'isolant garantissant le taux d'évaporation minimal avec le moindre coût est abordée au chapitre quatre.
- Enfin, une conclusion générale pour situer notre contribution et les perspectives futures pour la continuité de ce travail.



I- FORMATION DU GAZ NATUREL

1.1 Le gaz naturel dans les conditions géologiques :

Au sens large, toute substance naturelle qui est à l'état gazeux dans les conditions normales de température et de pression est un gaz naturel. Il s'agit pour l'essentiel des hydrocarbures saturés d'un nombre de carbone inférieur à cinq [1].

Les propriétés physiques de ces fluides font que le plus souvent elles se trouvent soit à l'état supercritique, soit à l'état dissous dans l'eau. Ces fluides existent dans les roches et dans l'huile.

L'huile est constituée par les hydrocarbures dans lesquels prédominent ceux dont le nombre d'atomes de carbone est supérieur ou égal à cinq, et qui sont liquide dans les conditions normales de température et de pression.

Dans un bassin sédimentaire, lorsque la profondeur augmente, la température s'élève en moyenne de 30 °C / km, cette température varie avec le flux géothermique local et avec la conductivité thermique des sédiments (Voir **figure (1.1)**).

1.1.1 Régime hydrostatique :

C'est le régime qui correspond à un bassin sédimentaire supportant le poids de la colonne de fluides situés au-dessus de lui.

1.1.2 Régime géostatique :

C'est le régime qui correspond à un bassin sédimentaire supportant tout ou une partie du poids de la colonne de la roche.

1.1.3 Variation de la pression en fonction de la profondeur :

La pression des fluides contenus dans les puits des roches augmente de 10 MPa environ par kilomètre s'ils sont en régime hydrostatique, et jusqu'à 25 MPa / Km en régime géostatique.

La **figure (1.2)** montre un exemple de la variation de cette pression qui devient proche de la pression hydrostatique à partir de 5 Km de profondeur environ.

1.1.4 Variation de la solubilité en fonction de la profondeur :

La **figure (1.3)** montre l'augmentation sensible de la solubilité du gaz naturel avec la profondeur.

On remarque que la quantité dissoute dans l'eau pure peut dépasser 15 m^3 de gaz naturel par mètre cube d'eau dans les conditions normales.

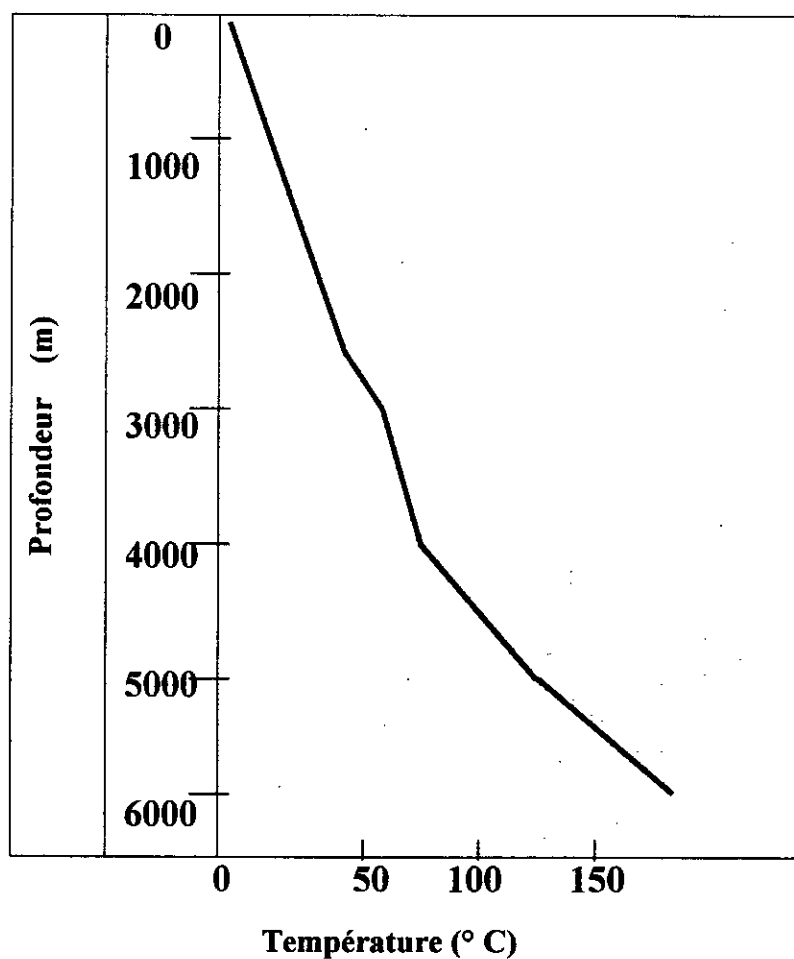


Figure (1.1) : Variation de la température du bassin sédimentaire en fonction de la profondeur [1].

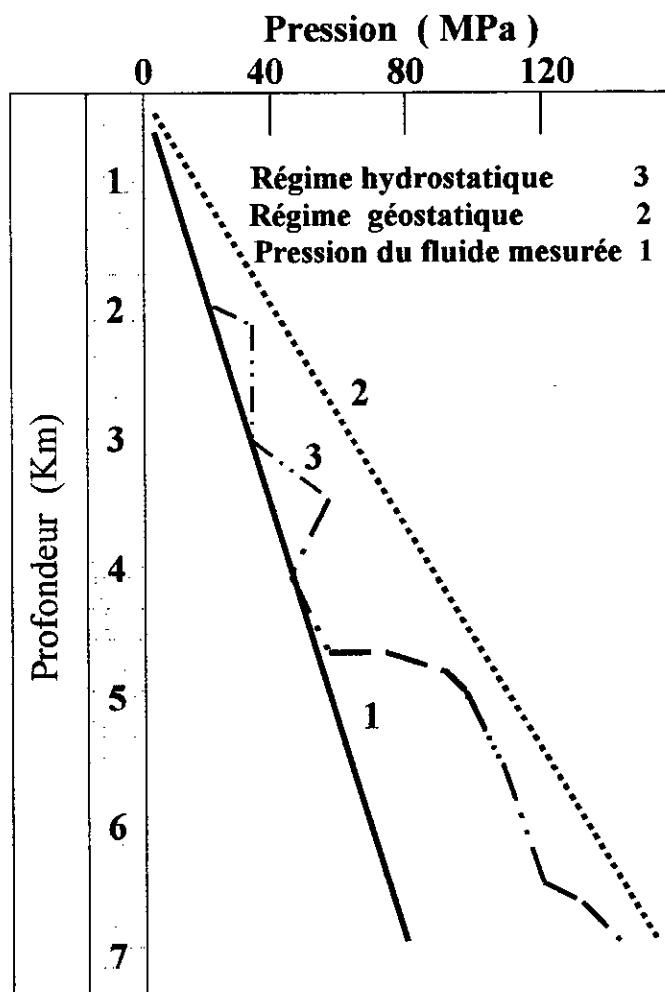


Figure (1.2) : Variation de la pression des fluides contenus dans les pores des sédiments [1].

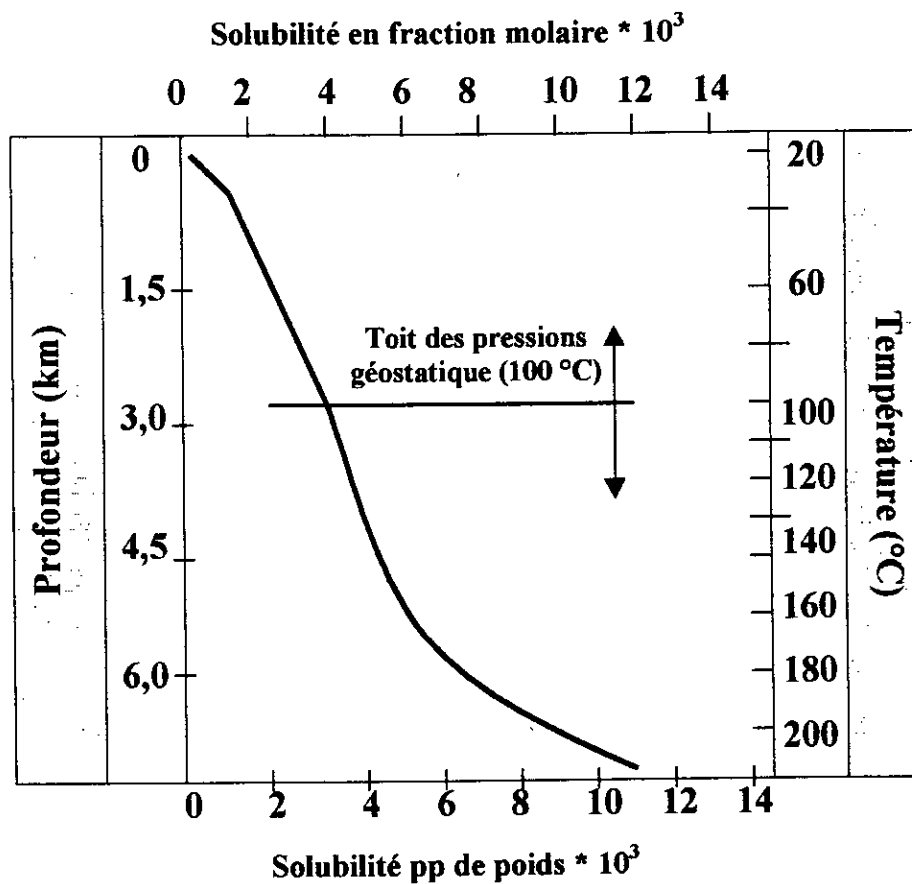


Figure (1.3) : Evolution de la solubilité du gaz naturel dans l'eau avec la profondeur [1].

1.2 Diversité de la composition des gisements de gaz naturel :

La composition des gisements de gaz naturel est très variable (tableau 1.1). Le tableau ci-dessous montre l'évolution de cet composition ainsi que l'époque de formation.

La phase gazeuse a de fortes chances d'être à l'état supercritique et sa densité varie de 0,1 à 0,2. Elle est plus proche de celle d'un liquide que celle d'un gaz.

GISEMENTS	AGE	CH ₄	C ₂ -C ₆	CO ₂	N ₂	H ₂	H ₂ S
KANE (ETATS UNIS)	Cénozoïque	99.30	44.40	-	0.1	0.1	-
SWEETWATER (ETATS UNIS)	Carbonifère	75.60	1.30	2.70	20.2	-	-
NEWAGO (ETATS UNIS)	Carbonifère	85.50	1.60	0.40	12.40	-	-
SPENCE (ETATS UNIS)	Carbonifère	91.00	4.80	0.10	3.60	-	-
SLOCHTEREN (PAYS-BAS)	Permien	81.30	3.50	0.80	14.40	-	-
LACQ (FRANCE)	Jurassique	74.00	2.00	9.00	-	-	15.00
PLAINE D'Allemagne DU NORD	Permien	95.00	12.00	60.00	99.00	70.00	0-8
CUMATO, SAKADA (JAPON)	Quaternaire	65.00	0.10	4.50	4-53	-	-
ANGLETERRE ORIENTAL	Permien	90.00	-	-	10.00	-	-
WEEDHORFF (ALLEMAGNE)	Permien	92.50	1.70	1.60	4.20	-	-
TOUMAZY (VOLGA-OURAL)	Dévonien	39.50	49.80	0.10	10.60	-	-
SOKOVKA (SUB-CAUCASE)	Crétacé	76.00	17.00	5.00	1.00	-	-
PLAINE DU PO (ITALIE)	Piocène	99.00	1.00	-	-	-	-
HASSI-R'MEL (ALGERIE)	Trias	80.00	15.00	-	5.00	-	-
PIAUI (BIRMANIE)	Trias	88.10	2.60	0.70	8.00	-	-
OURENGOI (SIBERIE OCCID)	Crétacé	98.50	0.10	0.20	1.10	-	-

Tableau (1.1) : Composition des gisements de gaz naturel [1].

La **figure (1.4)** montre la liaison entre l'huile et le gaz naturel dans les gisements d'hydrocarbures pour différentes situations.

Le cas (5) est celui d'un gaz à condensât. Le gisement contient des hydrocarbures liquides en proportion importante et ceux-ci sont dissous dans la phase gazeuse.

Dans la situation (4) la proportion d'hydrocarbures liquides est suffisamment importante pour que, dans les conditions thermodynamiques du gisement, deux phases coexistent : une phase gazeuse contenant des hydrocarbures dissous et une phase huile contenant du gaz dissous. Dans le cas (3), les constituants liquides deviennent majoritaires ; il s'agit d'un gisement d'huile contenant du gaz dissous. Dans le cas (2), les quantités d'hydrocarbures sont trop faibles pour faire apparaître une phase gazeuse à l'état dissous dans l'huile (gaz associé). Enfin, la situation (1) représente un gisement d'huile sans gaz associé.

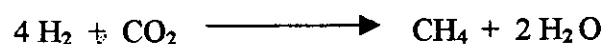
1.3 Origine des constituants du gaz naturel :

1.3.1 HYDROCARBURES :

Il existe trois modes possibles pour la formation des hydrocarbures gazeux naturels : un mode bactérien, un mode thermique et un mode inorganique. Toutefois, les deux premiers modes sont seuls responsables de la formation des hydrocarbures des gisements commerciaux actuellement connus.

- **Gaz bactérien :**

Le mode bactérien est dû à l'action des bactéries sur les débris organiques qui s'accumulent dans les sédiments. Le gaz ainsi formé est appelé gaz biochimique. L'action de ces bactéries dites Méthanogènes, a lieu au cours du dépôt des sédiments et au début de leur enfouissement. Le Méthane (CH_4) est le seul hydrocarbure formé, et cette formation résulte de la réaction :



Les substrats doivent donc exister à l'état dissous dans l'eau du milieu de sédimentation. L'hydrogène nécessaire est fourni par d'autres bactéries participant à l'écosystème bactérien.

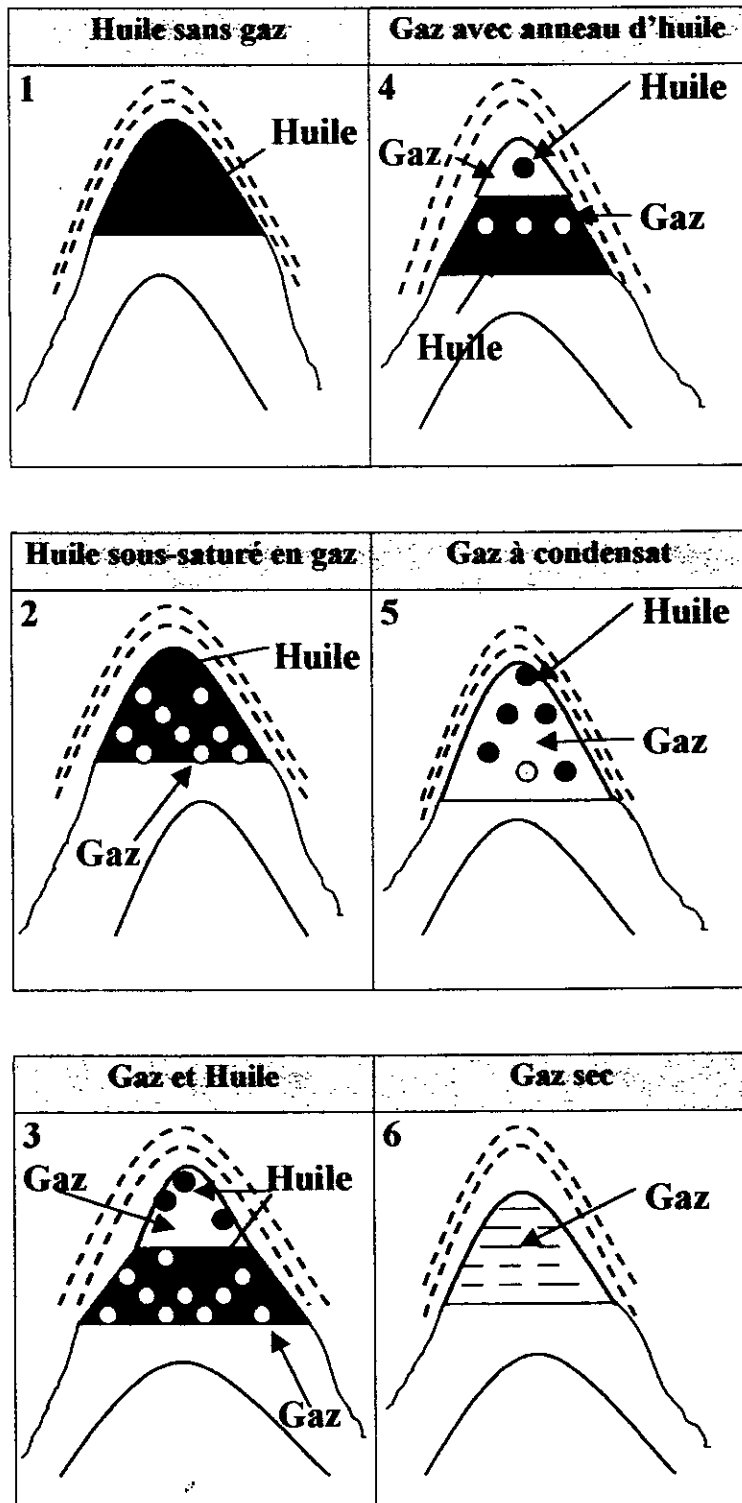


Figure (1.4) : Liaison « huile – gaz » dans les gisements [1].

- **Gaz thermique :**

Le mode thermique conduit à la formation de gaz naturel à partir de la matière organique présente dans certains niveaux sédimentaires. Les débris d'organismes qui s'accumulent à l'interface eau-sédiment sont dégradés par les organismes vivants, voir **figure (1.5)**.

- **Gaz inorganique :**

Le mode inorganique de formation des hydrocarbures reste très secondaire et on ne connaît pas actuellement de gisement de gaz de cette origine qui soit exploité industriellement.

1.3.2 CONSTITUANTS NON-HYDROCARBURES :

- **Constituants majeurs :**

On peut citer le dioxyde de carbone (CO_2) et l'hydrogène sulfuré (H_2S).

- **Constituants mineurs :**

On peut citer l'hydrogène, l'hélium, l'argon, le Krypton, le Néon, le Radon, le Mercure et l'arsenic.

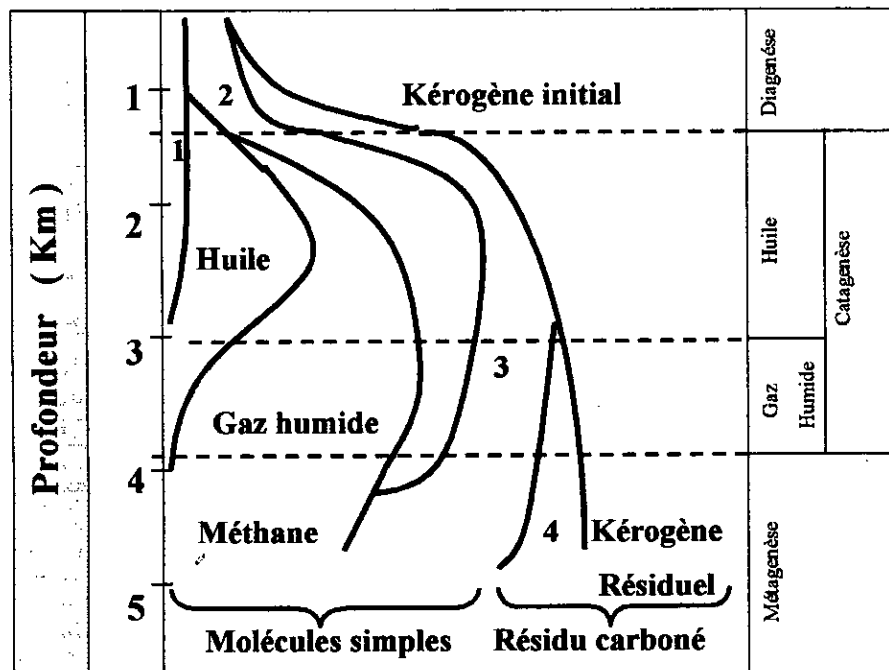


Figure (1.5) : La dégradation des matières organiques sédimentaires [1].

1.4 Formation des gisements de gaz naturel :

Un gisement de gaz naturel occupe l'espace poreux intergranulaire ou les fissures d'une roche que l'on appelle roche-magazine, roche réservoir ou simplement réservoir. La perméabilité de cette roche doit être suffisante pour obtenir un débit de gaz permettant une exploitation rentable. La **figure (1.6)** montre les étapes successives de l'enfouissement d'un bassin sédimentaire et formation progressive de l'huile et du gaz naturel.

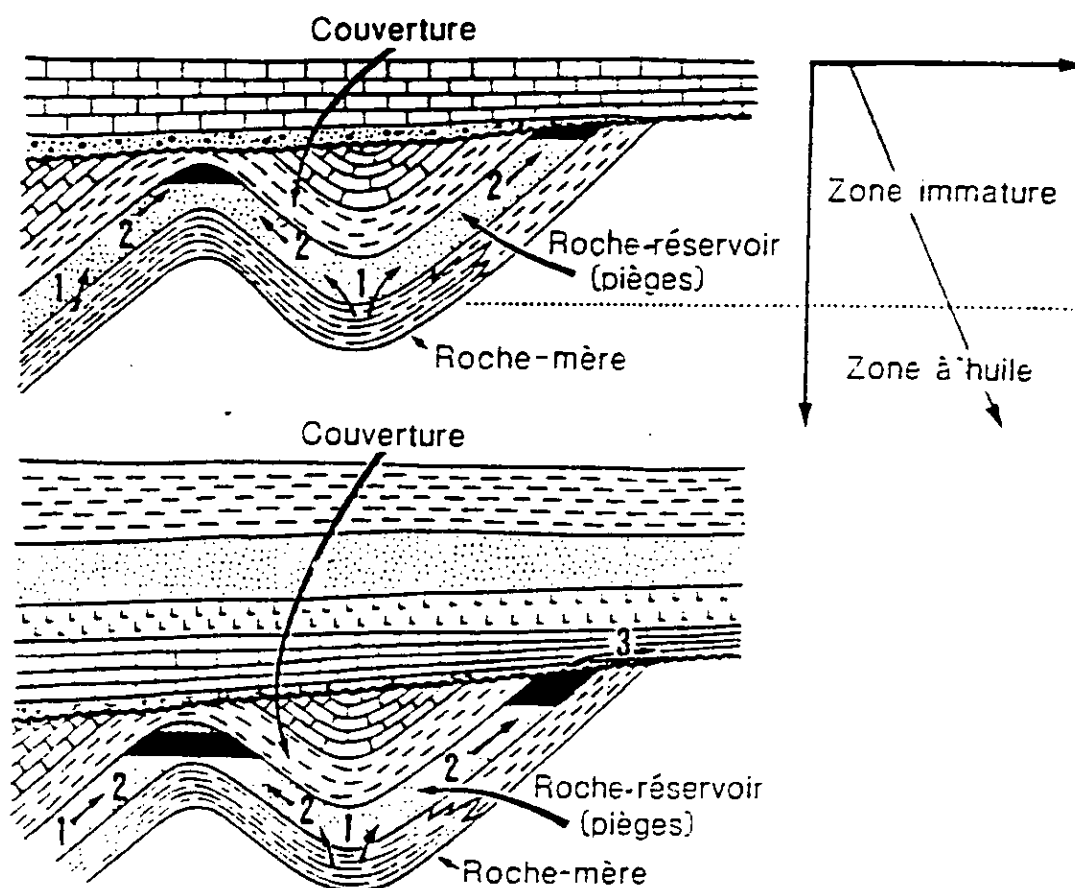


Figure (1.6) : Etapes successives de l'enfouissement d'un bassin sédimentaire et formation progressive de l'huile et du gaz [1].

1.5 Propriétés physico-chimiques du gaz naturel :

Les propriétés physiques d'un gaz naturel sont déterminées expérimentalement à partir d'un échantillon donné. L'échantillon prélevé doit être représentatif, et la technique d'échantillonnage revêt donc une grande importance.

1.5.1 Nature des constituants présents dans le gaz naturel :

Le tableau (1.2) présente quelques constantes physiques pour les principaux constituants présents dans le gaz naturel (masse molaire M , température de fusion T_{FS} , température d'ébullition T_b , volume molaire liquide V_1 déterminé au point normal d'ébullition).

	Composés	M(kg/ kmole)	T_{FS} (k)	T_b (k)	V_1 (m ³ /kmol)
Eléments	HYDROGENE	2.016	13.95	20.39	0.028604
	HELIUM	4.003	1.76	4.22	0.032275
	AZOTE	28.014	63.15	77.35	0.034478
	OXYGENE	31.999	54.36	90.17	0.028020
Composés minéraux	EAU	18.015	273.15	373.15	0.018069
	OXYDE DE CARBONE	28.010	668.15	81.70	0.035456
	DIOXYDE DE CARBONE	44.010	216.58	194.67	0.037278
	HYDROGENE SULFURE	34.082	187.68	212.80	0.036142
Paraffines	METHANE	16.043	90.67	111.66	0.037832
	ETHANE	30.070	90.35	184.55	0.055203
	PROPANE	44.097	85.46	184.55	0.075642
	I-BUTANE	58.123	113.54	261.43	0.097704
	N-BUTANE	58.123	134.86	272.65	0.096553
	N-PENTANE	72.150	143.42	309.22	0.116126
	N-HEXANE	86.177	177.84	341.88	0.131306
Cyclo- paraffines et paraffines	N-HEPTANE	100.204	182.57	371.558	0.147014
	N-OCTANE	114.231	216.38	398.83	0.163505
	N-NONANE	128.258	219.63	423.97	0.179321
	N-DECANE	142.258	243.49	447.30	0.195342
	CYCLOPENTANE	70.134	179.31	322.40	0.093509
	CYCLOHEXANE	84.161	279.69	353.87	0.108860
Aromatiques	BENZENE	78.114	278.68	353.24	0.089495
	TOLUENE	92.141	178.18	383.78	0.106556
	ETHYLBENZENE	106.167	178.20	4409.38	0.122681
	ISOPROPYLBENZENE	120.194	177.144	4425.56	0.1397798

Tableau (1.2) : « Constantes physiques des constituants du gaz naturel »[1]

Le tableau (1.3) indique les compositions les plus courantes d'un gaz sec et d'un gaz humide ou à condensât.

CONSTITUANTS		GAZ SEC	GAZ HUMIDE
HYDROCARBURES	Méthane	70-98	50-92
	Ethane	1-10	5-15
	Propane	TRACES-5	2-14
	Butane	TRACES-2	TRACES-5
	Pentane	TRACES-1	TRACES-3
	Hexane	TRACES-0.5	TRACES-15
	Heptane	0-TRACES	TRACES-10
NON HYDROCARBURES	Azote	TRACES-15	TRACES-10
	Dioxyde de Carbone	TRACES -1	TRACE-4
	Hydrogène Sulfuré	0-TRACES	0-6
	Hélium	0-5	0

Tableau (1.3):« Compositions types d'un gaz sec et d'un gaz humide »[1].

1.5.2 Propriétés volumiques :

a- Densité et masse volumique :

La masse volumique du GN représente la masse d'une unité de volume du gaz et s'exprime en kg / m^3 . Elle est fonction de la température et de la pression.

La densité d'un gaz est définie comme le rapport de la masse volumique du gaz dans des conditions de référence sur la masse volumique de l'air dans les mêmes conditions.

Donc :

$$d_{\text{GN}} = M_{\text{GN}} / M_{\text{A}} \quad (1.1)$$

Avec :

M_{GN} : La masse molaire du gaz naturel.

M_{A} : La masse d'un égal volume de l'air.

b- Compressibilité du gaz naturel :

Le facteur de compressibilité Z varie avec la pression, il tend vers 1 lorsque la pression tend vers zéro.

Le comportement du gaz se rapproche alors de celui d'un gaz parfait lorsque la pression augmente, il passe par un minimum avant de croître pour les pressions élevées.

En l'absence de mesure expérimentale, le facteur Z peut être estimé par des relations empiriques si la composition du gaz est connue.

• Méthode d'estimation :

Elle consiste à estimer le facteur Z à partir des coordonnées réduites P_r et T_r en utilisant l'abaque donnée par la figure (1.7a) et (1.7b) :

$$P_r = P / P_{\text{pc}} \quad \text{et} \quad T_r = T / T_{\text{pc}} \quad (1.2)$$

Les termes $P_{\text{pc}}, T_{\text{pc}}$ représentent respectivement la température et la pression critique du gaz et sont définis par les relations de Kay (1936) [1] :

$$P_{\text{pc}} = \sum Y_i P_{\text{ci}} \quad \text{et} \quad T_{\text{pc}} = \sum Y_i T_{\text{ci}} \quad (1.3)$$

En désignant par P_{ci} et T_{ci} la pression et la température critique, et par Y_i la fraction molaire du constituant i présent dans le mélange.

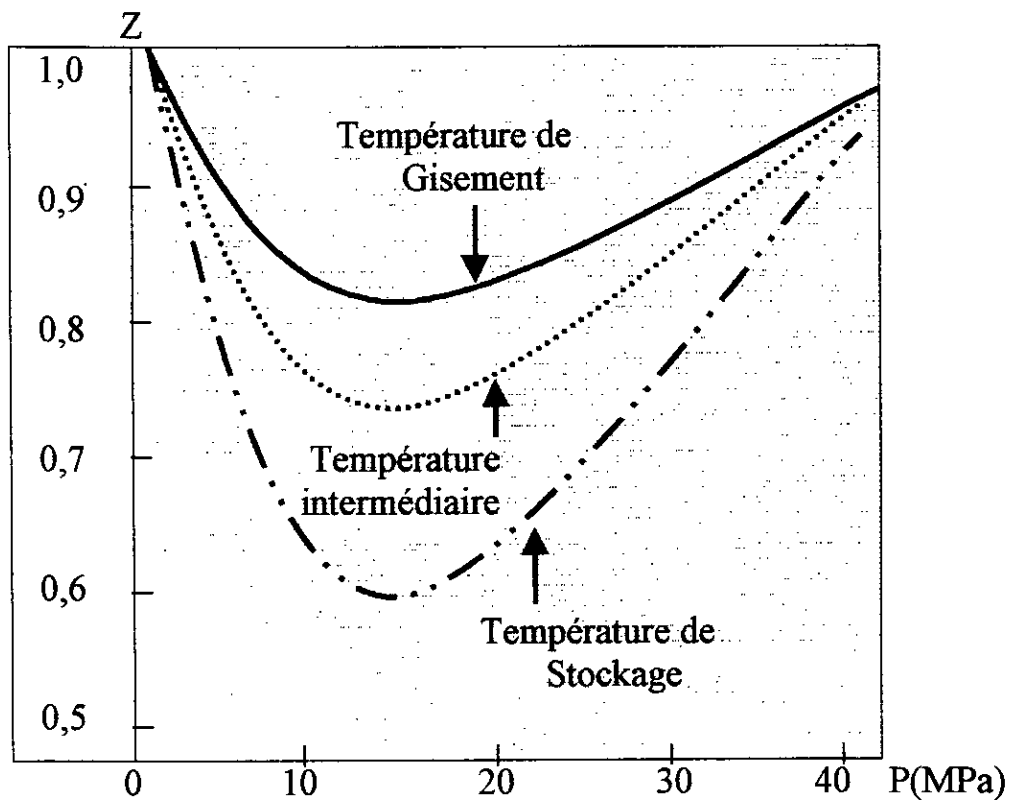


Figure (1.7a): Evolution du facteur de compressibilité en fonction de la pression.

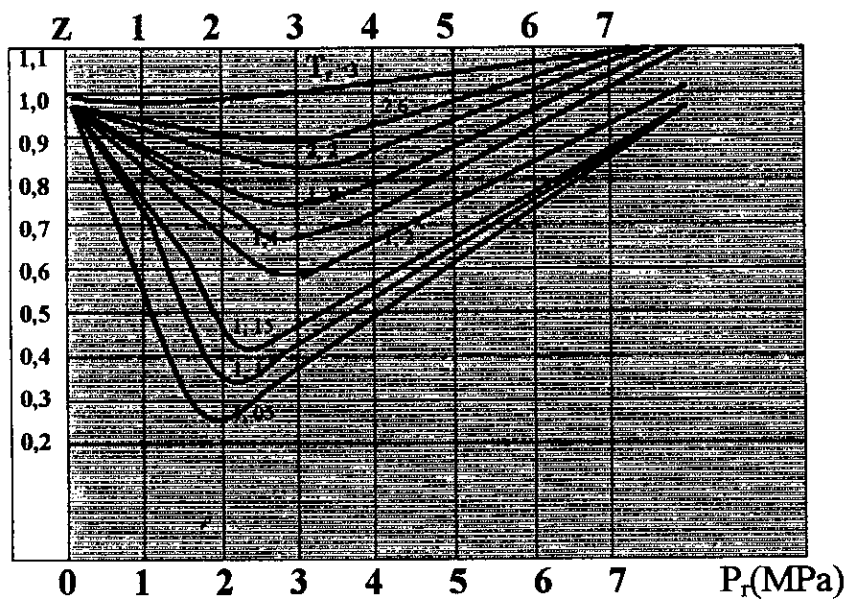


Figure (1.7b) : Détermination du facteur de compressibilité Z en fonction des coordonnées réduites P_r et T_r [1].

c- Viscosité du gaz naturel :

A basse pression, la viscosité dynamique d'un mélange de gaz naturel peut être estimée à partir de la viscosité des corps purs par la relation de **Herning** (1936) [1] :

$$\mu = \left\{ \sum \mu_j y_j M_j^{1/2} \right\} / \left\{ \sum y_j M_j^{1/2} \right\} \quad (1.4)$$

Dans la relation (1.4) y_j , M_j et μ_j représentent respectivement ; la fraction molaire, la masse molaire et la viscosité du constituant j présent dans le mélange.

Cette méthode s'applique lorsque la composition du gaz est connue. Connaissant cette composition, la viscosité du gaz naturel à la pression atmosphérique est donnée par la relation (1.4). Le diagramme de (**Carr**) 1954 permet également d'évaluer cette viscosité, pour différentes températures en fonction de la densité ou de la masse molaire considérée. L'abaque présente sur la **figure (1.8)** fournit le rapport de la viscosité du gaz naturel sous pression à la viscosité du gaz à la pression atmosphérique en fonction des coordonnées réduites P_r et T_r .

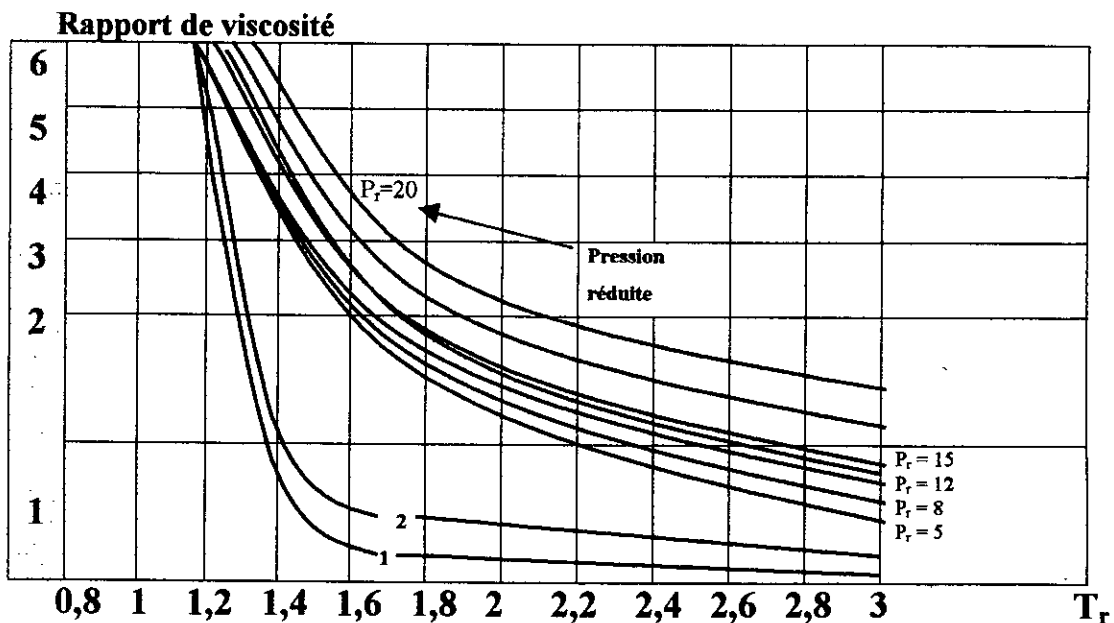


Figure (1.8) : Variation du rapport de viscosité en fonction de la pression et de la température réduites [1].

d- Pouvoir calorifique :

Les transactions commerciales sur le gaz naturel sont généralement basées sur le contenu énergétique du gaz, obtenu en multipliant les volumes mesurés par le pouvoir calorifique supérieur.

Le pouvoir calorifique d'un combustible à T (°C) est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité unitaire de ce combustible. Lorsque le combustible contient de l'hydrogène ou des produits hydrogénés, il se forme de l'eau. Le pouvoir calorifique inférieur (P.C.I) est obtenu en supposant l'eau à l'état de vapeur dans les produits de combustion, tandis que le pouvoir calorifique supérieur (P.C.S) tient compte de la chaleur de condensation de l'eau.

• Estimation du pouvoir calorifique :

Connaissant la composition du gaz naturel, son pouvoir calorifique peut être estimé par pondération linéaire à partir du pouvoir calorifique de chacun des constituants, en assimilant le mélange gazeux de départ et les produits de réaction à des mélanges de gaz parfaits :

$$PC = \sum PC_i Y_i \quad (1.5)$$

Avec :

PC_i : Le pouvoir calorifique du constituant i (PCI ou PCS) en KJ/m^3 ou KJ/mol ,

Y_i : La fraction molaire du constituant i dans le gaz naturel,

PC : Pouvoir calorifique du gaz naturel exprimé en KJ/m^3 ou KJ/mol .

Le **tableau (1.4)** indique le pouvoir calorifique inférieur et supérieur des principaux constituants du gaz naturel.

Constituants	Formule Chimique	Masse molaire (kg / k mol)	Masse spécifique (kg / m ³)	PCS (kJ / m ³)	PCI (KJ / m ³)
Méthane	CH ₄	16.043	0.7175	39936	35904
Ethane	C ₂ H ₆	30.070	1.355	70498	64404
Propane	C ₃ H ₈	44.097	2.010	101364	93146
n-Butane	n C ₄ H ₁₀	58.123	2.709	134415	123910
i-Butane	i C ₄ H ₁₀	58.123	2.707	153851	123356
n-Pentane	n C ₅ H ₁₂	72.150	3.51	172189	159045
n-Hexane	n C ₆ H ₁₄	86.177	4.31	210226	194445
n-Heptane	n C ₇ H ₁₆	100.200	5.39	261390	242007
Benzène	C ₆ H ₆	78.114	3.83	162219	155582
Toluène	C ₇ H ₈	92.141	4.84	207717	198242
Hydrogène Sulfuré	H ₂ S	34.082	1.536	25369	23338

Tableau (1.4): Les pouvoirs calorifiques des principaux constituants du GN [1].

1.6 INTERET DU GAZ NATUREL :

De par sa composition, le gaz naturel peut être utilisé comme combustible. Dans ce cas, il doit être vendu à un prix qui lui permette de concurrencer le charbon, l'électricité et les produits pétroliers.

Comme tous les combustibles gazeux, le gaz naturel présente maints avantages techniques :

- Réduction des investissements (simplicité du matériel de combustion) ;
- Facilité des réglages, donc possibilité de hauts rendements ;
- Frais réduits d'exploitation et d'entretien, en raison de la « non – corrosion » du matériel utilisé.

Le gaz naturel présente des avantages spécifiques (sa non – toxicité , et la constante de sa composition) ; l'absence du soufre permet des réglages stables et évite la pollution atmosphérique.

D'autre part, le marché domestique (utilisations individuelles) est certainement le domaine privilégié du gaz naturel car son abondance permet d'absorber une part notable de la demande du marché de la production d'eau chaude et du chauffage central individuel ; d'autre part le marché commercial de consommation des établissements publics ou privés (collectivités, boulangeries, chaufferie collective,.....).

1.7 PRODUCTION DU GAZ NATUREL :

Au cours de la phase de migration primaire, les hydrocarbures formés au sein de la roche mère sont expulsés vers un milieu de porosité plus élevée; dans lequel ils peuvent se déplacer aisément pour atteindre au cours de la phase de migration secondaire, la roche réservoir dans laquelle ils sont piégés.

Il existe différents types de pièges, on distingue en particulier les pièges structuraux et les pièges stratigraphiques.

1.7.1 Pièges structuraux :

Les pièges structuraux sont dus à une déformation de la roche, qui peut former un anticlinal.

1.7.2 Les pièges stratigraphiques :

Les pièges stratigraphiques sont dus à une variation de faciès, la zone perméable fait place à une zone imperméable.

Le gisement de gaz naturel est formé par un ou plusieurs réservoirs et la découverte puis l'évaluation d'un piège potentiel, fait appel à des techniques d'exploitations géologiques et géophysiques. L'identification du piège nécessite des forages d'exploration, qui permettent de détecter la présence d'hydrocarbures (puits de découverte). Ces forages d'exploration sont suivis de forages d'appréciation qui, à la suite d'essais de puits conduisent à décider ou non du développement du gisement.

1.7.3 Opération de forage :

La technique de forage consiste à entraîner en rotation un outil, au moyen de tiges en acier constituées de tubes que l'on visse les uns après les autres au fur et à mesure que le système descend dans le puits; le dernier élément est constitué par une tige carrée s'emboîtant au niveau de la plate forme sur la table de rotation qui entraîne l'ensemble des tiges. L'utilisation d'un fluide de forage est indispensable, compte tenu qu'il sert à refroidir l'outil de forage et le maintien des pressions hydrostatiques en contrebalançant la pression de l'eau, d'huile et de gaz naturel dans les couches rencontrées; il est constitué par un mélange d'eau, d'argile et de polymères.

1.7.4 Traitement du gaz naturel :

Le traitement du gaz naturel consiste à séparer au moins partiellement certains des constituants présents à la sortie du puits tels que l'eau, les gaz acides et les hydrocarbures lourds pour amener le gaz à des spécifications de transport ou à des spécifications commerciales.

En règle générale, le Méthane est le principal constituant ; il présente environ 70 à 95 % du volume total du mélange; c'est pourquoi on emploie souvent le mot « Méthane » pour désigner le gaz naturel lui-même. Les autres hydrocarbures gazeux sont beaucoup moins abondants, ils dépassent rarement 15 à 20 % du mélange ; l'Ethane y est en général plus abondant que le propane et les butanes.

Lorsque la teneur en Ethane est élevée, le gaz naturel devient très intéressant comme source d'Ethylène pour l'industrie pétrochimique. Le propane et les butanes sont couramment extraits du gaz et constituent ce que l'on appelle les « gaz de pétrole liquéfiés » (GPL).

Les hydrocarbures plus lourds, qui se trouvent dans le gaz à l'état de vapeur, mais qui sont à l'état liquide dans les conditions normales de température et pression, constituent l'essence naturelle ou « gazoline » qui, après traitement, est apte aux mêmes usages que l'essence tirée du pétrole.

Les autres constituants sont des impuretés, dont certaines doivent être éliminées aussi complètement que possible. L'azote est un gaz inerte, que l'on n'est donc pas obligé d'extraire, mais qui diminue le pouvoir calorifique du gaz acide. Finalement la présence de carbone et de l'hydrogène sulfuré rend le gaz acide et corrosif.



II- LIQUEFACTION DU GAZ NATUREL

2.1 Définition de la liquéfaction d'un gaz :

La liquéfaction d'un gaz consiste à lui retirer de l'énergie afin de le refroidir depuis la température ambiante jusqu'à son point de rosée, puis de condenser la vapeur saturée.

La liquéfaction fait appelle à la notion de « **Cryogénie** ».

2.1.1 Cryogénie :

Pour tenter de définir la cryogénie, examinons tout d'abord l'échelle de température thermodynamique (**figure 2.1**). La frontière entre la cryogénie et la réfrigération a toujours été essentiellement fluctuante dans le temps et dans l'espace.

Lorsque l'oxygène fut liquéfié pour la première fois par **Pictet et Cailletet** , la notion de cryogénie ne s'apprécie pas de la même façon dans un centre de recherches travaillant couramment à quelques milli-kelvins , ou dans une installation industrielle testant le moteur du troisième étage d'**Ariane V** [2].

La caractéristique sans doute principale de développement des basses températures est en fait, l'affrontement constant et très fertile entre avancée technologique et compréhension fondamentale de la nature. La température caractérise l'énergie cinétique des constituants d'un corps. Ainsi, abaisser la température, c'est laisser la possibilité de distinguer des propriétés très souvent inconnues de la matière ; mais l'essentiel, c'est le test de la validité des théories scientifiques, habituellement masquées par l'agitation thermique à la température ordinaire.

La richesse de la cryogénie est bien caractérisée par la douzaine de prix « **Nobel** » attribués dans ce domaine. La **figure (2.2)** présente les principales étapes dans l'obtention des basses températures et quelques découvertes associées.

Les technologies de pointe préparant le 21^{ème} siècle utilisent aussi largement la cryogénie, (**figure (2.3)**). Ces exemples, sans être exhaustifs, montrent la diversité des applications cryogéniques.

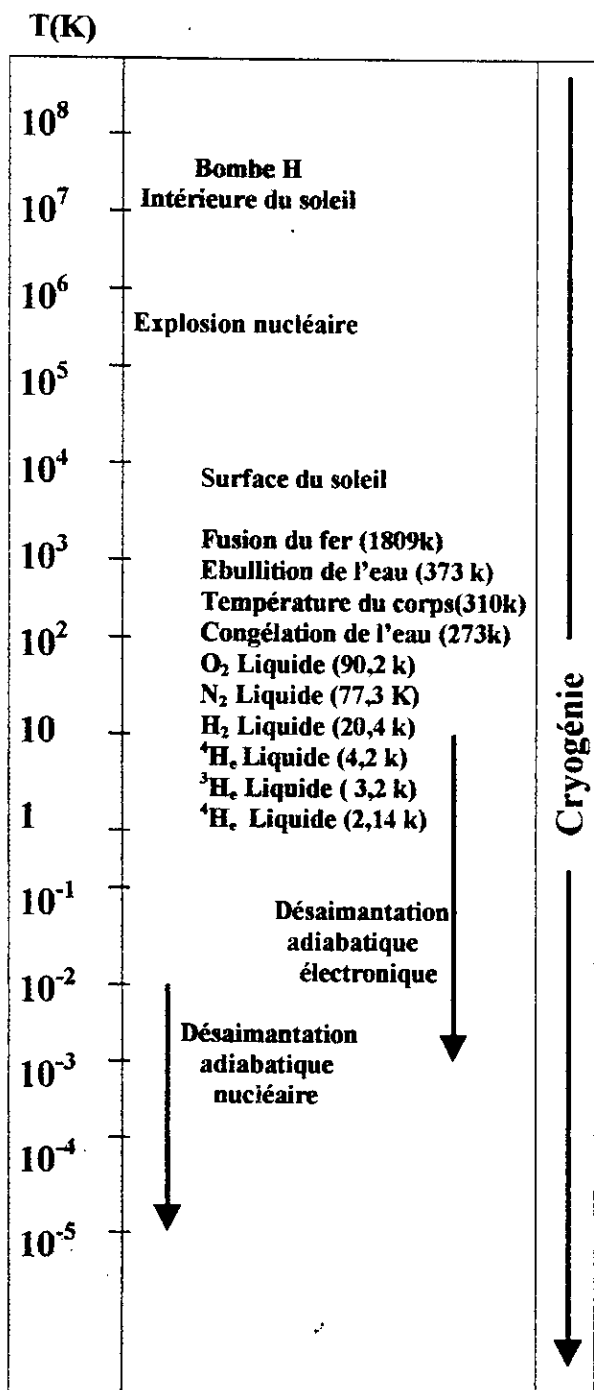


Figure (2.1) : Echelle de température Thermodynamique [2].

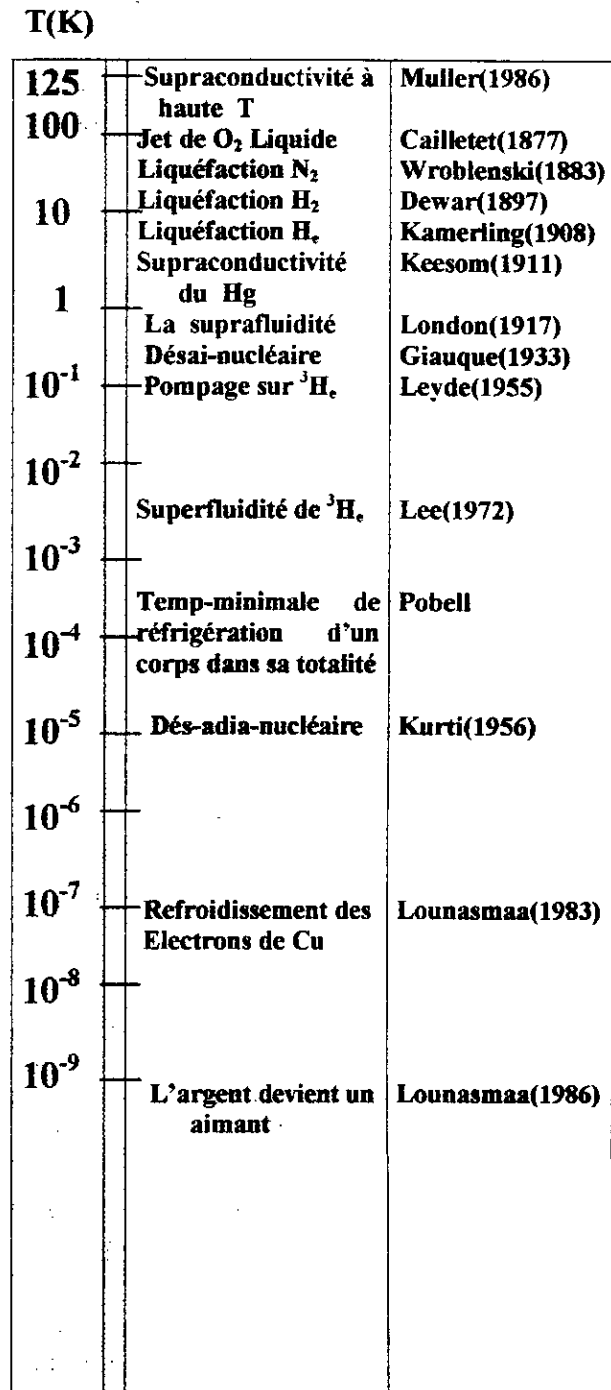


Figure (2.2) : Différentes étapes vers les basses températures [2].

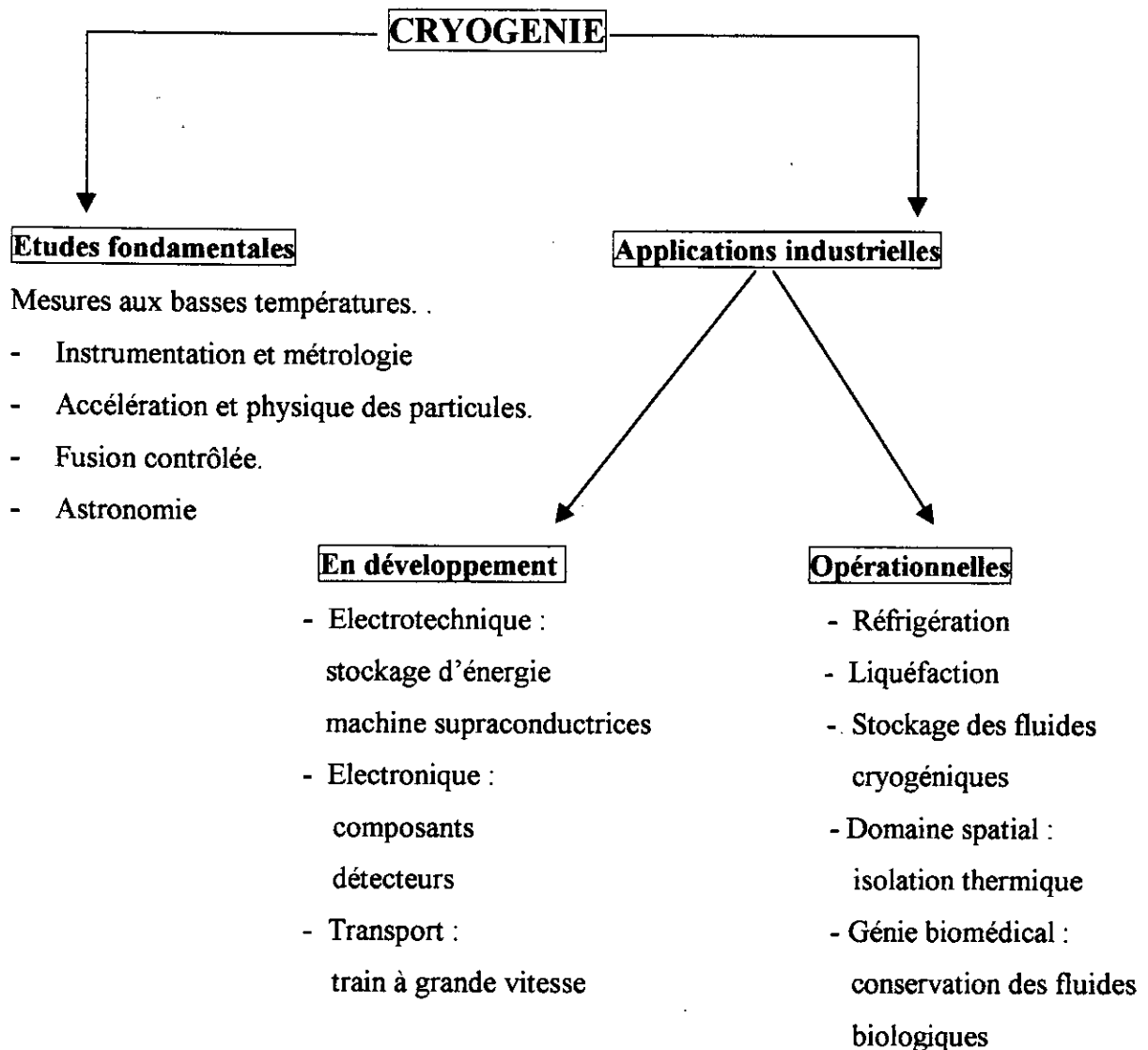


Figure (2.3): Schéma montrant les principaux domaines de la cryogénie [2].

2.2 La liquéfaction pour l'ingénieur :

La liquéfaction pour l'ingénieur est avant tout un outil. En effet, le développement d'une application faisant appel à la cryogénie, nécessite de refroidir l'appareillage concerné par des moyens simples (bain cryogénique par exemple) ou plus complexes (installation de réfrigération et de liquéfaction). Cet ensemble est placé dans une enceinte adaptée (le cryostat), où son fonctionnement autonome nécessite la présence de moyens de stockage des fluides cryogéniques.

Naturellement, le travail dans des conditions de température très éloignées de celle rencontrées dans la réalité nécessite une adaptation importante des connaissances de l'ingénieur :

- Au plan fondamental, une étude particulière de propriétés physiques,
- Une expérience nécessitant de rassembler un ensemble de techniques délicates (Technique du vide, isolation thermique, instrumentation bas niveau,....).

2.3 Liquéfaction du gaz naturel :

Le premier liquéfacteur du gaz naturel a vu le jour en 1917 à « **CHICAGO** » [3]. En 1944 , deux expériences à petite échelle (40 millions de mètres cubes de gaz naturel par an) ont eu lieu à « **CLEVELAND** ».

En **ALGERIE** , Le 24 Septembre 1964 c'est la date correspondant à la mise en service de l'usine de liquéfaction d'Arzew.

2.4 Procédés de liquéfaction :

2.4.1 Cascade classique pour liquéfier le gaz naturel : [4]

Le gaz naturel privé de son CO_2 et H_2S passe par un traitement chimique séché. Un absorbant est refroidi puis condensé et enfin sous refroidi successivement par les trois fluides réfrigérants suivants :

- **PROPANE** jusqu'à $-40\text{ }^\circ\text{C}$ environ.
- **ETHYLENE** ou **ETHANE** à $-90\text{ }^\circ\text{C}$ environ.
- **METHANE** à $-151\text{ }^\circ\text{C}$ environ.

Pour diminuer le travail de réfrigération , nous avons intérêt à effectuer la condensation quasi totale du GN par le deuxième fluide réfrigérant.

Dans ce cas , on a deux possibilités :

- 1- L'Ethylène est pris à une pression largement supérieure à la pression atmosphérique.
- 2- Ethane est sous vide (basse pression).

- **Solution proposée :**

En général, malgré la nécessité de transport ou de la fabrication sur place dans une installation spéciale, on préfère utiliser l'Ethylène qui permet de travailler au-dessus de la pression atmosphérique.

Pour diminuer le travail de compression, chaque cycle frigorifique est divisé en 3 ou 4 étages de pression, ce qui augmente le nombre d'échangeurs et la surface totale d'échange.

2.4.1.1 Description générale du procédé : (figure 2.4)

- **Etage 1 :**

Elle est constituée par un cycle Propane, comporte un compresseur qui amène le fluide frigorigène à une pression telle que celui-ci se condense par échange thermique avec de l'eau (soit 10 bars pour le Propane se condensant à 30 °C par échange thermique avec l'eau de mer à 25 °C). Le liquide obtenu est détendu et vaporisé à la pression atmosphérique, soit dans le cas du Propane à - 42 °C, cette vaporisation dégage une quantité de froid voisin de celle qui correspondrait à la condensation à 30 °C.

Le gaz obtenu par vaporisation est recyclé à l'aspiration du compresseur, la quantité de froid ainsi transférée est utilisée pour condenser l'Ethylène.

- **Etage 2 :**

L'Ethylène constitué un deuxième étage de refroidissement, il est comprimé par un compresseur à 19 bars et se condense à 28,8 °C par échange thermique avec le Propane, il est alors détendu et vaporisé à son tour puis recyclé à l'aspiration du compresseur à quatre niveaux de pression et de température.

- **Etage 3 :**

Il est constitué par un cycle Méthane condensé à - 96 °C après compression à 28,7 bars et vaporisé à trois niveaux de pression et de température dont le plus faible est de - 154 °C à la pression de 0,5 bars.

La dernière étape du procédé consiste à détendre le GN comprimé et sous refroidi à la pression de 0,56 bars, ce qui correspondrait à une température de - 162,8 °C de sous refroidissement. C'est à ce niveau de température que doit être produit le gaz naturel liquéfié.

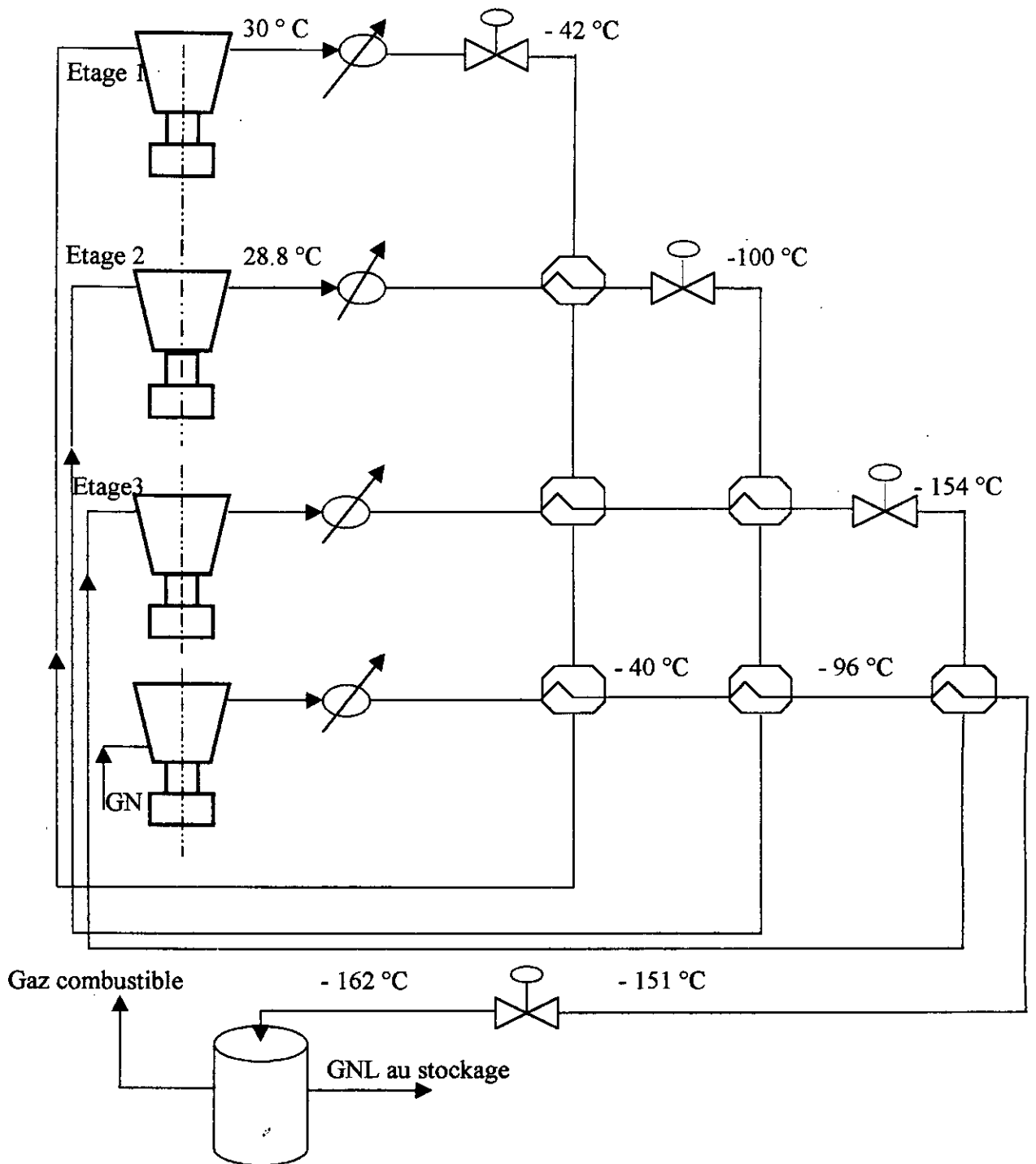


Figure (2.4) : Cycle à cascade classique [4]

Analyse du cycle :

Le cycle de ce procédé est compliqué à cause :

- De l'augmentation du nombre d'étages de refroidissement.
- De la liaison profonde des cycles ayant les mêmes buts. A titre d'exemple le refroidissement du Méthane comprimé par l'eau de mer puis par les deux étages du Propane et le premier cycle d'Ethylène.

D'un autre coté , ce cycle présente de sérieux inconvénients :

- Grand nombre de compresseurs interdépendants,
- Complexité du schéma donc complexité technologique, en particulier la multiplication du nombre d'échangeurs,
- Complexité du réglage due à l'interférence des différents cycles.
- Nécessité de constituer et de stocker des capacités importantes de fluides frigorigènes purs,
- Investissement relativement élevés.

2.4.2 Cascade incorporée : [5]

C'est encore un cycle à cascade, c'est-à-dire que les frigorifiques sont encore transférées d'étage jusqu'au niveau de température voulue , mais le fluide frigorigène est unique car il est constitué par un mélange adéquat des composants du gaz naturel traité.

La pression de condensation dans chaque étage n'est pas partielle et la composition du fluide frigorigène est choisie de manière à ce que la condensation partielle pour un étage considéré correspond exactement aux quantités de frigorifiques nécessaires à l'état suivant.

D'une manière générale, ce procédé est plus simple que le procédé à cascade classique, par le fait qu'il utilise un fluide frigorigène unique (mélange d'hydrocarbures et d'azote adapté) et qu'il permet de résoudre un certain nombre de problèmes rencontrés dans le premier cycle.

2.4.2.1 Description générale du procédé : (figure 2.5)

Le fluide frigorigène est comprimé dans un turbocompresseur jusqu'à la pression de 32 bars. Il est ensuite partiellement liquéfié dans un réfrigérant à eau de mer, à 35 °C par exemple, et séparé en deux phases dans un séparateur (S1) qui suit le réfrigérant :

- Une phase liquide.
- Une phase vapeur.

- 1- La phase liquide est sous-refroidie dans l'échangeur (E1) jusqu'à la température de (- 40 °C), puis détendu à travers une vanne jusqu'à la pression de 2,7 bars. Sa vaporisation dans l'échangeur (E1) va fournir d'une part la quantité de froid nécessaire au pré-refroidissement du GN jusqu'à - 40°C ; d'autre part, les frigories nécessaires à une deuxième condensation partielle du fluide frigorigène constituant ainsi la source chaude du deuxième étage à cascade.
- 2- Après sa vaporisation et réchauffe simultanées jusqu'à la température ambiante, le fluide frigorigène est renvoyé à l'aspiration du compresseur de cycle. La phase vapeur est refroidie dans l'échangeur (E1) jusqu'à - 40 °C et subit de ce fait, une nouvelle condensation partielle. On obtient à nouveau deux phases (liquide et vapeur) dans le séparateur (S2).
- 3- La phase liquide, après un sous refroidissement jusqu'à - 90 °C dans l'échangeur (E2) est détendue jusqu'à 2,9 bars , puis vaporisé dans l'échangeur (E2) en fournissant les frigories nécessaires à la poursuite du refroidissement de GN et à la poursuite de la condensation du gaz de cycle.
- 4- Après vaporisation dans l'échangeur (E1), le gaz est mélangé avec le liquide de l'étage précédente dont il favorise la vaporisation dans (E1); l'ensemble est ensuite envoyé à l'aspiration du compresseur du cycle. On procède ainsi successivement d'étage en étage jusqu'à ce que la température désirée soit atteinte. Le GN est généralement envoyé dans l'installation de liquéfaction sous une pression comprise entre 30 et 50 bars; sa liquéfaction s'échelonne entre -70 °C et - 110 °C selon la pression et la composition, Enfin, il est sous refroidi.

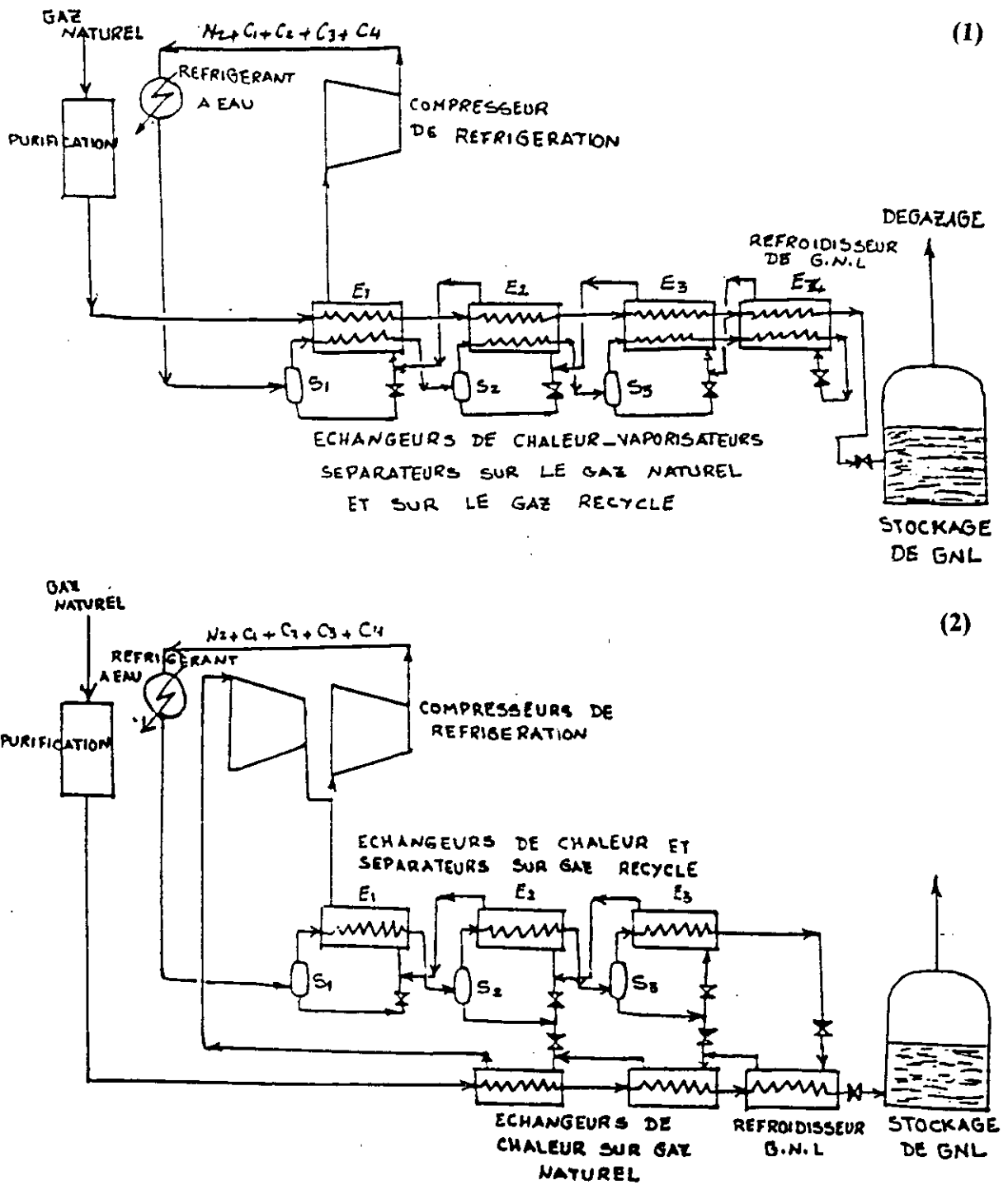


Figure (2.5) : Cycle à cascade incorporée [5]
 1 - A une pression d'aspiration
 2 - A deux pressions d'aspiration

2.5 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES DU G.N.L :

2.5.1 Composition du G.N.L :

La composition moyenne en masse du gaz naturel liquéfié, après traitement est donné par [6] :

METHANE: 80.00 %

ETHANE: 13.60 %

PROPANE: 6.40 %

La composition molaire est donné par :

89.301 % de METHANE

8.100 % d'ETHANE

2.599 % de PROPANE

Donc la masse molaire du G.N.L est :

$$M_{G.N.L} = 17.9 \text{ g / mol.}$$

2.5.2 Caractéristiques physiques du G.N.L :

a- Densité :

La norme française donne l'expression de la densité par la relation suivante :

$$d (20 \text{ } ^\circ\text{C} , 4 \text{ } ^\circ\text{C}) = P_{\text{produit}} (20 \text{ } ^\circ\text{C}) / P_{\text{eau}} (4 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2.1)$$

Avec : P_{produits} : Le poids d'un volume V de produits à $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.
 P_{eau} : Poids d'un égal volume V d'eau à $T = 4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

b- Variation de la masse volumique avec la température :

La **figure (2.6)** montre la variation de la masse volumique du Méthane, de l'Ethane et de Propane en fonction de la température. On remarque que la masse volumique ρ évolue en sens inverse de la température pour les trois fluides.

La masse volumique du G.N.L $\rho_{G.N.L}$ évolue en sens inverse de la température; On assimile alors la masse volumique du G.N.L considéré à celle du G.N.L de (**BRUNEI**), (**figure 2.7**) [7].

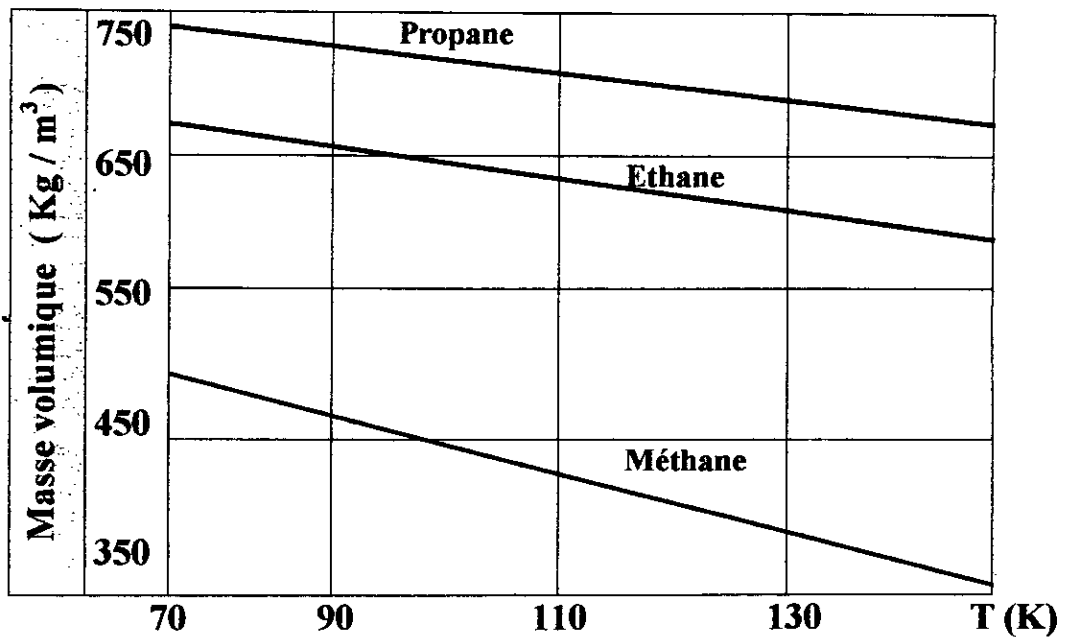


Figure (2.6) : Variation de la masse volumique de CH_4 , C_2H_6 et C_3H_8 liquides en fonction de la température [7].

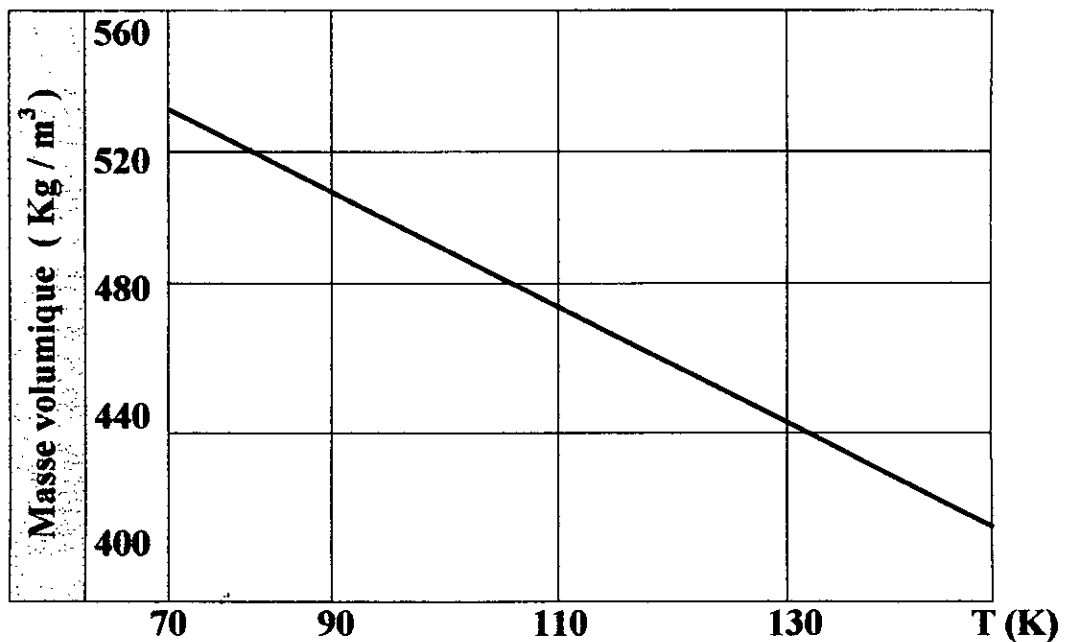


Figure (2.7) : Variation de la masse volumique du gaz naturel liquéfié (G.N.L) en fonction de la température [7].

c- Tension de vapeur :

La tension de vapeur mesure la tendance des molécules à s'échapper d'une phase liquide pour rentrer en phase vapeur en équilibre thermodynamique. Pour le G.N.L, il faut pondérer cette propriété en fonction du pourcentage moléculaire de chaque constituant :

$$TV_{\{G.N.L\}} = \sum (TV)_i Y_i \quad (2.2)$$

$(TV)_i$: Tension de vapeur d'un constituant (i) quelconque du G.N.L à une température (T).

Y_i : Fraction moléculaire du constituant (i).

$TV_{\{G.N.L\}}$: Tension de vapeur de G.N.L à (T).

La figure (2.8) représentant la variation de la tension de vapeur avec la température, montre qu'elle croît rapidement avec la température. Il y a donc un risque d'augmentation de pression dans le réservoir de stockage qui pouvant engendrer ainsi une explosion, si l'on ne procède pas à une étude scientifiquement fondée.

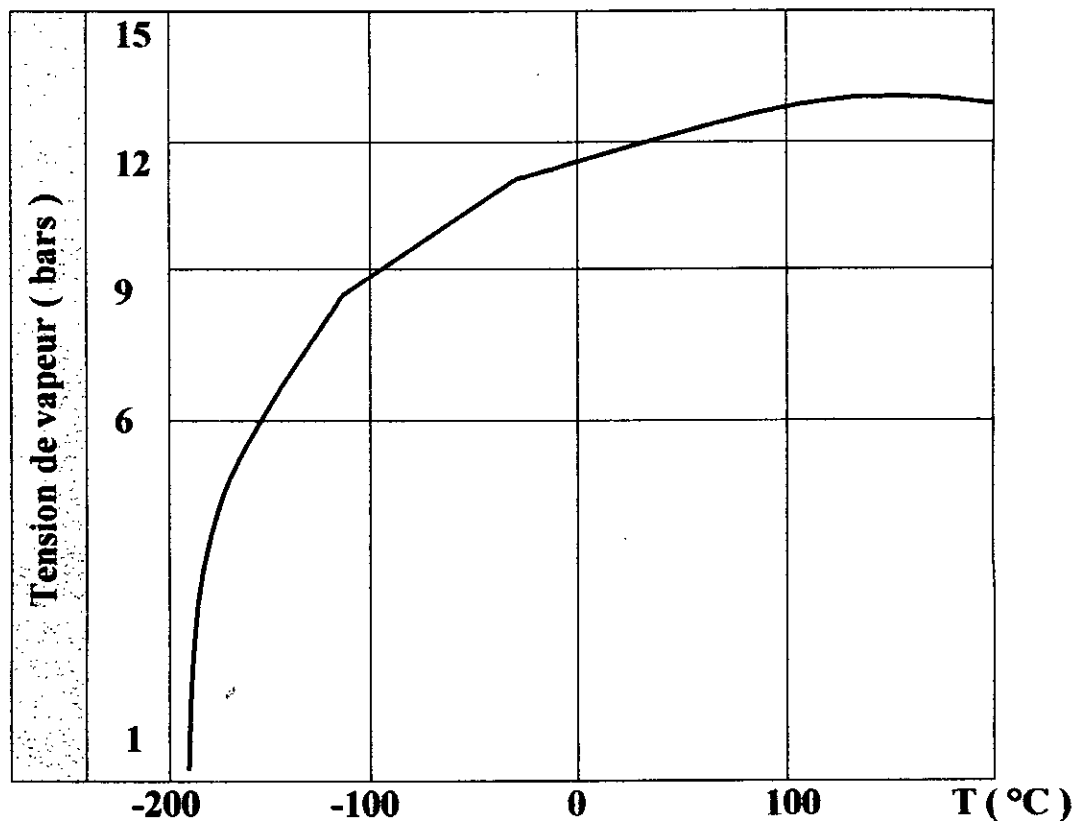


Figure (2.8) : Variation de la tension de vapeur du gaz naturel liquide (G.N.L) en fonction de la température [6].

d- Viscosité :

La viscosité traduit la résistance qu'opposent les molécules à une force tendant à les déplacer, les unes par rapport aux autres. On peut définir la viscosité dynamique par :

$$\mu \text{ (centipoise)} = \left\{ \frac{f}{s} \right\} \left\{ \frac{dx}{dv} \right\} \quad (2.3)$$

La viscosité cinématique est donnée par:

$$\nu = \mu / d \text{ (centistokes)} \quad (2.4)$$

f : La force de résistance,

S : La surface de la couche où glisse le fluide,

dv : Vitesse instantanée,

dx : La distance,

d : Densité de flux à la température T.

La **figure (2.9)** donne la variation de la viscosité du Méthane, de l'Ethane et de Propane en fonction de la température. On remarque que la viscosité augmente avec la diminution de la température. Dans le cas général, la viscosité dynamique du G.N.L est une fonction du pourcentage de chaque constituant.

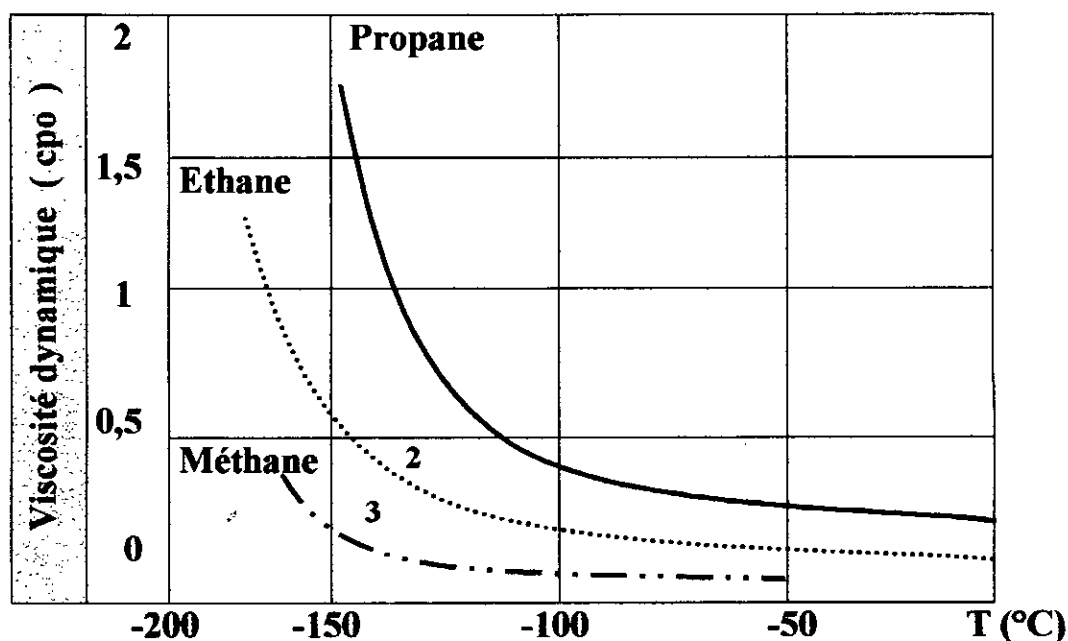


Figure (2.9) : Variation de la viscosité dynamique de Méthane, de l'Ethane et de Propane en fonction de la température [6].

e- Point d'inflammation :

Le point d'inflammation (P_i) du gaz naturel est la température de l'inflammation de sa vapeur. Dans notre cas on a :

$$\left. \begin{array}{l} P_i \{CH_4\} = 537 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_i \{C_2H_6\} = 509 \text{ }^\circ\text{C} \\ P_i \{C_3H_8\} = 465 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow P_i \{G.N.L\} = 465 \text{ }^\circ\text{C}$$

On remarque que le point d'inflammation (P_i) du {G.N.L} est élevé.

f- Le domaine d'inflammabilité :

Un mélange de gaz naturel liquéfié et d'air n'est inflammable que pour un certain domaine de composition :

Méthane : de 5.00 % à 15.00 %

Ethane : de 3.22 % à 12.45 %

Propane : de 2.37 % à 9.50 %

Le domaine d'inflammabilité (DN_i) en (%) de G.N.L dans l'air est donné par :

$$DN_i (G.N.L) = [4.03 , 14.09]$$

g- Point de congélation du G.N.L :

C'est la température de fusion du Méthane puisqu'on a :

$$T_{\text{CONGELATION}} \{G.N.L\} = T_{\text{CONG}} \{CH_4\} = -182.48 \text{ }^\circ\text{C}$$

h- Point d'écoulement :

C'est la température la plus basse (T_{ec}) qui assure l'écoulement du G.N.L :

$$T_{ec} > T_{cong} \longrightarrow T_{ec} \approx -180 \text{ }^\circ\text{C}$$

Remarque :

Il ne faut pas atteindre T_{ec} du G.N.L parcequ'elle influe sur son pompage.

2.5.3 Caractéristiques thermodynamiques :**2.5.3.1 Pouvoir calorifique :**

C'est la quantité d'énergie issue de la combustion par unité de volume (masse) du G.N.L lors de la réaction chimique en combustion complète (formation de H_2O et CO_2), cette quantité est calculée à $25\text{ }^\circ\text{C}$.

Il existe 2 pouvoirs calorifiques :

- 1- Pouvoir calorifique supérieur (PCS),
- 2- Pouvoir calorifique inférieur (PCI).

a- Calcul du PCI du G.N.L :

Les lois de la thermodynamique permette de calculer le PCI du l'élément i [6] :

$$PCI_i = | \Delta H^0_{COMBUST} | = | \sum \Delta H^0_{PRODUITS} - \sum \Delta H^0_{REACTIFS} | \quad (2.5)$$

$$PCI_{\{G.N.L\}} = \sum Y_i PCI_i$$

Avec :

Y_i : La fraction molaire du constituant (i).

PCI_i : Pouvoir calorifique du constituant (i).

Donc il faut calculer les PCI_i de chaque constituant (i).

a.1- PCI de (CH₄):

- L'Enthalpie de formation du (CH_4) liquide : $\Delta H_{\{CH_4\}L}$

$$\Delta H_{\{CH_4\}L} = \Delta H_{F\{CH_4\}} (25\text{ }^\circ\text{C}) + \Delta H_{LIQUEFACTION}$$

$$\Delta H_{\{CH_4\}L} = -17.889 + 1.955 = -15.934 \text{ Kcal / Mol.}$$

- Equation de la combustion :



$$PCI_{\{CH_4\}L} = |\Delta H_{\{CH_4\}}| = 2 \Delta H_{\{H_2O\}}^0 + \Delta H_{\{CO_2\}}^0 - \Delta H_{\{CH_4\}L}^0$$

$$PCI_{\{CH_4\}L} = 2 \cdot (-57.797) + (-94.052) - (-15.934) = 193.712 \text{ Kcal / mol} = 50535.14 \text{ KJ / Kg.}$$

$$PCI_{\{CH_4\}L} = 50535.14 \text{ KJ / Kg.}$$

a.2- Calcul du PCI de l'Ethane:

- Equation de combustion:



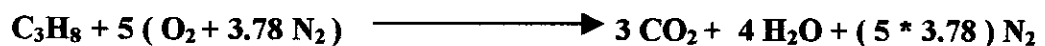
$$\Delta H_{\{C_2H_6\}L} = -20.236 + 3.157 = -16.719 \text{ Kcal / mol.}$$

$$\text{Et: } PCI_{\{C_2H_6\}L} = 2 (-94.52) + 3 (-57.797) - (-16.719) = 344.776 \text{ Kcal / mol.}$$

$$\text{Donc: } PCI_{\{C_2H_6\}L} = 47987.48 \text{ KJ / Kg}$$

a.3- Calcul du PCI de Propane:

- Equation de combustion:



$$\Delta H_{\{C_3H_8\}} = -24.82 + 4.487 = -20.333 \text{ Kcal / mol.}$$

$$PCI_{\{C_3H_8\}L} = \Delta H_{\{C_3H_8\}}^0 = 3 (-94.052) + 4 (57.797) - (-20.333) = 493.011 \text{ Kcal / mol.}$$

$$PCI_{\{C_3H_8\}L} = 46792.10 \text{ KJ / Kg}$$

$$\text{Finalement: } PCI_{\{GNL\}} = \sum X_i PCI_i$$

$$PCI_{\{GNL\}} = 0.89301 PCI_{\{CH_4\}L} + 0.081 PCI_{\{C_2H_6\}L} + 0.02599 PCI_{\{C_3H_8\}L}$$

$$\text{Donc: } PCI_{\{GNL\}} = 213.727 \text{ Kcal / mol} = 49949.10 \text{ KJ / Kg.}$$

2.5.3.2 Chaleur de vaporisation :

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour transformer une mole liquide en vapeur d'un fluide donné. A partir du $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, la chaleur de vaporisation de l'Ethane est supérieur à celle de Méthane et de Propane, (**figure 2.10**).

Pour $T = -162\text{ }^{\circ}\text{C}$ on a :

$$\Delta H_{\text{VAP}\{\text{G.N.L}\}} = \Delta H_{\text{VAP}\{\text{C}_2\text{H}_6\}} = 588\text{ KJ / Kg}$$

2.5.3.3 Chaleur spécifique du G.N.L:

La chaleur spécifique du G.N.L ($CP_{\text{G.N.L}}$) est la somme en poids des chaleurs massiques de Méthane, de l'Ethane et de Propane à la température T.

$$CP_{\{\text{G.N.L}\}} = 0,8 CP_{\{\text{CH}_4\}} + 0,136 CP_{\{\text{C}_2\text{H}_6\}} + 0,064 CP_{\{\text{C}_3\text{H}_8\}}$$

La chaleur massique d'un élément est la chaleur qu'il faut fournir à l'unité de poids de cet élément pour augmenter sa température d'un degré. Elle est exprimé en ($\text{Kcal / Kg}^{\circ}\text{C}$).

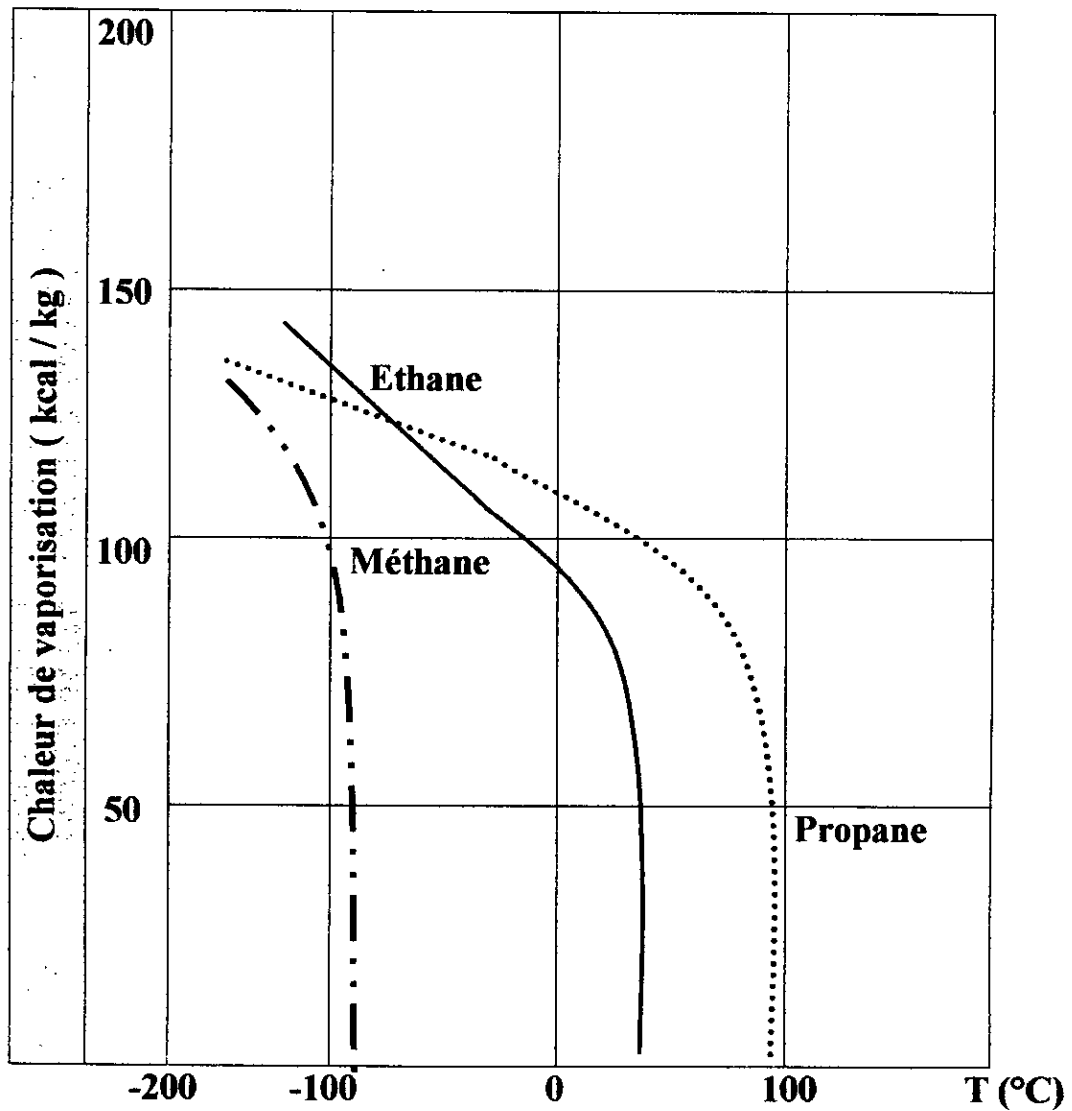


Figure (2.10) : Variation de la chaleur latente de vaporisation du CH_4 , C_2H_6 et C_3H_8 liquides en fonction de la température [6].

2.6- LIQUEFACTEUR PHILIPS PLA-107 :

2.6.1- Introduction :

Le laboratoire de thermique et de la thermodynamique de l'école nationale polytechnique est équipé d'un liquéfacteur Philips type PLA-107.

La production de ce liquéfacteur est très prisée, par un grand nombre de laboratoires nécessitant le travail dans les conditions de température de l'ordre de -200°C .

Le Philips PLA-107 prend 20 minutes pour atteindre sa production maximale d'air liquide, mais à partir de ce moment, il peut l'assurer pendant plusieurs jours sans nécessiter une régulation extérieure. Il exige de très petits entretiens lors du dégivrage périodique, qui prend au moins deux heures de fonctionnement par semaine [8].

L'étude de ce liquéfacteur a déjà fait l'objet de plusieurs études [8 et 9], mais pour la production d'air liquide seulement. La production de GNL n'avait fait l'objet d'aucune étude.

2.6.2 Représentation schématique simplifié du liquéfacteur Philips pla-107 :

La **figure (2.11)**, donne un schéma simplifié d'un système « piston – refouleur », qui facilite la compréhension du fonctionnement de notre liquéfacteur.

Le système piston – refouleur fonctionne suivant quatre phases :

1- PHASE A :

Le fluide frigorigène, se trouve initialement dans le volume de compression (3), il est comprimé par un mouvement ascendant du piston.

2- PHASE B :

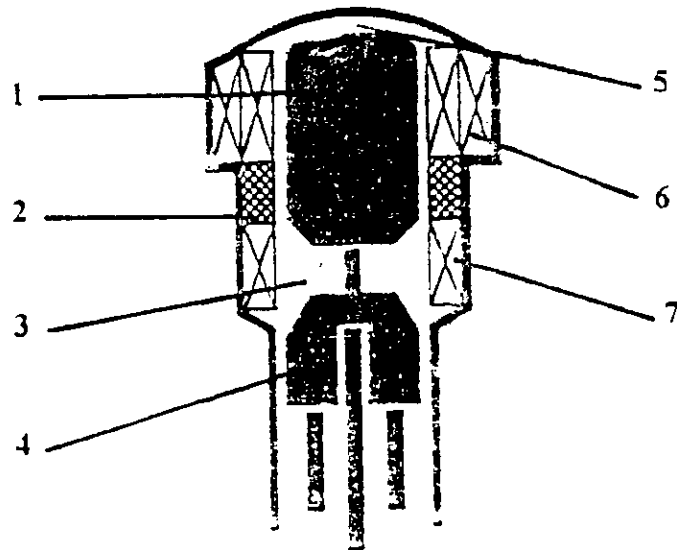
Le fluide frigorigène est transféré de l'espace de compression (3) à la chambre d'expansion (5). Au cours de ce passage, le fluide qui était plus chaud dans l'espace de compression cède une partie de sa chaleur au régénérateur (2), et donc il se refroidit.

3- PHASE C :

Le gaz est dans l'espace d'expansion, par suite aux mouvements simultanés du piston et du balayeur (vers le bas), le fluide frigorigène se détend; il en résulte ainsi un refroidissement. De ce fait il y a généralement de froid, qui peut être utilisé à la surface de la tête du cylindre.

4- PHASE D :

Le fluide frigorigène repart vers l'espace de compression, et lors de son passage par le régénérateur il absorbe la chaleur stockée lors de la phase B, et il se réchauffe.



1. Refouleur;
2. Régénérateur;
3. Espace de compression;
4. Piston;
5. Chambre d'expansion;
6. Echangeur;
7. Radiateur.

Figure (2.11) : Schématisation du système : piston – refouleur [9].

Conclusion :

On peut schématiser notre système par un cycle de **STIRLING** inverse; cycle utilisé pour la production du froid.

2.6.3 Description générale du cycle de Stirling inversé :

Le cycle de Stirling préconisé donc pour la production d'énergie, peut être inversé pour servir à la production de froid en consommant de l'énergie. A l'inverse du cycle moteur, la compression se fait à la température de la source chaude lors de la détente.

La **figure (2.12a)** montre que le cycle de Stirling inversé comprend deux isothermes et deux isochores.

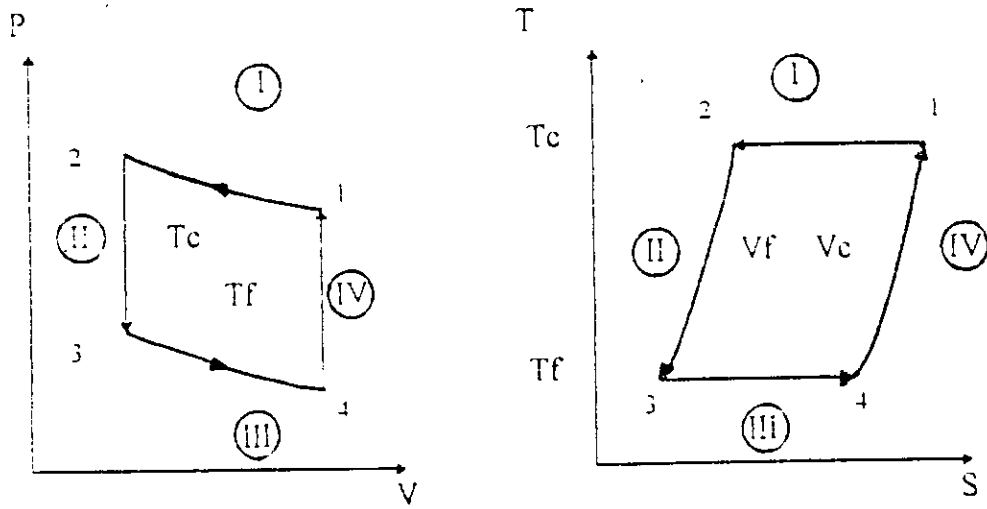
Le cycle de Stirling inversé est matérialisé par un cylindre contenant un régénérateur de chaleur R. La partie du cylindre à droite du régénérateur est maintenue à la température de la source chaude T_C et la partie gauche à la température de la source froide T_F à laquelle doit se faire la production frigorifique. Le cycle est décrit par les positions de 1 à 4 par la **figure (2.12b)**.

- De la position 1 à la position 2, le gaz subit une compression isothermique à la température T_C , dans le déplacement de droite à gauche du piston droit.

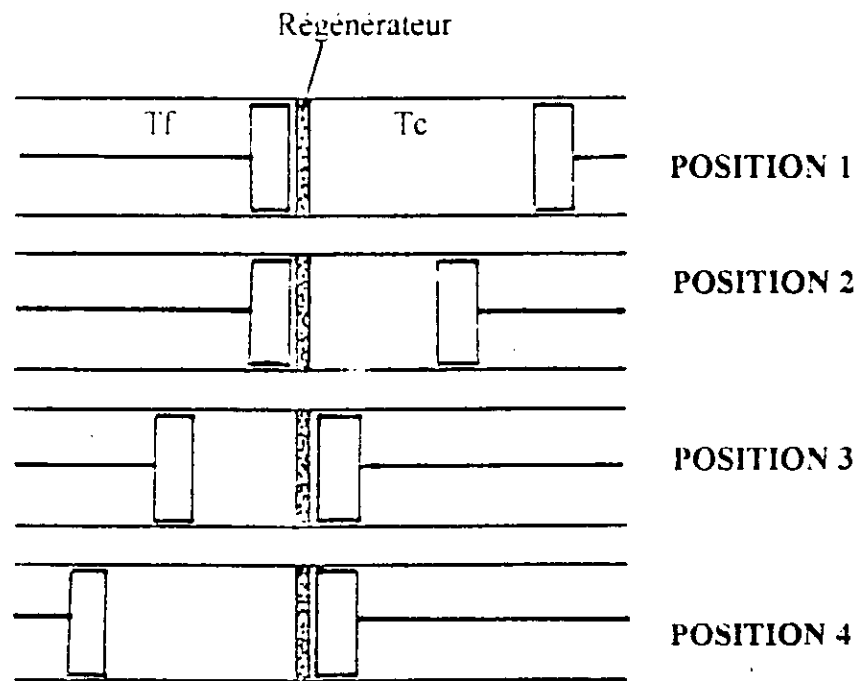
- De la position 2 à la position 3, le gaz est refroidi à volume constant, de T_C à T_F , en échangeant de la chaleur avec le régénérateur, par un mouvement de droite à gauche des deux pistons, dans ce cas la pression baisse.

- De 3 à 4, le gaz est détendu à température constante (T_F) en absorbant (pompant) de la chaleur des milieux extérieurs (source froide), dans le déplacement de droite à gauche du piston gauche; on obtient donc une puissance frigorifique.

On revient ensuite à la position 1 par un mouvement de gauche à droite des deux positions, de telle sorte que le volume reste constant et que le gaz reprend au régénérateur la chaleur cédée dans le trajet 2 à 3. La pression remonte à la valeur P_1 et la température à T_C et l'on est revenue à l'état initial.



a: Cycle Théorique (diagramme P-V et T-S).



b: Mouvement théorique des pistons.

Figure (2.12) : Cycle de Stirling inversé [9].

2.6.4 Principe de fonctionnement du liquéfacteur Philips PLA-107 : [16]

Par rapport aux différentes phases du cycle de Stirling inversé, le piston (1), de la figure (2.13) comprime en premier lieu le fluide frigorigère (l'hydrogène ou l'hélium), à température ambiante et à haute pression, dans l'espace de compression (2).

Le mouvement initial vers le bas du refouleur (3) transporte le gaz comprimé et chauffé au préalable, en le remontant à travers le radiateur à circulation d'eau (4), le régénérateur (5) et l'échangeur frigorigère (6), vers l'espace d'expansion (7). Le gaz se détend davantage avec la descente simultanée du piston et du refouleur.

La phase retour du refouleur dirige le gaz, en premier lieu, à travers l'échangeur frigorigère. Il prend la chaleur du condenseur (8), puis il absorbe la chaleur emmagasinée dans le régénérateur lors de la compression; et finalement en passant par le radiateur à circulation d'eau vers l'espace de compression où le gaz retrouve son état initial.

2.6.5 Tête de condenseur :

Le gaz naturel à la pression atmosphérique est automatiquement aspiré à travers l'ouverture (9), le flux de gaz naturel circule entre l'enveloppe (10) et le déflecteur (11), puis il passe vers le condenseur à travers un séparateur (12) pourvu de pattes sur lesquelles les impuretés de gaz naturel se déposent.

Les gaz non condensables de gaz naturel, sont aspirés par le tuyau (13), afin d'empêcher leur accumulation dans l'espace entourant la tête du condenseur, où ces gaz accumulés, pouvaient entraver la condensation.

Ensuite, le gaz naturel liquéfié est récupéré dans un canal annulaire puis dirigé vers la conduite isolée (14), pour le stocker finalement dans un réservoir cryogénique.

2.6.6 Transmission de mouvement :

Le moteur électrique (17) transmet la puissance au vilebrequin (21) à l'aide de la roue (20). Les manetons (22) sont connectés par la bille (23) au balayeur (piston); tandis que le vilebrequin (21) transmet le mouvement au refouleur (3) à l'aide d'une baguette (26) qui passe au centre du piston.

Le refouleur est couvert d'une capsule isolante qui réduit considérablement le transfert de chaleur, de la partie chaude vers le volume d'expansion.

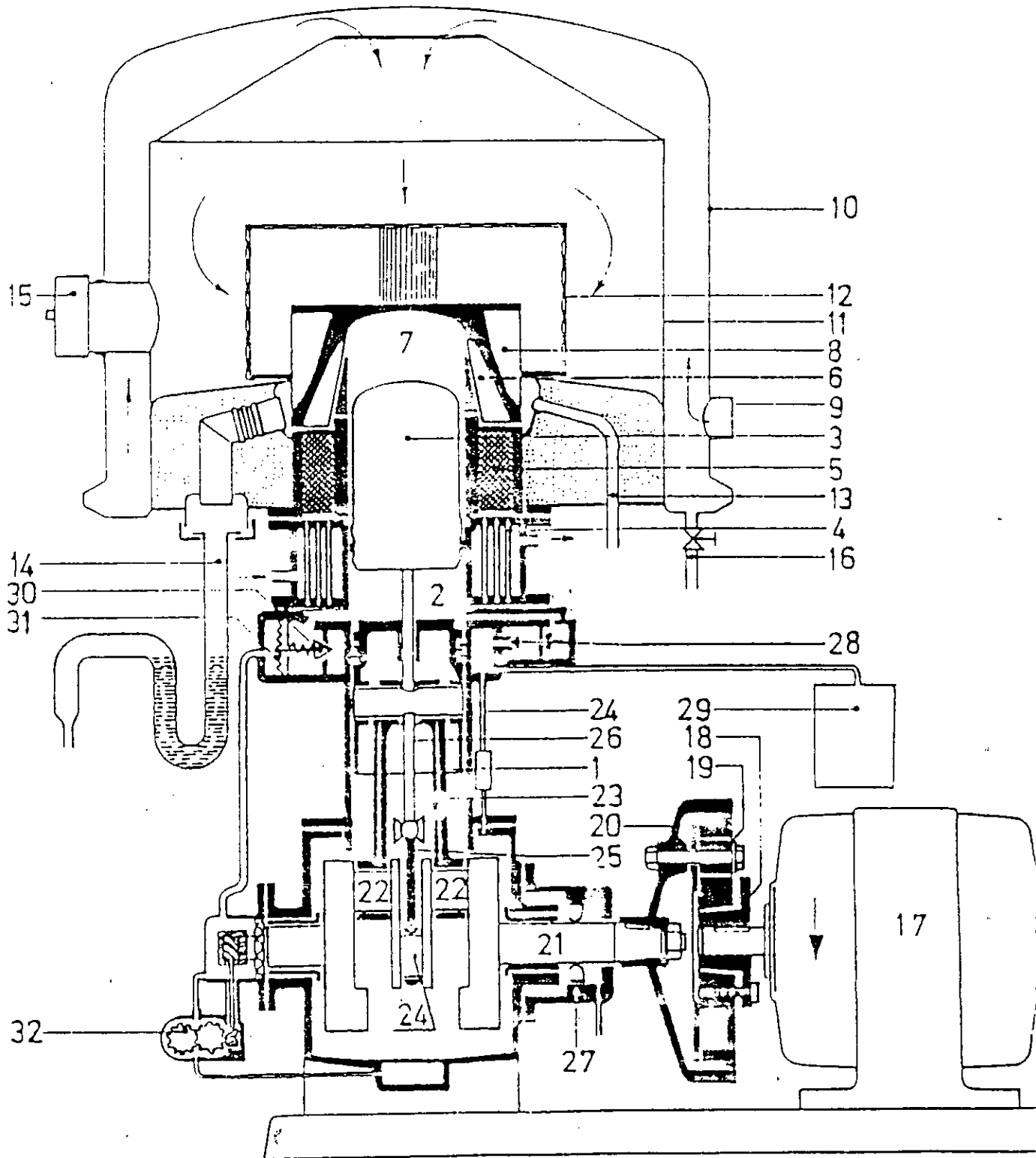


Figure (2.13) : Représentation du liquéfacteur [16].



III- STOCKAGE
DU GAZ NATUREL LIQUEFIE

3.1 STOCKAGE DU GAZ NATUREL LIQUIFIÉ :

3.1.1 INTRODUCTION :

L'industrie gazière utilise couramment deux types de réservoirs, les réservoirs cylindriques à axe horizontal destinés à l'emmagasinage ou au transport des gaz comprimés, liquéfiés ou dissous; et les réservoirs sphériques qui sont destinés à l'emmagasinage des gaz comprimés ou les gaz liquéfiés [10].

La construction de ces réservoirs peut être soumise ou non aux textes réglementaires de sécurité suivant que leur pression de service est supérieure ou inférieure à 4 bars.

Signalons également que, depuis une date toute récente, l'industrie du gaz a commencé à utiliser des réservoirs cylindriques à axe vertical, calorifugés, pour le stockage du gaz naturel liquéfié sous la pression ordinaire.

En effet le réservoir de stockage doit résister à la pression interne, et doit être bien isolé.

3.1.2 RESERVOIRS CYLINDRIQUES A AXE HORIZONTAL :

Parmi les réservoirs cylindriques couramment utilisés on distingue :

- Les réservoirs mobiles.
- Les réservoirs mi-fixe :
 - wagon-citerne.
 - semi-remorque.
 - rail-route.
- Les réservoirs fixes.

Ces réservoirs facilitent la réalisation, et ils sont moins encombrants.

3.1.3 RESERVOIRS SPHERIQUES :

Les réservoirs sphériques les plus utilisés sont ceux du type «HORTON» à appuis poteaux extérieurs. Il existe également des réservoirs sphériques à charpente intérieure du type «NEWMAN». Ils sont à double enveloppe, intérieure en tôle, extérieure en béton armé reposant directement sur le sol par leur partie basse. Ils sont à épaisseur de parois égale et ils donnent une meilleure résistance à la pression [11].

3.2 CHOIX DU MATERIAUX :

3.2.1 QUALITE DES MATERIAUX :

Les réservoirs sont actuellement construits avec de l'acier qui présente les propriétés suivantes :

- 1- Faiblement allié, non fragile caractérisé par l'allongement A.
- 2- Qui résiste à la corrosion.
- 3- Ayant une faible masse volumique.
- 4- Ayant une limite élastique élevée.
- 5- Garantissant une bonne soudabilité.
- 6- Caractérisé par une faible conductivité thermique.

Les caractéristiques mécaniques du matériaux sous l'influences des températures cryogéniques, sont données généralement par:

- L'augmentation de la charge de rupture.
- L'augmentation de la limite élastique.
- L'augmentation de la résistance à la fatigue.
- L'augmentation de la dilatation thermique.
- Le module d'élasticité varie peu.

3.2.2 PROPRIETES DES MATERIAUX:

Les techniques de réalisation de matériels cryogéniques et la préparation d'ensembles d'ensembles expérimentaux aux basses températures mettent en œuvre des matériaux très variés. L'ingénieur va se trouver confronté à une situation nouvelle, la très forte dépendance en général, des propriétés des matériaux avec la températures.

La connaissance de ces comportements devient donc indispensable et c'est l'objet de ce paragraphe d'attirer l'attention sur les aspects originaux de ces propriétés.

Les propriétés des matériaux cryogéniques se divisent en deux :

- Les propriétés thermiques.
- Les propriétés mécaniques.

3.2.2.1 PROPRIETES THERMIQUES :

Les propriétés thermiques sont associées aux vibrations des atomes autour de leur position d'équilibre, et aux mouvements des électrons. L'amplitude des vibrations diminue avec la température; ces vibrations peuvent se propager à la vitesse du son et on peut les traiter comme celle d'ondes planes.

a- CAPACITE THERMIQUE MASSIQUE :

a.1- Contribution associée au réseau cristallin :

La capacité thermique massique n'est due qu'aux vibrations du réseau dans les cristaux isolants. L'expression de cette capacité pour une mole d'un solide cristallin est représentée par le modèle de "Debye" [2] :

$$C_{ph} = 3 \cdot R \left(T/T_D \right)^3 DB(T/T_D) \quad (3.1)$$

La température T_D , appelée température de "Debye", est une caractéristique du matériau et la fonction $DB(T/T_D)$ appelée fonction de "Debye" universelle.

L'expression théorique de T_D est donnée par :

$$T_D = (h \cdot V / K_B) \cdot (3N / 4\pi V)^{1/3} \quad (3.2)$$

Avec:

h : Constante de **Planck**. $h = 6,55 \cdot 10^{-34}$ J.s

K_B : Constante de **Boltzmann**. $K_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W / m² . k⁴

V : Vitesse du son dans le solide.

N/V : Nombre d'atomes par unité de volumes du solide.

La **figure (3.1)** présente l'évolution de la capacité thermique jusqu'à 300 K pour divers matériaux couramment utilisés en cryogénie. Le **tableau (3.1)** montre la température de "Debye" pour divers éléments et composés.

• REMARQUE :

A basse température ($T < T_D/10$); la capacité thermique massique du réseau varie comme le cube de la température:

$$C_{ph} = (12 / 5) \cdot \pi^4 \cdot R \cdot (T / T_D)^3 \quad (3.3)$$

a.2- Contribution associée aux électrons libres :

Dans le cas des métaux conducteurs, la contribution des électrons libres doit être considérée. La théorie quantique nous montre que la capacité thermique massique des électrons peut s'écrire:

$$C_e = \phi \cdot T \quad (3.4)$$

Le tableau (4.2) donne quelques valeurs de ϕ pour divers conducteurs [2].

A basse température ($T < T_D/10$), la capacité thermique massique d'un métal conducteur peut se mettre sous la forme:

$$C = C_{Ph} + C_e \quad (3.5)$$

Donc :

$$C = \beta \cdot T^3 + \phi \cdot T \quad (3.6)$$

D'après formule (3.6), si l'on trace C/T en fonction de T^2 , on obtient une droite, c'est une méthode utilisée dans l'analyse des mesures de capacité thermique.

Corps	T_D	Corps	T_D	Corps	T_D	Corps	T_D	Corps	T_D
Li	340	Mn	410	Rh	480	Os	500	KBr	180
Be	1440	Fe α	430	Pd	275	Ir	420	Ki	175
Ne	75	Fe γ	320	Ag	220	Pt	225	RbBr	130
Na	160	Co	445	Ccd	210	Au	180	RbI	115
Mg	400	Ni	450	In	100	Hg	75	CAF ₂	475
Al	430	Cu	340	Sn blanc	165	Ti	80	AgBr	145
Si	625	Zn	330	Sn gris	240	Ppb	100	MgO	800
Ar	85	Ga	320	Sb	210	Bi	110	ZnS	270
K	100	Ge	370	I	105	Gd	200	FeS ₂	645
Ca	230	Sr	150	La	150	Diamant	1850	A304	470
Sc	360	Zr	280	Hf	250	Graphite	1500	A316	500
Ti	420	Nb	265	Ta	245	Lif	650	A288	470
V	380	Mo	450	W	440	NaCl	275	X750	475
CR	830	Ru	600	Re	430	Kci	230	AgCl	185

Figure (3.1) : Température de Debye pour divers éléments et composés en (K) [2].

Corps	ϕ	Corps	ϕ
	(mJ / kg.K ²)		(mJ / kg.K ²)
Al	50,40	Nb	94,90
Be	24,60	Pt	34,00
Cr	29,80	Ag	5,65
Cu	11,00	Ta	32,30
Au	3,55	Ti	744,20
Fe	89,90	Zr	33,20
Ni	124,00		

Tableau (3.2) : Coefficient ϕ du terme linéaire de la capacité thermique massique pour divers conducteurs [2].

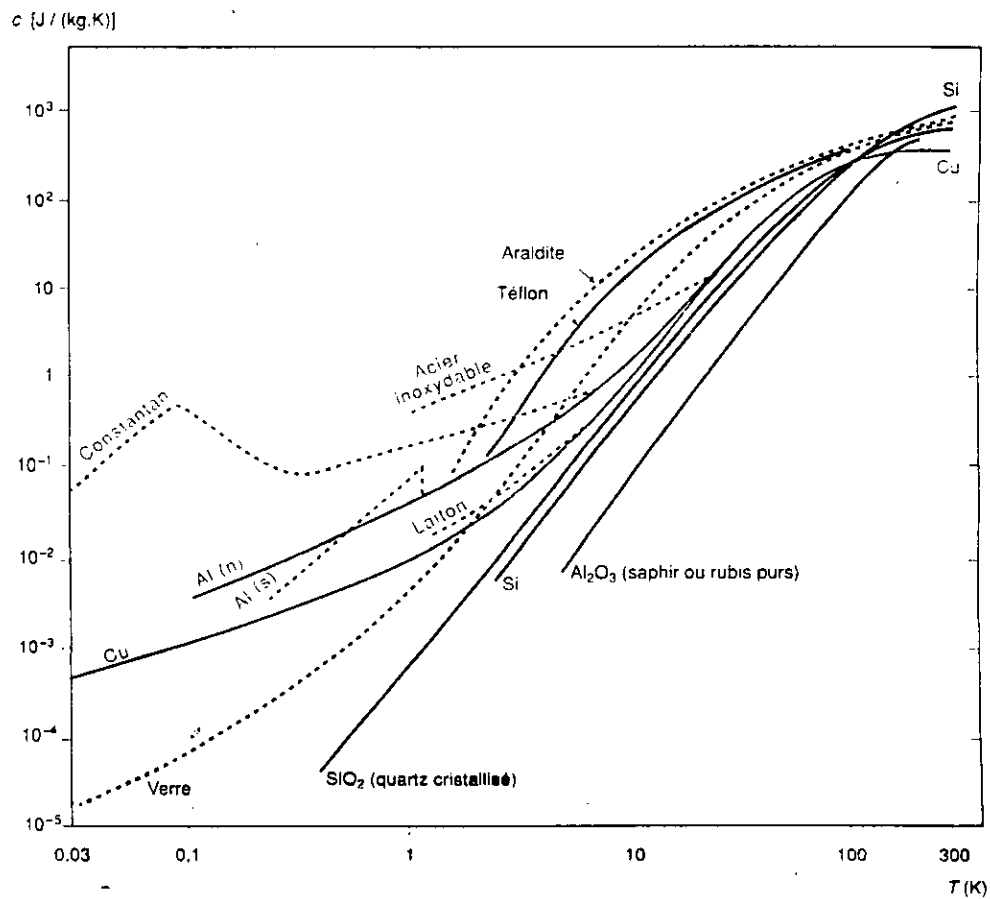


Figure (3.1) : Capacité thermique massique de quelque métaux et isolants [2].

b- CONDUCTIVITE THERMIQUE :

Schématiquement dans les solides, la conduction thermique est assurée par le réseau (phonon) et par les électrons libres de conduction. On définit donc deux conductivités thermiques, la conductivité thermique du réseau K_{Ph} et la conductivité électrique K_e .

b.1- Contribution du réseau :

Cette contribution s'exprime par :

$$K_{Ph} = (1/3) C_{Ph} \cdot V \cdot L_{Ph} \cdot \rho \quad (3.7)$$

V: Vitesse du son dans le solide.

ρ : Masse volumique.

L_{Ph} : Libre parcours moyen des phonons.

A basse température ($T \ll T_D$), V et ρ et L_{Ph} peuvent être considérés comme constants, donc :

$$K_{Ph} / T^3 = \text{constant} \quad (3.8)$$

b.2- Contribution électronique :

La conductivité thermique électronique s'exprime de la même façon, mais en prenant pour capacité thermique la capacité thermique électronique ($C_e = \phi \cdot T$), pour vitesse de Fermi (V_F) et pour la longueur le libre parcours moyen (L_e) des électrons entre deux diffusions, soit:

$$K_e = (1/3) C_e \cdot V_F \cdot L_e \cdot \rho \quad (3.9)$$

Donc:

$$K_e = (1/3) \cdot (n/M_e) \cdot \pi^2 \cdot K_B^2 \cdot T \cdot \tau \quad (3.10)$$

- M_e : Masse de l'électron, $M_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$ kg.
- n : Nombre d'électrons libres par unité de volume.
- τ : Temps moyen de diffusion ($\tau = L_e / V_F$).

A basse température $\tau = \text{constant}$ donc : $K_e \propto T$.

c- Cas général :

La conduction thermique est bien représentée par la somme des différentes contributions :

$$K = K_{pb} + K_e \quad (3.11)$$

La **figure (3.2)** présente la variation de la conductivité thermique de quelques matériaux en fonction de la température. On remarque la variation en T pour les métaux (**Ag, Cu, laiton**) et la variation en T^3 pour les isolants cristallisés (**quartz** par exp). La dépendance de la conductivité des matériaux non cristallins (**verre, plexiglas, téflon,...**) est plus complexe.

K (W/ m . K).

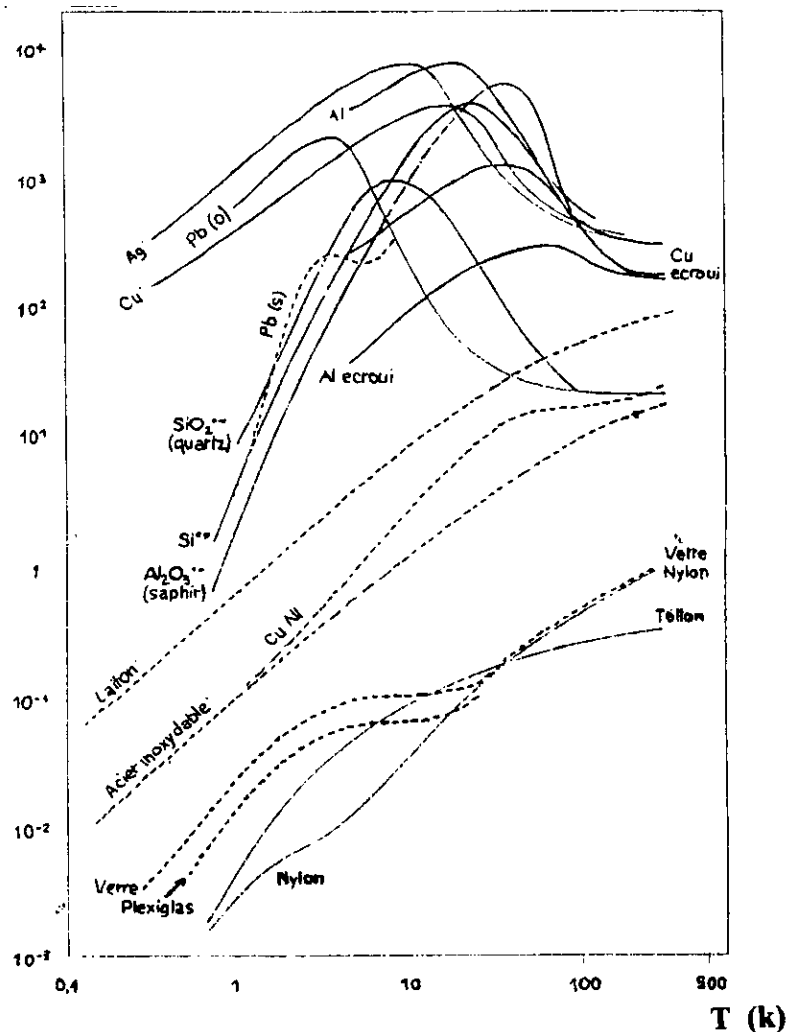


Figure (3.2) : Conductivité thermique de quelques métaux et isolants entre 0,1 K et 500 K [2].

Bien entendu, dans le cas des cristaux isolants tels que le quartz et le saphir, seul K_{Ph} intervient. Pour analyser un peu plus finement le phénomène de conductivité thermique. Il faut parler de la résistivité thermique :

$$W_i = 1/ K_i \quad (3.12)$$

W_i : La résistance thermique.

K_i : La conductivité thermique.

Comme nous l'avons dit précédemment:

$$K = \sum K_n \quad (3.13)$$

n : Pouvant signifier phonon, électron, pair électron-trou. Mais chaque (K_n) est contrarié par un certain nombre de phénomènes, tels que l'on a:

$$(K_n)^{-1} = W_n = \sum W_{mm} \quad (3.14)$$

W_{mm} : Elles caractérisent des processus interactifs freinant le transfert de la chaleur.

On peut citer dans le tableau (3.3) les interactions suivantes et leurs comportement à basse température en fonction de T .

Interaction		W
Phonons (réseau)	Phonon-électron	$W_1 \propto T^2$ OU T^1
	Phonon-défaut	$W_2 \propto T^{-2}$
	Phonon-phonon	$W_3 \propto T^{-3} \exp(-T_D/T)$
Électrons	Électron-phonon	$W_4 \propto T^2$
	Électron-défaut	$W_5 \propto T^{-1}$

Tableau (3.3) : Types d'interactifs freinant le transfert de la chaleur à basse température [2].

- Dans le cas des métaux purs, K_{Ph} est négligeable devant K_e et on peut décrire le processus à l'aide de (W_4) et (W_5). La figure (3.3) schématise la variation de la conductivité thermique des métaux. On peut remarquer qu'une faible proportion d'impuretés affecte très sensiblement la conductivité thermique.

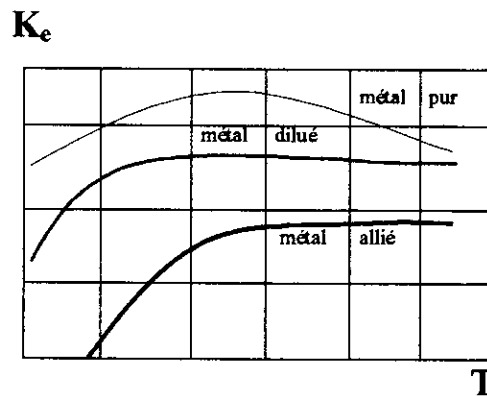


Figure (3.3): Variation de la conductivité thermique électronique K_e en fonction de T [2].

Une bonne approximation de la conductivité thermique K_e des métaux est donnée par la loi de « **Wiedemann-Franz** » reliant K_e et la résistivité électrique χ [2] :

$$\chi \cdot K_e \cdot (1/T) = 2,445 \cdot 10^{-8} \quad (\text{W} \cdot \Omega / \text{K}^2) \quad (3.15)$$

Cette relation montre que, plus le métal est pur et ayant une faible résistivité électrique χ , plus sa conductivité thermique électronique est élevée.

Finalement, on peut dire qu'on a pas intérêt de choisir un métal pur, car il nous assure un bon contact thermique.

C- DILATATION THERMIQUE :

La connaissance de la dilatation thermique des différents matériaux entrant dans une construction cryogénique est très importante. Il est, en effet bien connu que, lorsque des assemblages de matériaux différents subissent des variations de température, leurs déformations étant différentes, donc on voit apparaître des contraintes thermiques.

A basse température, l'existence de contraintes thermique différentielles peut être la source d'effort mécaniques pouvant entraîner des ruptures d'assemblage.

Dans la littérature, on trouve des courbes donnant:

$\Delta L / L$ ($\Delta L / L = [L(T) - L_0] / L_0$) en fonction de la température T . La figure (3.4) montre cette variation [15]. On peut définir le coefficient de dilatation linéaire α :

$$\alpha = (1/L) \cdot (dL/dT) \quad (3.16)$$

On constate, et cela s'exprime de façon assez générale, que le coefficient de dilatation de dilatation (α) d'un solide cristallin varie en fonction de la température comme la capacité thermique massique du réseau: $C_{ph} \propto T^3$ à basse température et $C_{ph} = \text{constant}$ à haute température. D'après la définition de (α) en déduire la variation de la longueur relatif :

$$\Delta L / L = \int \alpha(T) dt \quad \left\{ \begin{array}{l} \propto \int dT \propto T \quad \text{à haute température.} \\ \propto \int T^3 dT \propto T^4 \quad \text{à basse température.} \end{array} \right.$$

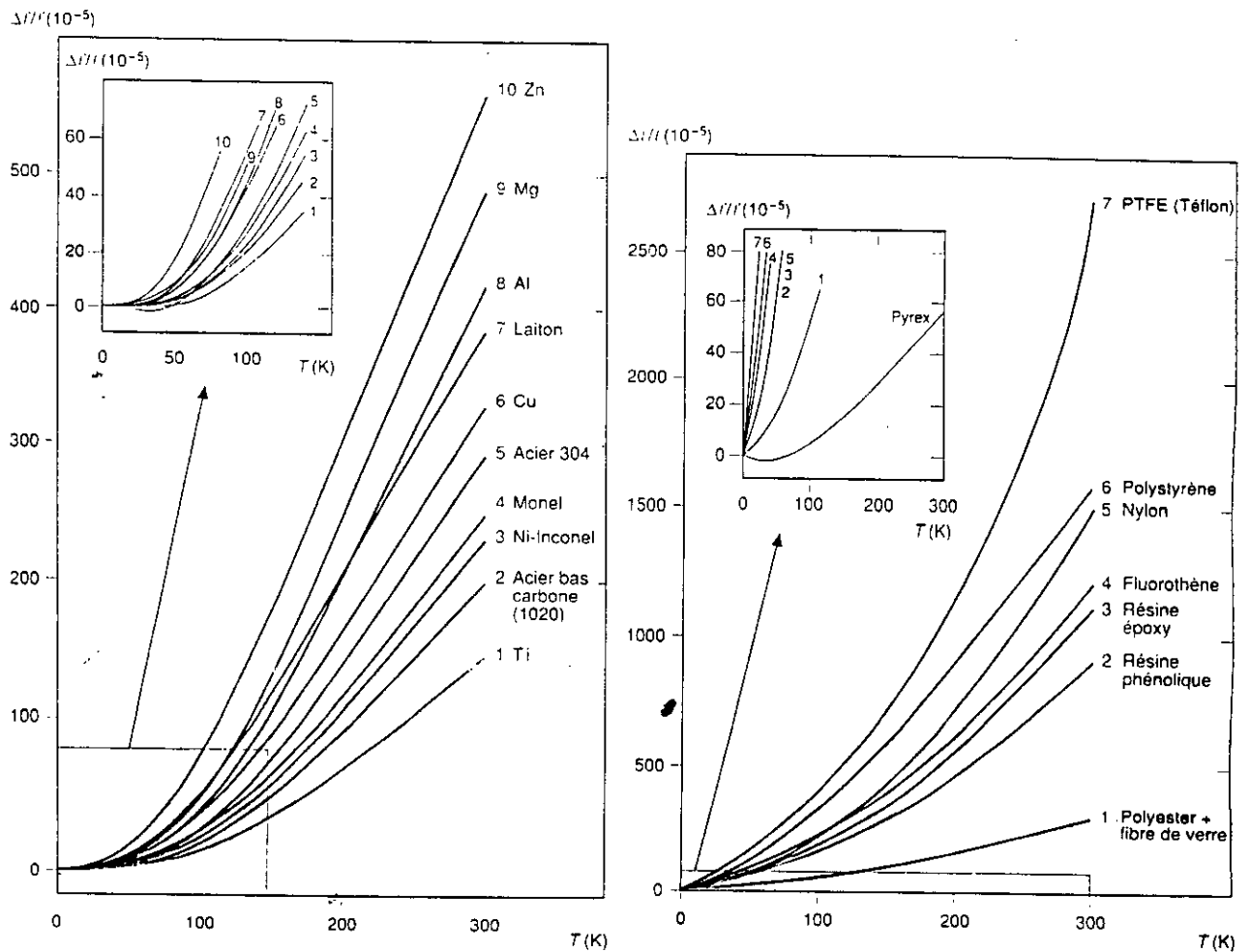


Figure (3.4) : Dilatation thermique linéaire moyenne de quelques métaux et plastiques [15].

3.2.2.2 PROPRIETES MECANIQUES :

Lorsqu'on construit une structure cryogénique, il est essentiel de prendre en compte les propriétés mécaniques des matériaux utilisés à la température de fonctionnement.

La ductilité ou plasticité dépend beaucoup de la mobilité des dislocations dans la structure du matériau. Cette mobilité pouvant être gênée par des défauts cristallins (intersticiels, joints de grain, impurités). La plupart des matériaux ductiles à température ordinaire deviennent fragiles à basse température.

Le comportement aux basses températures des différents métaux et alliages dépend de leur structure cristalline. Parmi les systèmes cubiques à face centrées, on peut citer le **Cuivre-Nickel** et ses alliages, l'**Aluminium** et ses alliages, le Fer γ (**austénite**), les aciers inoxydables (**série 300**), l'**argent**, le **plomb**, le **laiton**.

Les systèmes cubiques centrés, tels que le Fer α , les aciers ferritiques, les aciers au carbone, les aciers au Ni ($< 10\%$), les alliages Nb-Ti ($< 40\%$ Ti), le **Molybdène**, le **Vanadium**, le **Chrome**, le **Tungstène**, deviennent fragiles aux basses températures.

Finalement dans la structure Hexagonale compacte, on peut citer le **Zinc**, le **Béryllium**, le **Titane** (**Ti α**), le **Zirconium**, le **Tase**, le **Cobalt** (**Co α**), le **Magnésium**; Concernant cette catégorie, il n'y a pas de règle générale car les propriétés mécaniques dépendent beaucoup des éléments intersticiels.

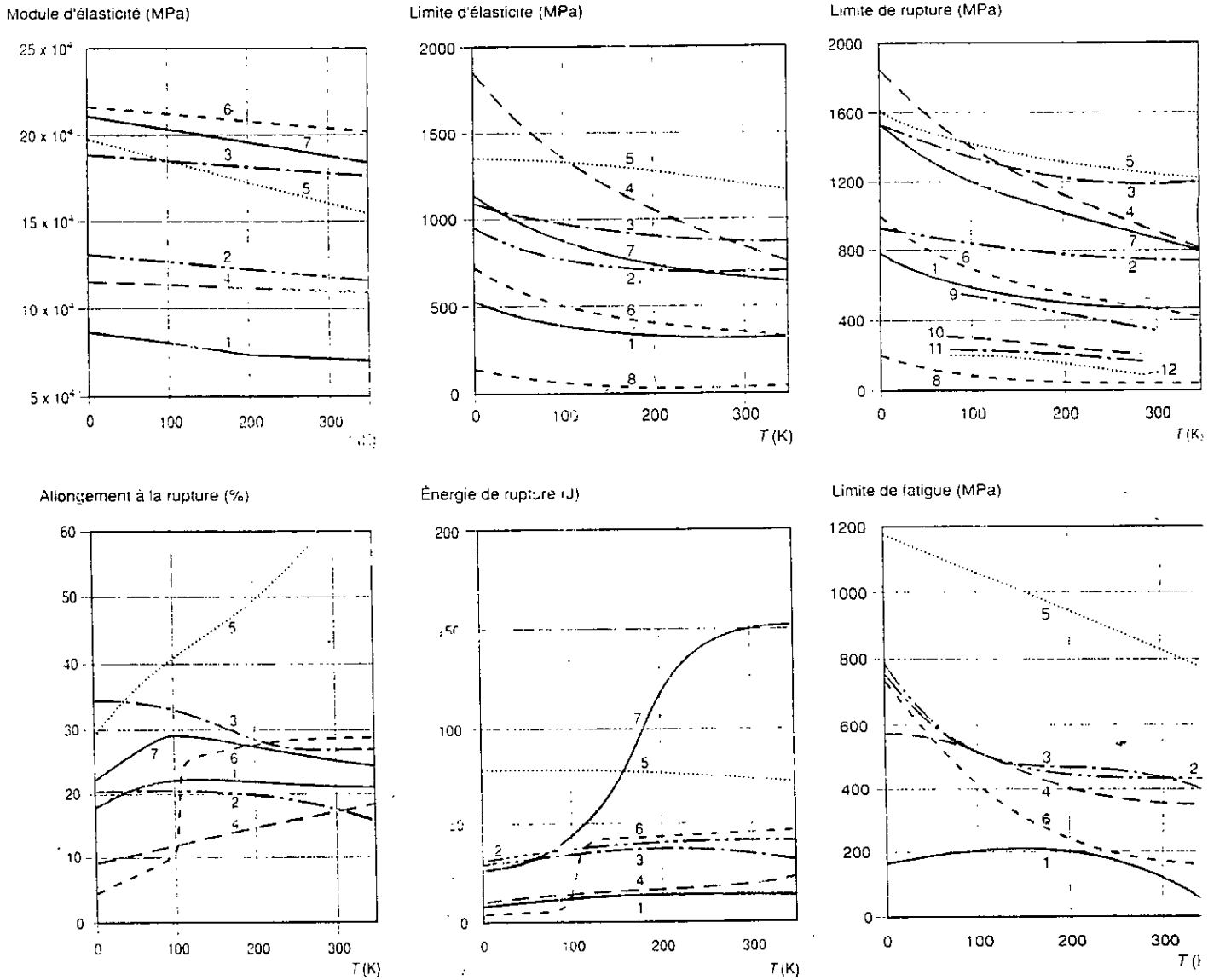
3.2.2.2.1 ESSAI DE CARACTERISATION DES METAUX :

a- Essai de traction :

C'est l'essai fondamental en mécanique des solides, car il permet de déterminer les grandeurs suivantes:

- 1- Le module d'élasticité **E**,
- 2- La limite élastique **R**,
- 3- La limite de rupture **R_T**,
- 4- L'allongement **A**,

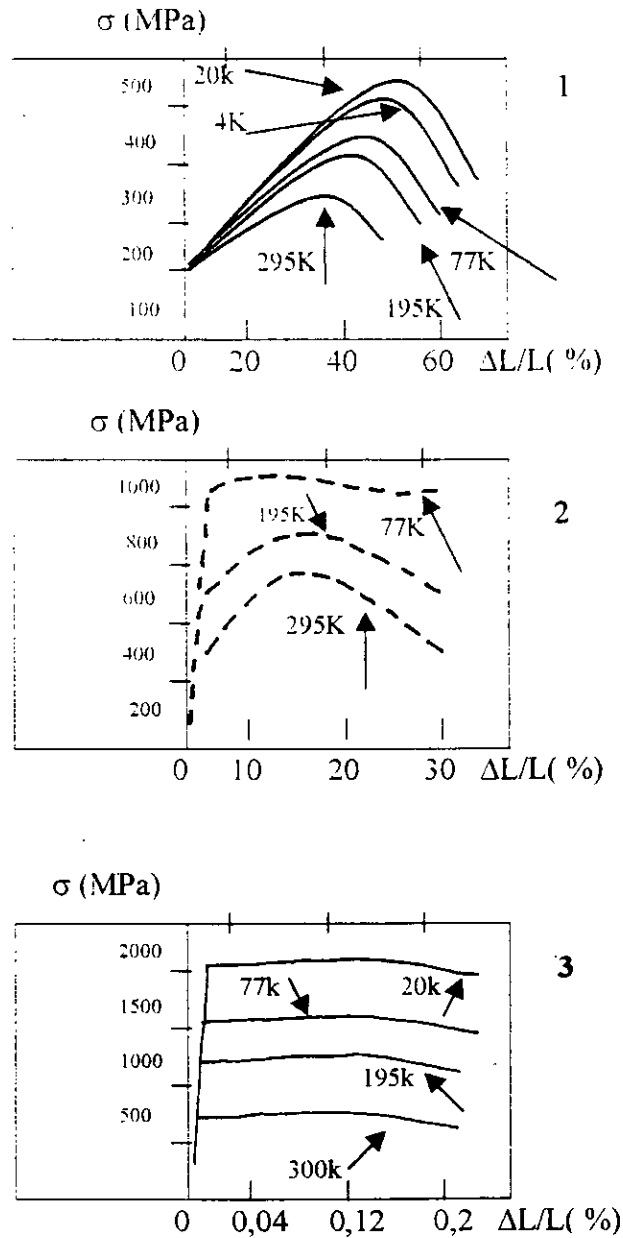
Toutes ces propriétés varient avec la température. La **figure (3.5)** montre la variation de **E**, **R**, **R_T** et **A** en fonction de la température pour divers matériaux. On remarque que les modules d'élasticité varient très peu avec la température, tandis que les deux limites d'élasticité et de rupture augmentent généralement lorsqu'on descend en température.



- | | | |
|-----------------------|--|--------------------------|
| (1) 2024 T4 Aluminium | (5) Acier inoxydable 304 (avec recuit) | (9) Fibre de verre époxy |
| (2) Cuivre-Béryllium | (6) Acier au Carbone C 1020 | (10) Kapton |
| (3) K Monel | (7) Acier 9% Ni | (11) Mylar |
| (4) Titane | (8) Téflon | (12) Nylon |

Figure (3.5) : Propriétés mécaniques des matériaux [2].

La **figure (3.6)** montre l'évolution d'une courbe de traction en fonction de la température pour différentes structures cristallines.



$\sigma = \text{force} / \text{section initiale de l'éprouvette}$	Matériau cubique à faces centrées : 1
$\Delta L/L_0 = (L-L_0)/L_0$	Matériau cubique centré : 2
$L_0 : \text{longueur initial de l'éprouvette}$	Matériau hexagonal compact : 3

Figure (3.6) : Essai de traction à diverses températures [2].

b- Essai de résilience :

Cet essai a pour but de mesurer la fragilité d'un matériau et se fait généralement sur un pendule de "Charpy". On mesure l'énergie nécessaire pour casser une éprouvette normalisée par choc. La **figure (3.5)** nous montre l'évolution de l'énergie de rupture en fonction de la température pour divers matériaux.

On voit que la fragilité augmente généralement lorsqu'on descend en température; pour certains matériaux, on observe la transition brutale **ductile-fragile**.

c- Essai de fatigue :

L'essai de fatigue consiste à imposer à une éprouvette une force ou un déplacement périodique. En général, on soumet l'éprouvette à une force ou à un déplacement sinusoïdal.

Les résultats sont portés sur un diagramme appelé le diagramme de **Wholer** ayant les amplitudes de contraintes en ordonnées et en abscisses le nombre de cycles supportés par l'éprouvette avant rupture [2].

Pour les métaux, on remarque que la courbe tend vers une asymptote dont la valeur en ordonnées est appelée limite d'endurance (limite de fatigue).

La **figure (3.5)** montre cette limite en fonction de la température pour divers matériaux. Elle augmente en général lorsque la température diminue.

Désignation		Composition (% en masse)										
		C	Mn	P	S	Si	Ni	Autres				
ACIERS	Aciers au nickel											
	9-Ni Steel		0,13	0,80	0,035	0,04	0,15 à 0,30	8,5 à 9,5				
	18 Ni (200) Maraging		0,03	0,10	0,01	0,01	0,10	17 à 19				8,5 Co - 3,25 Mo - 0,20 Ti - 0,10 Al
	Aciers inoxydables											
	AFNOR	AISI	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Autres	
	Z12 CN 17-7	301	0,08 à 0,15	2,0	0,045	0,03		16 à 18	6 à 8			
	Z6 CN 18-8	304	0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	17 à 19	8 à 10			
	Z2 CN 18-10	304L	0,03	2,0	0,045	0,03	1,0	17 à 19	9 à 11			
	Z15 CNS 25-20	310	0,25	2,0	0,045	0,03	1,5	24 à 26	19 à 22			
	Z6 CND 17-11	316	0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	16 à 18	10 à 12,5	2,0 à 2,5		
	Z6 CNT 18-10	321	0,06	2,0	0,045	0,03	1,0	17 à 19	9 à 11			Ti ≥ 5 C
	Z10 CNF 18-9	303	0,15	2,0	0,200	0,15	1,0	17 à 19	8 à 10	0,6 (ou Zr)		
	Z6 CN 25-20	316S	0,08	2,0	0,045	0,03	1,5	24 à 26	19 à 22			
	Z6 CNUb 18-11	347	0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	17 à 19	9 à 11			Nb + Ta ≥ 10 C
	Z12 C13	410	0,15	1,0	0,040	0,03	1,0	12 à 14				
Z12 CF13	416	0,15	1,25	0,060		1,0	12 à 14		0,6		0,153 min	
Autres aciers inoxydables												
Z5 CN 15-26	A-286	0,05	1,4			0,4	15	26	1,25		0,2Al - 2,15Ti - 0,003B - 0,3 V	
Kromarc-58		0,03	9,2	0,005	0,005	0,05	15,5	23	2,2		0,02Al - 0,008Zr - 0,016B - 0,16V	
Armco 21-6-9		0,08 max	8,0 à 10,0				19,0 à 21,5	5,5 à 7,5				
Armco 22-10-5		0,08 max	4,0 à 6,0			1,0	20,5 à 23,5	11,5 à 13,5	1,5 à 3,0		0,1 à 0,3Nb - 0,1 à 0,3 V - 0,2 à 0,4	
CUIVRE ET ALLIAGES DE CUIVRE			Cu	Pb	Fe	Zn	Autres					
	99,96 Cu		99,96 +	0,001								0,0003 P
	Electrolytique		99,9 +									
	OFHC*		99,95									
	Phosphoreless		99,9 +									0,02 P
	AFNOR	ISO										
	Alliages Cu-Zn (laitons)											
	CuZn 20		78,5 à 81,5	0,05	0,10	reste						
	CuZn 30		68,5 à 71,5	0,05	0,10	reste						
	CuZn 10		89,0 à 91,0	0,05	0,10	reste						
	Alliages Cu-Ni											
	CuNi 10 Fe	CuNi 15	reste	0,05 (Pb + Sn)	1,35 à 1,80	0,50						0,3 à 1,0 Mn - 9 à 11 Ni
	CuNi 20	CuNi 20	≥ 78	0,02	≤ 0,25	0,20						0,10 à 0,50 Mn - 19 à 21 Ni
	CuNi 30		≥ 69	0,02	≤ 0,25	0,20						0,15 à 0,50 Mn - 29 à 33 Ni
	Alliages Cu-Be											
CuBe 1,7		reste									1,6 à 1,8 Be - 0,20 min (Ni + Co)	
CuBe 1,9		reste									1,8 à 2,0 Be - 0,20 min (Ni + Co)	
Alliages Cu-Sn (bronzes)												
CuSn 5	CuSn 5	reste	≤ 0,05	0,10	≤ 0,3						4,5 à 5,5 Sn - 0,01 à 0,4 P	
CuSn 8	CuSn 8	reste	≤ 0,05	0,10	≤ 0,3						7,5 à 9,0 Sn - 0,01 à 0,4 P	
CuSn 10		reste	≤ 0,05	0,10	≤ 0,3						9 à 11 Sn - 0,03 à 0,4 P	
Alliages Cu-Zr												
Cu-0,2 Zr (Amzirc)		99,8									0,10 à 0,20 Zr	
Alliages Cu-Cr-Cd												
Cu - 0,4 Cr - 0,4 Cd (PD - 135)											0,4 Cr - 0,4 Cd	

* OFHC : Oxygen Free High Conductivity
 (1) d'après le Handbook on materials for superconducting machinery.

Tableau (3.4) : Composition des principaux alliages utilisés à basse température
Température (teneur maximale sauf lorsqu'un domaine est indiqué (1) [2]).

Désignation		Composition (% en masse)							
		Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Autres	Al min
ALUMINIUM ET ALLIAGES D'ALUMINIUM	AFNOR ISO								
	Non allié								
	1050A Al 99,5	0,25	0,05	0,05	0,05		0,07	0,40 Fe - 0,05 Ti	reste
	1100 Al 99,0 Cu	Si + Fe ≤ 0,95	0,05 à 0,20	0,05			0,10		99,00
	Série 2000 alliages au Cu								
	2014 (A-U4SG) AlCu 4 Si Mg	0,5 à 1,2	3,9 à 5,0	0,4 à 1,2	0,2 à 0,8	0,10	0,25	0,7 Fe - 0,15 Ti - 0,10 Ni	reste
	2219 (A-U6MT)	0,20	5,8 à 6,8	0,2 à 0,4	0,02		0,10	0,3 Fe - 0,02 à 0,10 Ti - 0,05 à 0,15 V	reste
	2024 AlCu 4 Mg 1	0,50	3,8 à 4,9	0,3 à 0,9	1,2 à 1,8	0,10	0,25	0,5 Fe - 0,15 Ti	reste
	Série 3000 alliages au Mn								
	3003	0,60	0,05 à 0,2	1 à 1,5			0,10	0,7 Fe	reste
	3103	0,50	0,10	0,9 à 1,5	0,30	0,10	0,20	0,7 Fe - 0,10 (Zr + Ti)	reste
	Série 5000 alliages au Mg								
	5083 AlMg 4,3 Mn	0,40	0,10	0,4 à 1,0	4,0 à 4,9	0,05 à 0,25	0,25	0,4 Fe - 0,15 Ti	reste
	5052	0,25	0,10	0,10	2,2 à 2,8	0,15 à 0,25	0,10	0,4 Fe	reste
	5456	0,25	0,1	0,5 à 1,0	4,7 à 5,5	0,05 à 0,20	0,15	0,4 Fe - 0,20 Ti	
	Série 6000 alliages au Si								
6061 AlMg 1 SiCu	0,4 à 0,8	0,25 à 0,40	0,15	0,8 à 1,2	0,04 à 0,35	0,25	0,7 Fe - 0,15 Ti	reste	
Série 7000 alliages au Zn									
7039	0,30	0,10	0,1 à 0,4	2,3 à 3,3	0,15 à 0,25	3,5 à 4,5	0,4 Fe - 0,10 Ti	reste	
7005 (A-Z5G)	0,35	0,10	0,2 à 0,7	1,0 à 1,8	0,06 à 0,20	4,0 à 5,0	0,4 Fe - 0,01 à 0,06 Ti	reste	
7006	0,10	0,04	0,22	2,24	0,12	4,10	0,17 Fe - 0,01 Ti	reste	
ALLIAGES DE NICKEL	Alliages Ni-Cu								
	K Monel (K 500)	reste		1,0	0,6	0,15	0,15	30,5 Cr - 2,8 Al - 0,5 Ti	
	Alliages Ni-Cr-Fe								
	Inconel 600	reste	15,5	8	0,5	0,25	0,05	1,7 Al - 2,5 Ti - 0,7 Co	
	Inconel X-750	reste	15,0	7,0	0,60	0,30	0,05		
	Inconel 718	reste	19,0	18,5	0,18	0,18	0,04	0,5 Al - 0,9 Ti - 5 Nb - 3,1 Mo	
	Inconel 706	41,5	16	reste	0,18	0,18	0,03	4,9 Nb - 1,75 Ti	
Alliages faible contraction									
Invar 36	36		reste						
Ni Span C	42,1 (Ni + Co)	5,4	48,4	0,40			2,1 Ti - 0,55 Al		
TITANE ET ALLIAGES DE TITANE	Ti non allié								
	Ti - 65 A						0,20	0,07	0,015
	Ti - 75 A					0,40	0,20	0,07	0,0125
	Alliages de Ti α								
	Ti - 5 Al - 2,5 Sn (TA5E)	4,0 à 6,0	2,0 à 3,0		0,50	0,20	0,15	0,07	0,020
	Ti - 5 Al - 2,5 Sn (ELI)* (TA5E ELI)	4,7 à 5,6	2,0 à 3,0		0,20	0,12	0,08	0,05	0,0175
	Alliages de Ti α - β								
Ti - 6 Al - 4 V (ELI)* (TA6V ELI)	5,5 à 6,5		3,5 à 4,5	0,25	0,13	0,08	0,05	0,015	
Ti - 6 Al - 4 V (TA6V)	5,5 à 6,75		3,5 à 4,5		0,20				

Tableau (3.4) : Composition des principaux alliages métalliques utilisés à basse température (teneur maximale sauf lorsqu'un domaine est indiqué (2)) (suite)

3.2.3 ANALYSE DU CHOIX :

Le choix du matériaux depend beaucoup de son utilisation. nous donnant dans le **tableau (3.4)** une liste des alliages métalliques les plus utilisés.

- **RESULTATS :**

D'après les figures (3.2) et (3.5) et on se basent sur les critères du choix de matériaux pour le stockage cryogénique du GNL (économique, dimensionnelle , construction et enfin la disponibilité), on peut dire que :

- **Notre choix (sélection) tombe sur : L' ACIER INOXYDABLE**

Q1: Pourquoi l'acier inoxydable ?

Les aciers inoxydables sont les meilleurs matériaux qui satisfont les conditions et les critères imposés ci-dessus. D'une manière générale ces aciers sont caractérisés par :

- 1- Une haute limite élastique,
- 2- Une bonne résistance à la corrosion,
- 3- Une haute limite à la rupture (l'absence de risque de rupture),
- 4- Une bonne soudabilité,
- 5- Une bonne résistance à la pression interne,
- 6- Une faible masse volumique,
- 7- Une faible conductivité thermique,
- 8- Une phase austénitique qui assure une bonne résistance mécanique.

Q2: Parmi tous les aciers inoxydables, qu'elle est l'acier le plus convenable ?

D'après le **tableau (3.4)** et les deux **figures (3.2)** et **(3.5)** , on peut dire que l'acier **304** (avec un recuit) selon la norme **A.I.S.I** ou le **(Z2 CN 18-10)** selon la norme **AFNOR** est parmi les meilleurs aciers inoxydables qui répond à notre besoin.

Q3: Qu'est ce que le recuit ?

On appelle recuit tout traitement thermique qui consiste à obtenir une structure donnée par le diagramme d'équilibre. Il est le plus simple traitement thermique, qui consiste soit en un

chauffage au-dessus du point de transformation suivi d'un refroidissement très lent. Soit en un chauffage un peu au-dessous du point de transformation et maintien très prolongé à cette température, suivi d'un refroidissement qui peut être assez rapide.

Le recuit fait disparaître toutes les contraintes qui pouvaient subsister dans l'acier, il le ramène à un état voisin de l'état d'équilibre; c'est l'état d'adoucissement maximal, qui est parfois le plus favorable pour l'usinage; enfin le recuit provoque une amélioration importante des propriétés de l'acier inoxydable 304.

- **Définition du symbole Z2 CN 18-10 :**

Z 2 : Le symbole Z désigne « **fortement allié** », le 2 (2 %) « **teneur en carbone** ».

CN : Lettres symbolisant le **Chrome** et le **Nickel**.

18 : Le pourcentage de **Cr**.

10 : Le pourcentage de **Ni**.

Q3: Qu'elles sont les caractéristiques de l'acier inoxydable 304 ?

- **Module d'élasticité :** ----- $E = 18. 10^4$ MPA
- **Limite d'élasticité :** ----- $R_e = 1350$ MPA
- **Limite de rupture à la traction :** ===== $R = 1400$ MPA
- **Allongement à la rupture :** ===== $A(\%) = 42.0$ (%)
- **Energie de rupture :** ----- $E_r = 71$ (J)
- **Limite de fatigue :** ===== $L_f = 1070$ MPA
- **La masse volumique :** ----- $\rho = 7900$ Kg /m³
- **Composition de l'acier 304 :**

Composants	C	Mn	P	S	SI	Cr	Ni
Composition (%en masse)	0.03	2.00	0.0045	0.003	1.00	18.00	10.00

Tableau (3.4) : Les principaux composants du (Z2 CN 18-10) [2].



IV- DIMENSIONNEMENT
DU RESERVOIR DE STOCKAGE

4.1 BUT DU CALCUL :

Le dimensionnement du réservoir de stockage consiste à déterminer les deux paramètres suivants :

- L'indice de structure,
- Le taux d'évaporation.

4.1.1 INDICE DE STRUCTURE :

L'indice de structure est défini par :

$$IS = M_{rV} / M_C \quad (4.1)$$

Avec : M_{rV} : masse du réservoir vide en Kg.

M_C : masse du carburant en Kg.

IS : indice de structure.

4.1.2 TAUX D'EVAPORATION :

C'est le rapport de la masse du carburant évaporé à un instant (t) à la masse du carburant contenu dans le réservoir au même instant (t). Il est donnée par l'expression :

$$TE = \tau_e = M_{Ce}(t) / M_C \quad (4.2)$$

4.2 CALCUL SCHEMATIQUE DU RESERVOIR :

On considère un réservoir cylindrique avec un fond formé d'une calotte sphérique (figure 4-a). En paroi mince [12], l'épaisseur de la virole est déterminé par la formule suivante:

$$e_v = (P D_i x) / (200 R \alpha) + C \quad (4.3)$$

Dans laquelle :

P : pression de service en (bar).

D_i : diamètre intérieur de la virole en (mm).

x : coefficient de sécurité.

R : la résistance minimale de l'acier en (hectobar).

α : coefficient d'efficacité relative des soudures.

C : surépaisseur de corrosion.

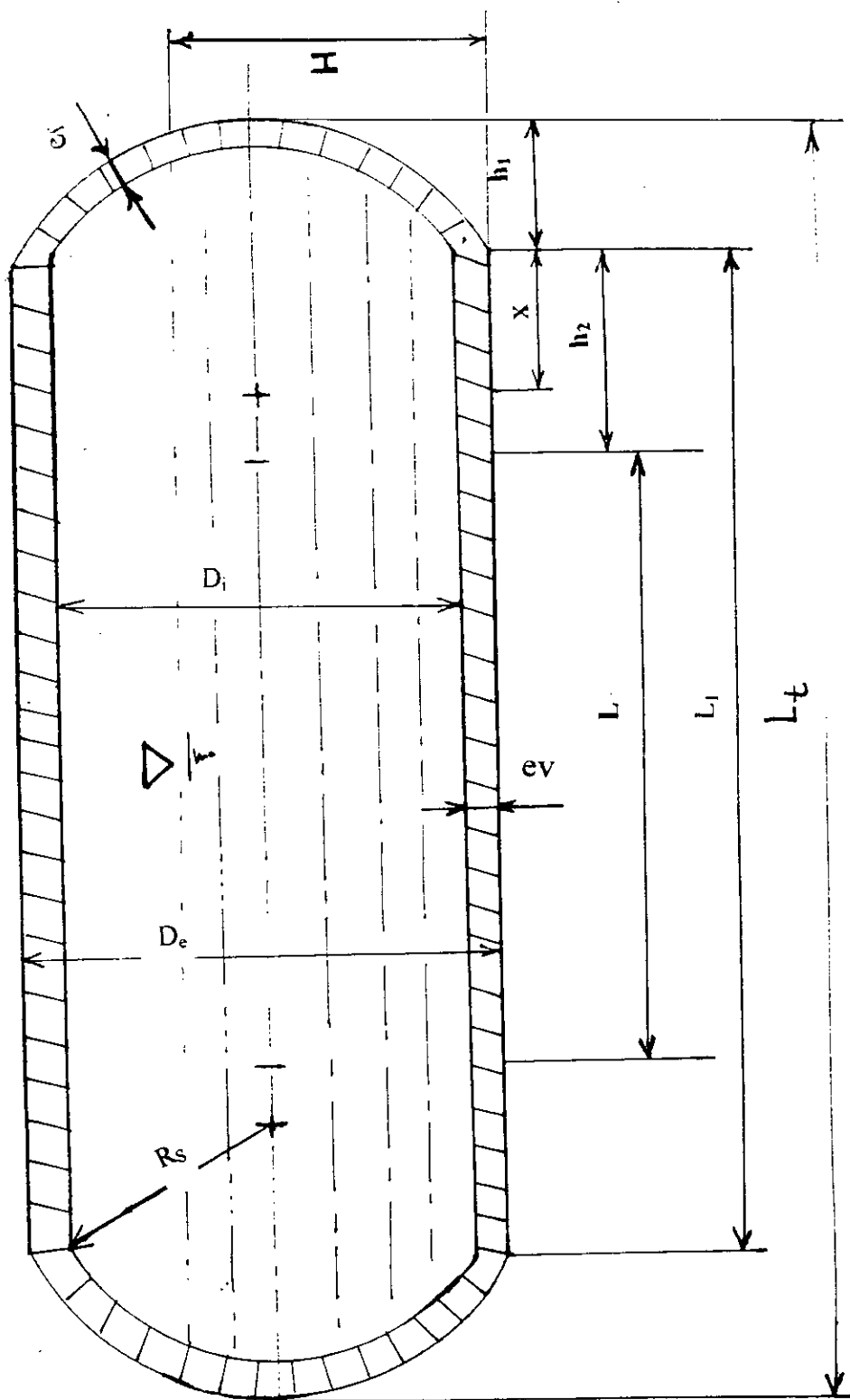


Figure (4.a) : Schématisation du réservoir de stockage du gaz naturel liquéfié

4.3 OPTIMISATION DU RESERVOIR :

Les calculs qui suivent sont relatifs à un réservoir qui se caractérise par :

- Un volume total : V_T (m^3).
- Une pression de fonctionnement : P (bar).
- Une température intérieur de fonctionnement : $T_{GNL} = -162$ °C.

4.3.1 CALCUL DU DIAMETRE INTERIEUR (D_i) DE LA VIROLE :

- **Hypothèse :**

$$L = 6 \cdot D_i$$

$$h_2 = D_i / 6$$

$$h_1 = D_i / 3$$

D'après la figure (4.a) on a :

- 1- Le volume de la virole (V_v) :

$$V_v = (3/2) \pi D_i^3 \quad (4.4)$$

- 2- Le volume du fond (V_F) :

$$V_F = (1/4) \pi D_i^2 h_2 + V_{calotte} \quad (4.5)$$

Pour calculer le volume de la callote il faut calculer le rayon de la sphère (R_S) :

On a dans le triangle OA_1A_2 :

$$R_S^2 = (D_i/2)^2 + X^2$$

Et : $X = R_S - h_1 = R_S - (D_i/3)$.

Donc:

$$R_S^2 = (D_i/2)^2 + (R_S - D_i/2)^2$$

Après developpement :

$$R_S = (13/24) \cdot D_i \quad (4.6)$$

Par définition :

$$V_{CALLOTE} = \int_x^{R_S} \pi r^2 dz$$

Avec : $r^2 = R_s^2 - z^2$

$$X = R_s - h_1 = (13/24) D_i - (1/3) D_i = (5/24) D_i = (5/12) R_i$$

$$V_{\text{calote}} = \int_{x=(5/12) R_i}^{R_s=(13/12) R_i} \pi (R_s^2 - z^2) dz = \pi \left(R_s^2 Z - \frac{Z^3}{3} \right) \Big|_{(5/12) R_i}^{(13/12) R_i}$$

Donc :

$$V_{\text{calote}} = (31 / 81) \pi R_i^3 \quad (4.7)$$

Remplaçons (4.7) dans (4.5), on aura :

$$V_f = (29 / 324) \pi D_i^3 \quad (4.8)$$

3- Volume total V_t :

D'après les deux équations (4.4) et (4.8) :

$$V_t = V_v + 2 \cdot V_f = (3/2) \pi D_i^2 + 2 \cdot (29/324) \pi D_i^3$$

$$V_t = (136/81) \pi D_i^3 \quad (4.9)$$

Si on prend : $V_t = 15 \text{ m}^3 \Rightarrow D_i = 1417 \text{ mm.}$

Donc : $L = 6 \cdot D_i = 6 \cdot 1417 = 8502 \text{ mm.}$
 $h_1 = D_i / 6 = 1417 / 6 = 236.2 \text{ mm.}$
 $h_2 = D_i / 3 = 1417 / 3 = 472.3 \text{ mm.}$

4.3.2 CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DE LA VIROLE (e_v) :

D'après l'hypothèse de cisaillement maximale, le critère de Treska [13] stipule que :

Le métal commence à subir une déformation plastique lorsque la contrainte de cisaillement maximale est égal à la limite d'élasticité.

En appliquant la formule (4.3), on aura :

$$e_v = (P D_i x) / (200 R \alpha) + C$$

Puisque notre matériau, Z2 CN 18-10 (304) résiste à la corrosion [2, 18] on a :

$C = 0.$ Donc :

$$e_v = (P D_i x) / (200 R \alpha) \quad (4.10)$$

D'après [10] on a : $X = 3$

$$\alpha = [0.9 - 1], \text{ pour le Z2 CN 18-10 } \alpha = 0.9$$

$$\text{d'où : } e_v = 3 (P D_i) / (200 \cdot 0,9 \cdot R)$$

Finalelement :

$$e_v = (P D_i) / (60 R) \quad (4.11)$$

4.4 VARIATION DE L'ÉPAISSEUR (e_v) DE LA VIROLE :

4.4.1 Variation de (e_v) en fonction de la pression (P) :

Si on fixe : $D_i = 1417 \text{ mm}$.

$R = 1400 \text{ bars} = 140 \text{ hectobars}$.

$$e_v = 0,168 \cdot P \quad (4.12)$$

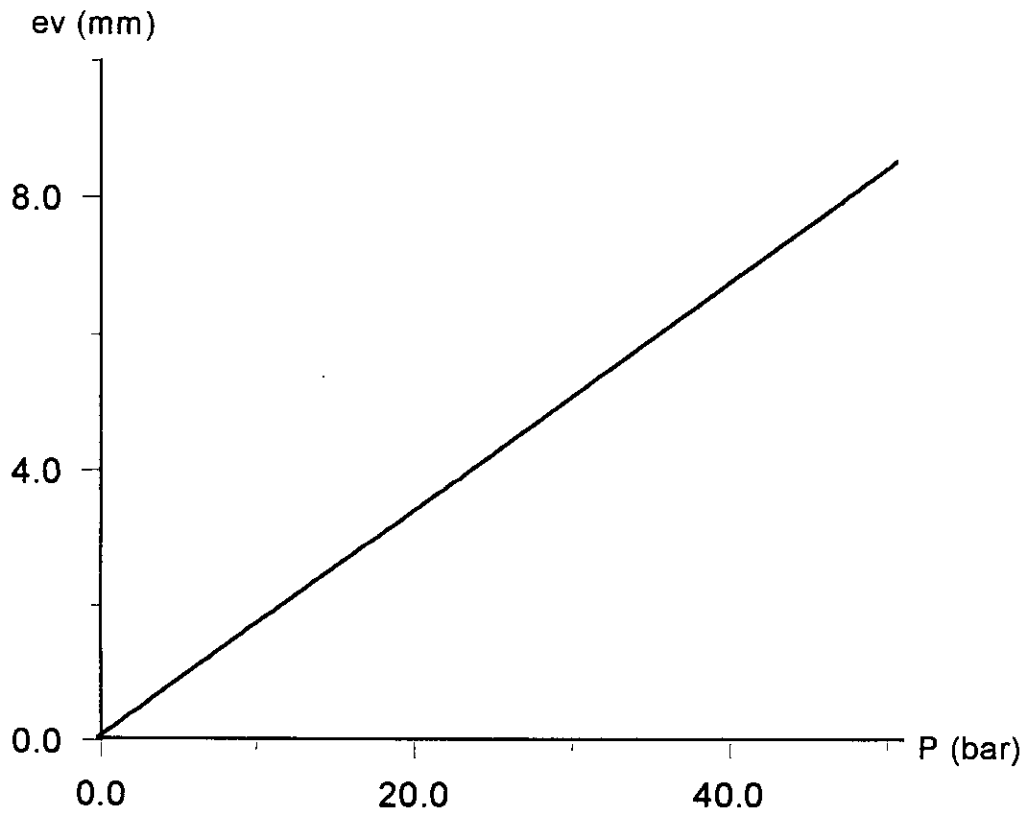


Figure (4.1) : Variation de (e_v) en fonction de la pression (P).

A partir de l'éq (4.12) et la figure (4.1) , on voit que l'épaisseur de la virole (e_v) augmente avec l'augmentation de la pression.

4.4.2 Variation de (e_v) en fonction du diamètre (D_i) :

Si on fixe : $P = 12$ bars.

$R = 140$ hectobars.

$$e_v = 14,3 \cdot 10^{-4} \cdot D_i \quad (4.13)$$

On remarque, d'après l'éq (4.13) que l'épaisseur de la virole augmente linéairement avec l'augmentation du diamètre intérieure de la virole (figure 4.2).

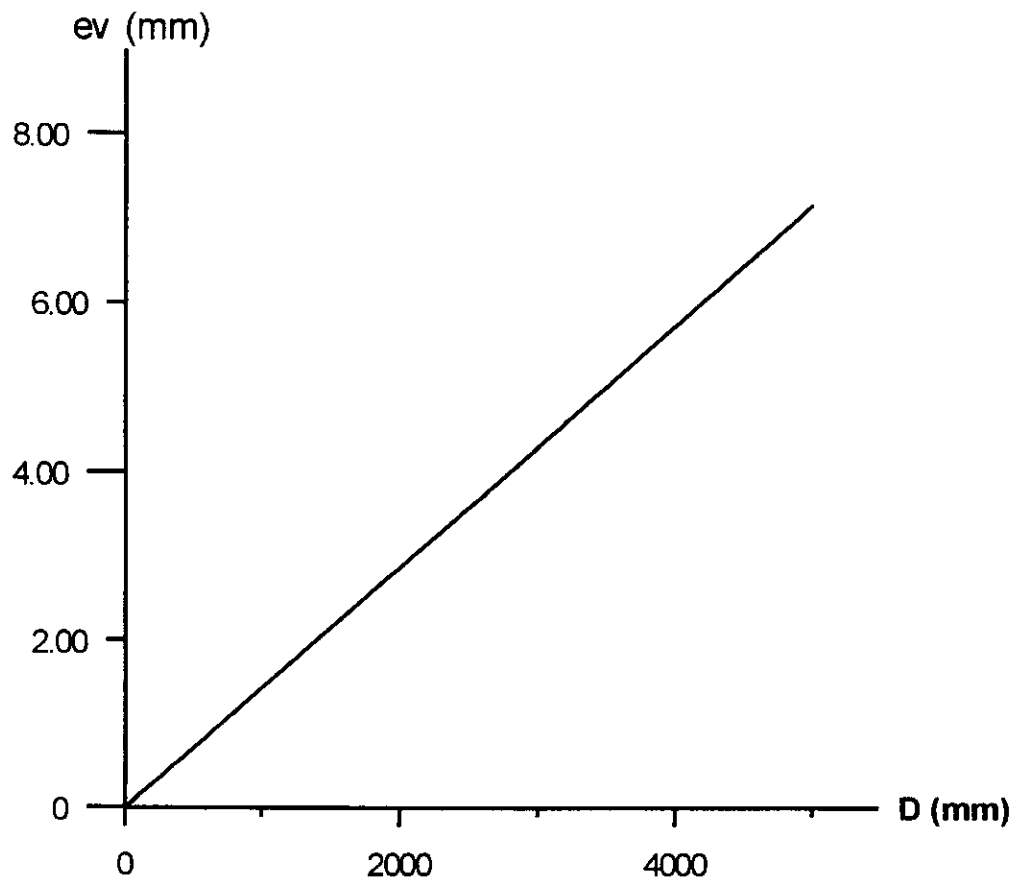


Figure (4.2) : Variation de (e_v) en fonction du diamètre (D_i).

4.4.3 Influence de la charge de rupture à la traction :

Si on fixe : $P = 12$ bars.

$D_i = 1417$ mm.

L'expression de e_v devient :

$$e_v = 283.4 / R \quad (4.14)$$

D'après l'éq (4.14) et la figure (4.3) on constate que (e_v) est inversement proportionnelle à (R), on a donc intérêt à augmenter la charge de rupture (R) pour diminuer l'épaisseur (e_v) le plus possible.

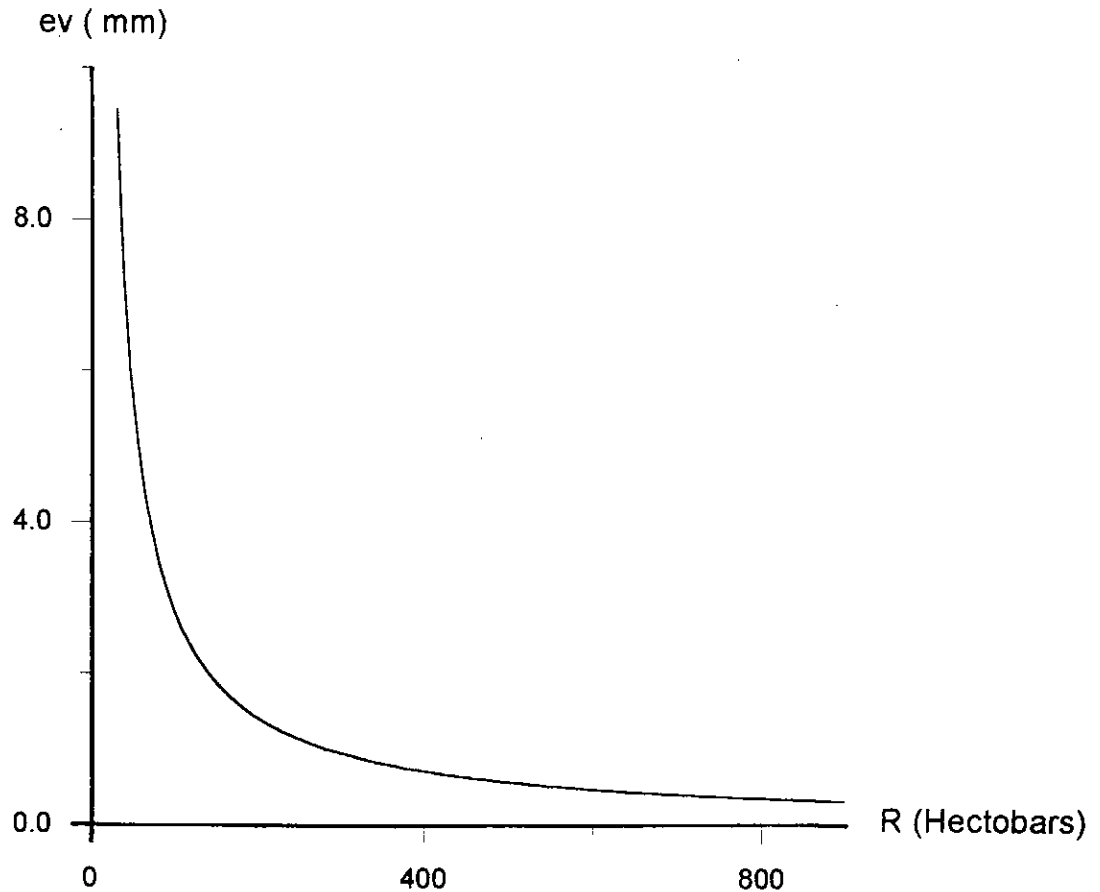


Figure (4.3) : Variation de (e_v) en fonction de la charge à la rupture.

4.5 VARIATION DE V_t (VOLUME TOTAL DU RESERVOIR) :

4.5.1 Influence de la pression (P) sur V_t :

D'après l'éq (4.9) et (4.11) :

$$V_t = (136/81) \pi (60 \cdot R \cdot e_v / P)^3 \quad (4.15)$$

Si on fixe : $R = 140$ hectobars.
 $e_v = 2$ mm.

$$V_t = 24998,3 / P^3 \quad (4.16)$$

On voit d'après l'éq (4.16) et la figure (4.4), que pour augmenter le volume total du réservoir il faut diminuer la pression P .

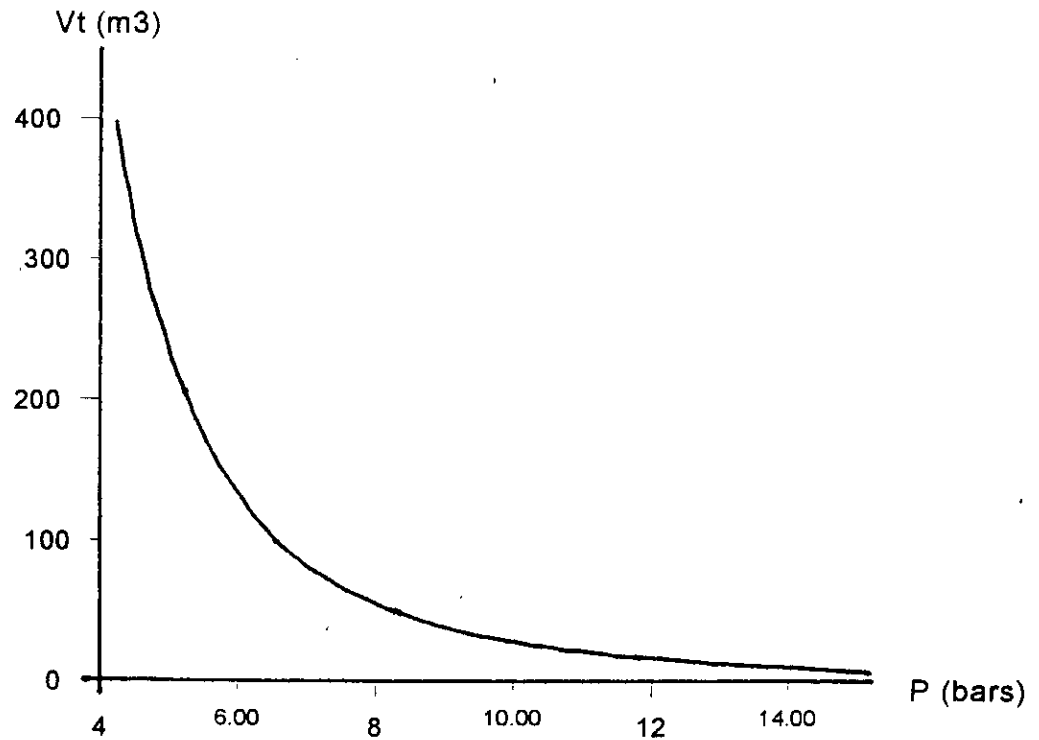


Figure (4.4): Variation de V_t en fonction de la pression P .

4.5.2 Influence de l'épaisseur e_v sur V_t :

L'éq (4.15) donne si on a : $P = 12$ bars.

$R = 140$ hectobars.

$$V_t = 1.81 \cdot 10^9 \cdot e_v^3 \quad (4.17)$$

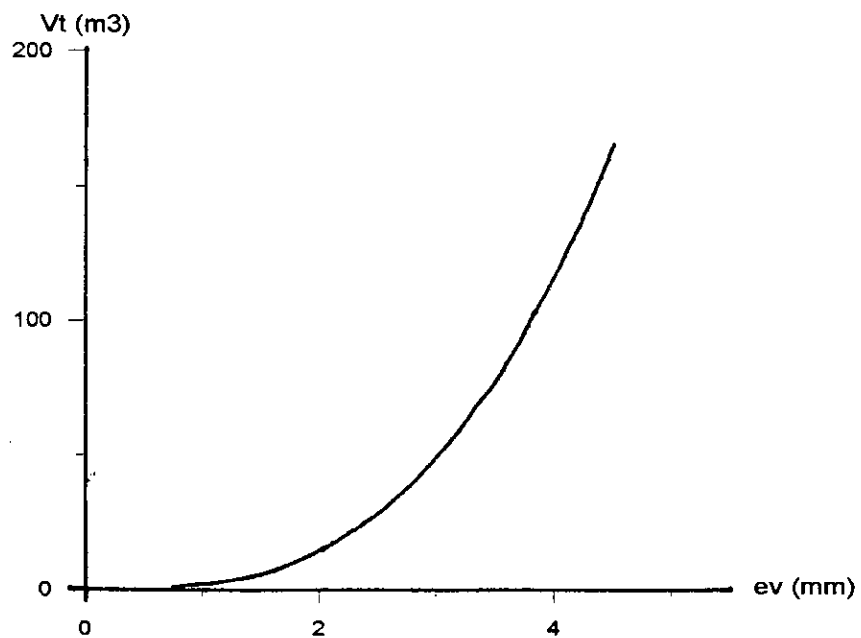


Figure (4.5): Variation de V_t en fonction de l'épaisseur e_v .

D'après (4.17), on constate que la croissance de (e_v) provoque une augmentation du volume total, (**figure 4.5**).

Donc on a intérêt à combiner le mieux possible entre une épaisseur de la virole la plus économique (moins couteuse) qui correspond à un volume plus au moins élevé.

4.5.3 Influence de R sur V_t :

Le même raisonnement s'applique pour : $P = 12$ bars.
 $e_v = 2$ mm.

$$V_t = 5272 \cdot 10^{-9} \cdot R^3 \quad (4.18)$$

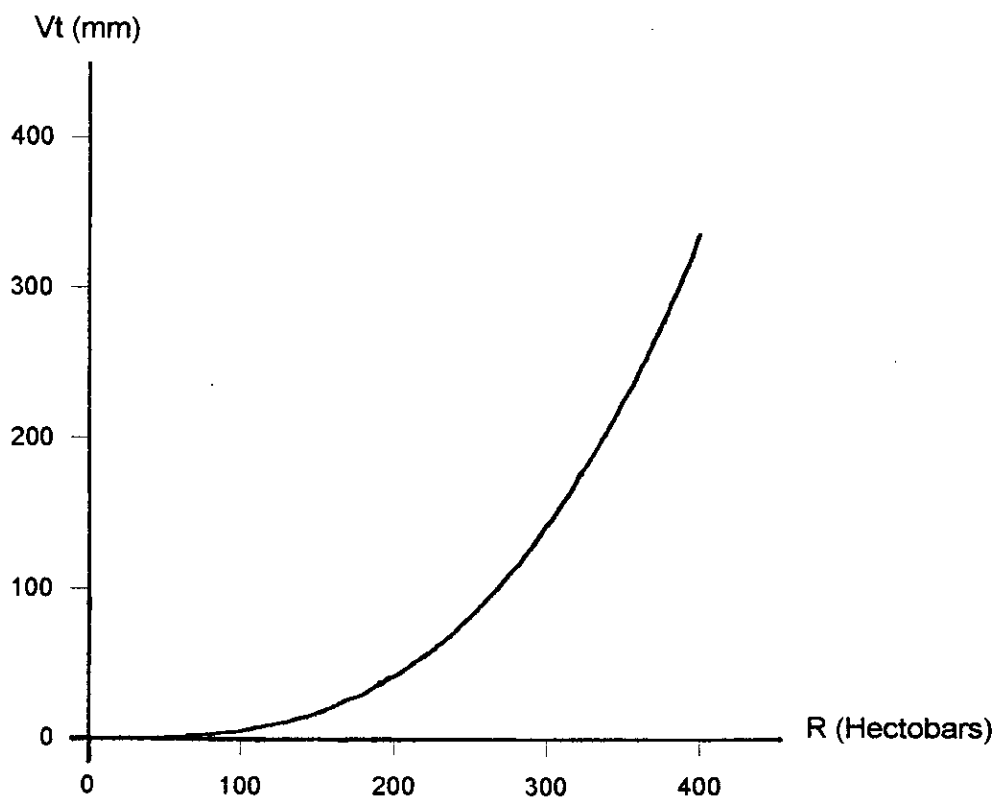


Figure (4.6) : Variation de V_t en fonction de R.

Pour une pression et un épaisseur constant, on a la même remarque que $V_t = f(e_v)$.

La variation de V_t suit la variation de R, (**figure (4.6)**). Donc il faut utiliser un matériau qui se caractérise par une haute charge de rupture à la traction (se qui répond à notre choix).

4.6 CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DU FOND (e_f) :

D'après [10] :

$$e_f = [(P D_e X) / (400 R \alpha)] + C \quad (4.19)$$

puisque : $C = 0$

$$\alpha = 0.9$$

$$X = 3$$

Donc : $D_e = D_i + 2 \cdot e_v = D_i + 2 \cdot (P D_i X / 200 R \alpha)$

Après simplification :

$$e_f = (P D_i / 3600 R^2) \cdot (30 R + P) \quad (4.20)$$

4.6.1 Influence de P sur e_f :

Si on fixe : $D_i = 1417 \text{ mm}$.

$R = 140 \text{ hectobars}$.

$$e_f = 2 \cdot 10^{-5} \cdot P \cdot \{ P + 4200 \} \quad (4.21)$$

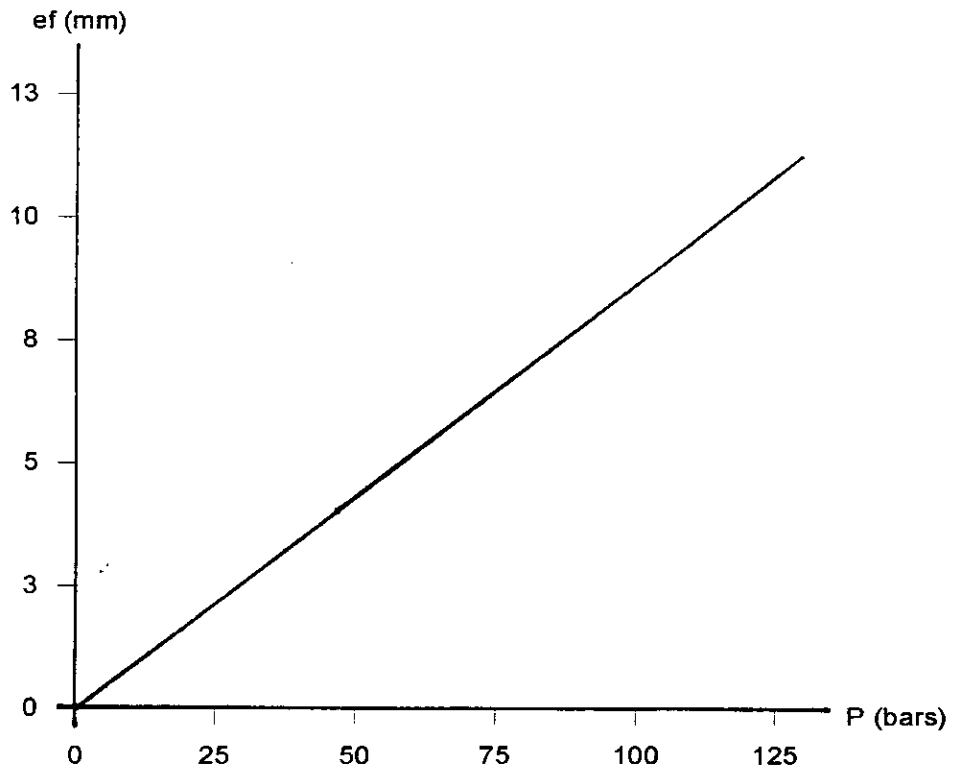


Figure (4.7) : Variation de e_f en fonction de P .

• RESULTATS :

1- La figure (4.7) montre que l'augmentation de la pression de service provoque une augmentation de l'épaisseur du fond.

En effet, pour une pression de $P = 12$ bars on a : $e_v = 2.06$ mm.
 $e_f = 1.01$ mm.

2- Pour une pression assez élevée, l'épaisseur de cette partie du réservoir est petite par rapport à l'autre partie cylindrique. Donc on peut dire que les réservoirs sphériques résistent mieux à la pression que les réservoirs cylindriques.

D'un autre côté, le problème de l'encombrement et la difficulté de réalisation de ces réservoirs restent poser par l'industrie gazière actuellement.

4.6.2 Influence de R sur e_f :

Si on fixe : $P = 12$ bars.

$D_i = 1417$ mm.

$$e_f = (4,723 / R^2) \cdot (30 R + 12) \quad (4.22)$$

Si : $R \nearrow \Rightarrow e_f \searrow$ (solution économique, (figure (4.8)).

Et : $R \searrow \Rightarrow e_f \nearrow$

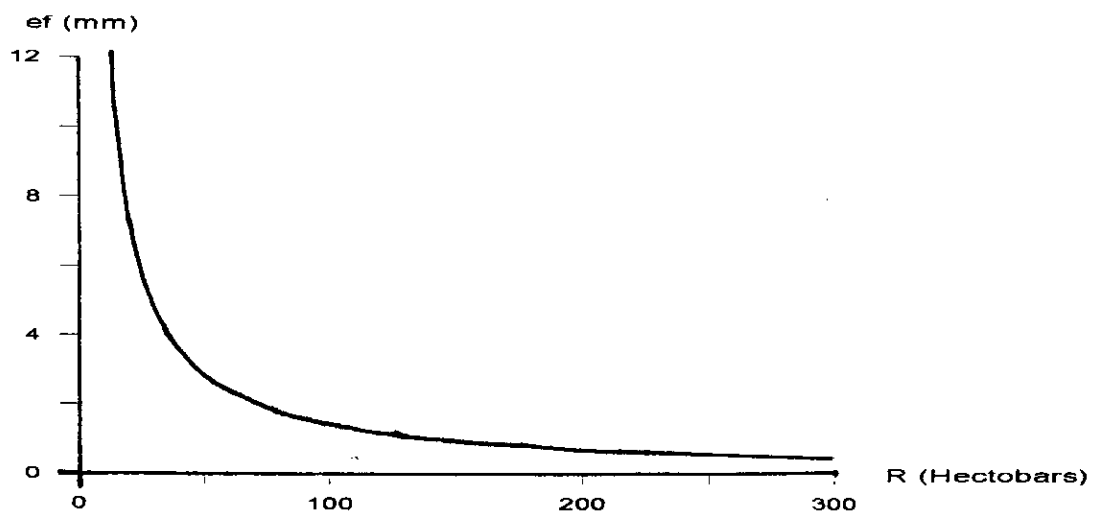


Figure (4.8) : La variation de e_f en fonction de R.

Finalement, pour des considérations de construction et de sécurité, on peut admettre que l'épaisseur du fond est égale à l'épaisseur de la virole.

$$e_f = e_v \quad (4.23)$$

4.7 ISOLATION THERMIQUE DU RESERVOIR DE STOCKAGE :

4.7.1 Introduction :

Le GNL sera stocké dans des réservoirs cryogéniques à -162 °C . Ainsi, l'isolation thermique des réservoirs de stockage est d'autant plus importante que l'enthalpie de vaporisation des fluides cryogéniques est faible.

A titre d'exemple, pour l'azote liquide 1Wh (3600 J) vaporise 22 cm^3 de N_2 liquide, ou 110 cm^3 d'hydrogène ou encore 1400 cm^3 d'hélium liquide.

En réalité, le choix de l'isolant qui est déterminé dans la conception des réservoirs cryogéniques, dépend essentiellement de considérations d'ordres techniques et d'ordre économiques :

- Pertes par évaporation,
- Prix de l'isolant,
- Poids de l'isolant,
- Encombrement de l'enceinte de stockage.

Le problème d'isolation est gouverné par la maîtrise des mécanismes de transfert de chaleur; notamment en cryogénie, où une analyse spécifique est nécessaire. On notera, en particulier que la convection et la conduction gazeuses sont généralement faibles.

Le **tableau (4.1)** montre quelques valeurs de la conductivité thermique des gaz à la pression atmosphérique.

Nature du Gaz	Conductivité K (mW/ mK)						
	273 K	200 K	150 K	100K	60 K	20 K	5,4 K
Méthane	30,5	20	14	9à11	-	-	-
Argon	16,5	-	-	-	-	-	-
Oxygène	24,5	-	-	-	-	-	-
Azote	24	18	14	9,5	-	-	-
Néon	46	37	27,5	21,5	16	-	-
Hydrogène	1668	128	98	66,5	42	15,5	-
Hélium	142,5	116	97	74,5	58	226	11

Tableau (4.1) : Conductivité thermique de gaz cryogénique à
À $P = 1\text{ bar}$ [2].

Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux isolants. Cependant, les contraintes dues au froid, à la sécurité et aux performances nécessaires, limitent l'application de certains matériaux.

La conductivité thermique des matériaux étant un facteur important, la **figure (4.9)** montre le classement des différents groupes d'isolants en fonction de ce facteur.

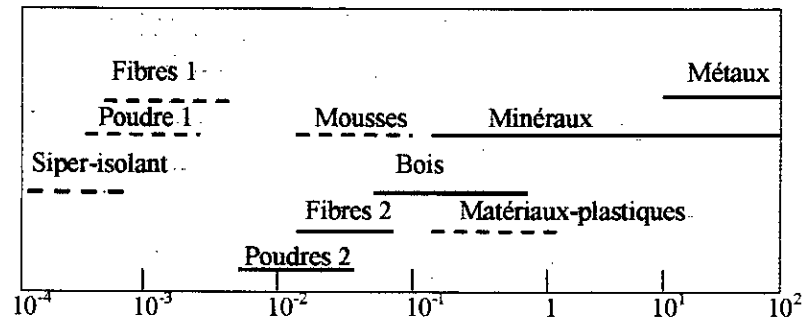


Figure (4.9) : Classement des divers types de matériaux isolants en fonction de leur conductivité thermique à la température ambiante [2].

D'autres critères doivent aussi être examinés pour le choix d'isolant :

- La facilités de mise en œuvre,
- La durée de vie,
- La facilité de l'isolation réalisée,
- Le prix,
- L'inflammabilité,
- La masse,
- Les caractéristiques mécaniques,
- Les caractéristiques physiques.

En général, le choix d'un isolant dépend souvent de la taille du réservoir. En effet, pour les récipients de grande taille, il est possible d'admettre des isolants moins performants; par contre, plus le réservoir est petit, plus les exigences des caractéristiques thermiques doivent être satisfaites.

4.7.2 Différents types d'isolants :

4.7.2.1 MOUSSES :

L'essor des mousses à été considérable depuis 1980. Elle sont régulièrement utilisées pour les gros stockages cryogéniques (Azote, Méthane,...), malgré que leur conductivité thermique est relativement élevée.

Les mousses, en générale à base de plastique, se classent dans la catégorie des matériaux cellulaires; elles présentent les avantages suivants :

- **Faible masse volumique,**
- **Fabrication aisée,**
- **Coût relativement bas.**

Les principales mousses utilisées sont :

1- Les mousses de polystyrène : (polyvinyliques-Kléber- et polyuréthane).

Ces mousses sont peu utilisées en cryogénie, car leurs propriétés thermiques ne sont pas excellentes et elles sont très perméables à la vapeur d'eau.

2- Les mousses de verre :

Ces mousses présentent des qualités thermiques très moyennes. Leurs fortes résistances aux charges de compression par rapport aux précédentes et surtout leur incombustibilité font que ces mousses sont un peu utilisées dans les gros stockages que les autres mousses.

Le **tableau (4.2)** présente les propriétés de diverses mousses.

Caractéristiques	mousse Kléber					Polyuréthane		Verre
	33	40	100	75	55	30	60	
1- Masse volumique(kg/m ³)	33	40	100	75	55	30	60	175
2- K (mW/ m . k)	28	28	30	30	29	21	20	55
3- Résistance (bar) *10	25	4	110	80	55	20	60	85
4- Perméabilité à la vapeur d'eau(g/ m ² . h) *10 ⁺³	18	18	13	14	16	-	-	-
5- T _{max} d'utilisation (°C)	70	70	70	70	70	-	-	430

Tableau (4.2) : Les propriétés de divers mousses [2].

4.7.2.2 POUDRES :

Si l'on se réfère aux caractéristiques thermiques des poudres, on s'aperçoit que celles-ci se placent entre les mousses et les superisolants. De ce fait, les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, particulièrement pour les réservoirs de taille moyenne (notre cas). La conduction thermique résiduelle des poudres est due à la conduction dans le solide, et au transfert de chaleur par rayonnement.

La **figure (4.10)** représente la conductivité thermique des poudres sous vide. On notera que la conductivité thermique K est faible.

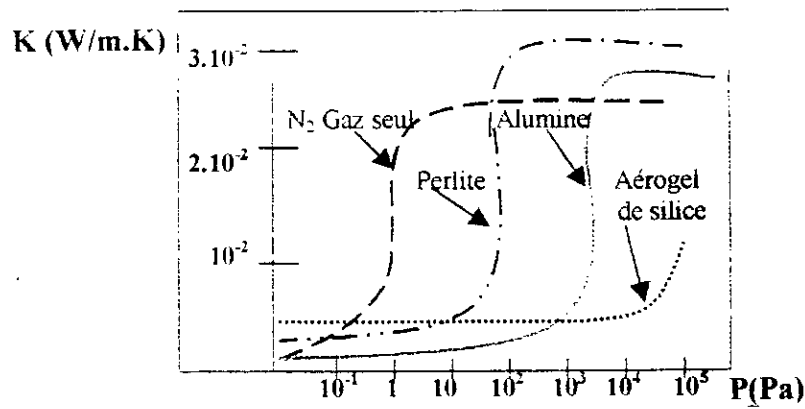


Figure (4.10) : Conductivité thermique des poudres sous vide [2].

La **Perlite** est la principale poudre utilisée, on rencontre aussi :

- **L'aluminium, le carbone, le Silicate de calcium.**
- **La silice (sous forme colloïdale).**
- **Le dioxyde de titane.**

Les caractéristiques de la perlite sont :

- Conductivité thermique moyenne : $K = 2 \text{ mW} / (\text{m} \cdot \text{k})$ entre 300 k et 77 k.
- Masse volumique : $55 \text{ Kg} / \text{m}^3$.
- Pouvoir adsorbant : pratiquement nul.
- Incombustible.

Ces poudres (perlite), de roche volcanique à base de SiO_2 et d' Al_2O_3 est expansée à l'aide d'un traitement thermique.

4.7.2.3 Superisolants :

Ce sont des matériaux relativement récents puisque les premiers essais remontent au début des années 1960.

Le principe d'un superisolant est de réduire les échanges de chaleur par rayonnement sans augmenter les échanges par conduction solide, tout en s'affranchissant de la conduction gazeuse. Le flux de chaleur par rayonnement peut être réduit en interposant entre la paroi froide et la paroi chaude un certain nombre d'écrans réflecteurs. Notons que :

- Le flux de chaleur par conduction gazeuse peut être pratiquement annulé,
- Le flux de chaleur par conduction solide est nul, si on peut éliminer les contacts entre les écrans,

- Le superisolant a pour rôle d'assurer le meilleur compromis pour réduire les principaux flux de chaleur. Il se compose d'une succession d'écrans réflecteurs entre lesquelles sont interposées des feuilles d'écrans réflecteurs peu conductrices (**figure 4.11**),
- Les écrans réflecteurs sont constitués d'un métal réfléchissant (Aluminium).

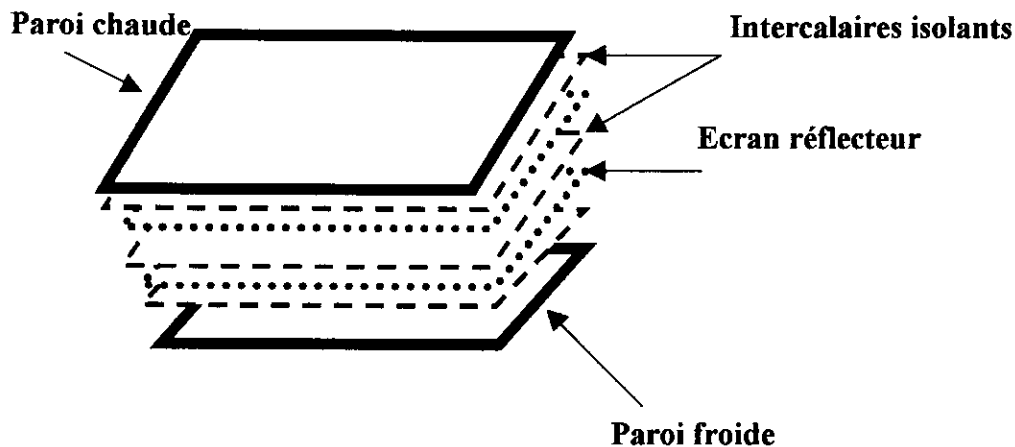


Figure (4.11) : Schéma d'un superisolant.

Dans ce cas, le flux de chaleur transmis est différent selon :

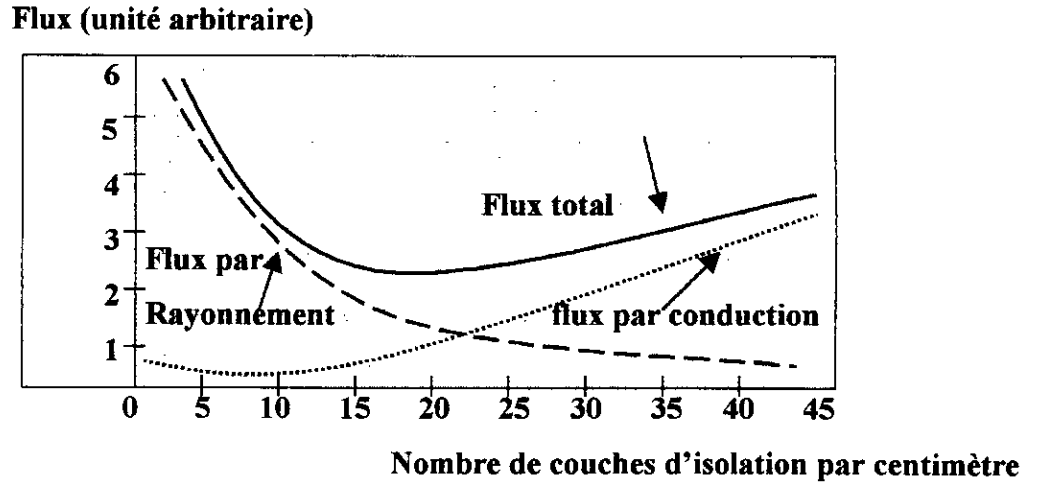
- Les matériaux utilisés dans la conception du superisolant,
- Le tassement de l'isolation (nombre de couches par unité d'épaisseur).

La **figure (4.12)** montre qu'il existe un tassement optimal pour un complexe écrans / intercalaires donné. Pour les superisolants les plus courants, l'optimum se trouve entre 15 et 40 couches / cm.

Le **tableau (4.3)** montre quelques valeurs de flux de chaleur transmis entre deux plaques planes parallèles séparées par divers types d'isolants.

Le superisolant est relativement coûteux, ces principaux inconvénients sont :

- La nécessité de travailler sous vide ($< 10^{-2}$ Pa).
- Une conductivité très anisotrope surtout dans le cas d'écrans d'Aluminium (facteur d'anisotropie de l'ordre de 10^4).
- Une dégradation importante des performances sous l'effet de continuité de compression, d'une part, et d'un défaut de continuité d'isolation d'autre part.



Figures (4.12) : Flux thermique transmis dans un superisolant en fonction du nombre de couches par unité d'épaisseur [2].

Isolants	Flux entre 300 et 77 K (W / m ²)
Vide poussé 10 ⁻⁶ mbar (émissivité 0,02).....	9
Gaz à la pression atm. H ₂	29
H _e	256
N ₂ ou air	41
(épaisseur de la lame de gaz est 10 cm).	
Perlite sous vide poussé (épaisseur 10 cm)	4,5
Perlite sous vide primaire < 10 ⁻² mbar (10cm)	56
Klégécéll 35 Kg / m ³ (10 cm)	58
Superisolant K=0,3 .10 ⁻⁷ (mW/m.K) (2cm)	0,33

Tableau (4.3) : Flux de chaleur transmis entre deux plaques planes séparées par divers types d'isolants [2].

4.7.2.4 Vide :

Le phénomène de cryopompage permet d'obtenir, avec une certaine difficulté, du vide poussé (les pressions résiduelles peuvent être inférieures à 10^{-5} Pascals).

Si l'on veut une isolation de bonne qualité, il est nécessaire d'éliminer la conduction gazeuse, cela revient à conserver dans l'enceinte isolée une pression inférieure à 10 Pascals pour les poudres et 10^{-2} Pascals pour les superisolants.

4.7.3 Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolations :

Les premiers critères pour le choix d'un mode d'isolation déterminé parmi les nombreux types existants, sont l'efficacité recherchée et le prix de revient. Malgré les grandes différences dans les valeurs du flux de chaleur transmis, il est certain qu'un réservoir de grandes ou de moyennes dimensions (1 million de litres par exemple) sera plus facilement isolé avec des poudres, que par tout autre moyen. Par contre, les cryostats de laboratoire ainsi que les conteneurs de faible capacité seront superisolés.

Dans notre cas il faut combiner tous les critères pour satisfaire les conditions imposées.

- **CHOIX RETENU :**

Après une analyse des caractéristiques de chaque type d'isolation, on peut dire que les poudres et plus précisément la (**Perlite**), sont les plus adaptés pour notre cas, puisqu'il est préférable de perdre un peu de G.N.L par évaporation, que le prix de revient de notre installation soit plus élevé, et aussi à cause de la conductivité thermique des poudres qui est moyenne entre celle des mousses et celle des isolants.

4.8 CALCUL DES PERTES PAR EVAPORATION :

4.8.1 Calcul du flux de chaleur ϕ :

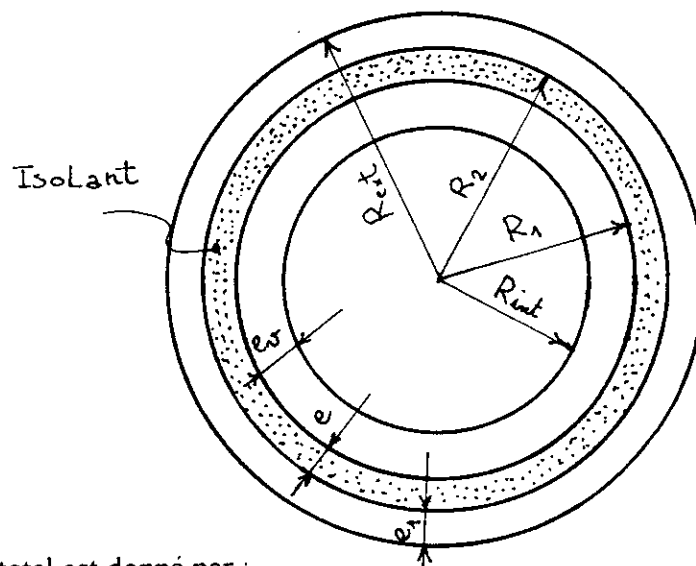
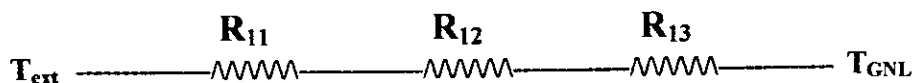
Le flux de chaleur qui passe de la paroi extérieure du réservoir au GNL suit les étapes suivantes :

- Conduction à travers la paroi extérieure,
- Conduction à travers l'isolant,
- Conduction à travers la paroi intérieure.

Si on considère que l'épaisseur de la paroi extérieure (épaisseur de sécurité) est égale à 1 mm et que l'on :

- Néglige la convection (puisqu'on considère que le G.N.L est en repos),
- Et si l'on admette également que le rayonnement est négligeable devant la conduction (le flux de chaleur par rayonnement représente 1/15 que le flux par conduction) [2], le problème devient beaucoup plus simple. En effet :

Pour la partie cylindrique, le réseau électrique équivalent est le suivant :



Le flux de chaleur total est donné par :

$$\phi = \phi_1 + 2 \cdot \phi_2 \quad (4.24)$$

ϕ_1 : Le flux de chaleur latéral qui passe à travers la partie cylindrique.

ϕ_2 : Le flux de chaleur qui passe à travers une calotte (fond).

a.1- Calcul de ϕ_1 :

Le flux de chaleur qui traverse la partie cylindrique du réservoir est donné par :

$$\phi_1 = (T_{\text{ext}} - T_{\text{G.N.L}}) / (R_{11} + R_{12} + R_{13}) \quad (4.25)$$

Avec : T_{ext} : Température du milieu extérieur $T_{\text{ext}} = 300 \text{ K}$.

T_{GNL} : Température du G.N.L à l'intérieur de l'enceinte de stockage $T_{\text{GNL}} = 111 \text{ K}$.

$R_{li} (i=1,3)$: Les résistances thermiques des différentes couches en ($\text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$).

On a :

$$R_{11} = (1 / 2\pi K_P L_1) \ln \{ R_{\text{ext}} / R_2 \} \quad (1)$$

$$R_{12} = (1 / 2\pi K_{\text{isolant}} L_1) \ln \{ R_2 / R_1 \} \quad (2)$$

$$R_{13} = (1 / 2\pi K_P L_1) \ln \{ R_1 / R_{\text{int}} \} \quad (3)$$

- La longueur du cylindre : $L_1 = L + 2 \cdot h_2 = 8,502 + 2 \cdot 0,236 = 8,974 \text{ mm}$.
- K_p : Conductivité thermique de la paroi du réservoir (acier inoxydable 304).

• **Figure(3.2)** $\left\{ \begin{array}{l} K_p(111 \text{ k}) = 10 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{k} \\ K_p(300 \text{ k}) = 20 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{k} \end{array} \right\} \Rightarrow K_{p\text{moy}} = 15 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{k}$

- K_{isolant} : Conductivité thermique de l'isolant.

$$K_{\text{isolant}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ W} / \text{m} \cdot \text{k}$$

- R_{int} : Rayon intérieur du cylindre $R_{\text{int}} = 0,7085 \text{ m}$.
- R_{ext} : Rayon extérieur du cylindre.

• $R_1 = R_{\text{int}} + e_v$ $\left\{ \begin{array}{l} e_v : \text{Epaisseur de l'enveloppe.} \\ e : \text{Epaisseur de l'isolant.} \\ e_1 : \text{Epaisseur extérieure (} e_1 = 1 \text{ mm).} \end{array} \right.$

• $R_2 = R_1 + e$

• $R_{\text{ext}} = R_2 + e_1$

$$1- \quad R_{11} = 11,8 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \{ 10^{-3} \cdot (R_i + e_v + e)^{-1} + 1 \} \quad (4)$$

$$2- \quad R_{12} = 8,86 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \{ e \cdot (R_i + e_v)^{-1} + 1 \} \quad (5)$$

$$3- \quad R_{13} = 11,8 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \{ e_v \cdot (R_i)^{-1} + 1 \} \quad (6)$$

$$\text{On pose : } B = B(e_v, e) = R_{11} + R_{12} + R_{13} \quad (7)$$

Finalement, le flux de chaleur ϕ_1 qui passe à travers la partie cylindrique du réservoir est donné par :

$$\phi_1 = 189 / B(e_v, e) \quad (4.26)$$

Le **tableau (4.4)** nous montre l'influence de e sur ϕ_1 pour différentes valeurs de l'épaisseur de la virole e_v . La **figure (4.13)** montre l'évolution de ϕ_1 en fonction de l'épaisseur de l'isolant.

e = 1 mm				
e (mm)	R₁₁ * 10⁷	R₁₂	R₁₃ * 10⁷	φ₁ (W)
	(m . K / W)			
1	16,60	0,012	16,6	15745,6
2	16,60	0,025		7558,9
3	16,56	0,037		5107,6
4	16,52	0,050		3779,7
5	16,50	0,062		3048,2
6	16,48	0,075		2519,9
7	16,45	0,087		2172,3
8	16,43	0,099		1909,1
9	16,41	0,112		1687,4
10	16,38	0,124		1524,15
e = 2 mm				
1	16,60	0,012	33,3	15745,4
2	16,56	0,025		7558,5
3	16,52	0,037		5107,4
4	16,50	0,050		3779,6
5	16,48	0,062		3048,1
6	16,45	0,074		2553,9
7	16,43	0,087		2172,28
8	16,41	0,099		1908,9
9	16,38	0,111		1702,6
10	16,35	0,124		1524,1

Tableau (4.4) : Variation de φ₁ en fonction de l'épaisseur e.

e = 3 mm				
e (mm)	R₁₁ * 10⁻⁷	R₁₂	R₁₃ * 10⁻⁷	φ₁ (W)
	(m . K / W)			
1	16,56	0,012	49,8	15741,3
2	16,52	0,025		7557,9
3	16,50	0,037		5107,2
4	16,48	0,050		3779,6
5	16,45	0,062		3048,1
6	16,43	0,075		2519,8
7	16,41	0,087		2172,2
8	16,38	0,099		1908,9
9	16,35	0,112		1687,4
10	16,32	0,124		1524,1
e = 4 mm				
1	16,52	0,012	66,44	15739,1
2	16,50	0,025		7557,5
3	16,48	0,037		5106,9
4	16,45	0,050		3779,4
5	16,43	0,062		3048,0
6	16,41	0,074		2519,7
7	16,38	0,087		2172,2
8	16,35	0,099		1909,0
9	16,32	0,112		1687,4
10	16,30	0,123		1536,5

Tableau (4.4) : Variation de φ₁ en fonction de l'épaisseur e (suite).

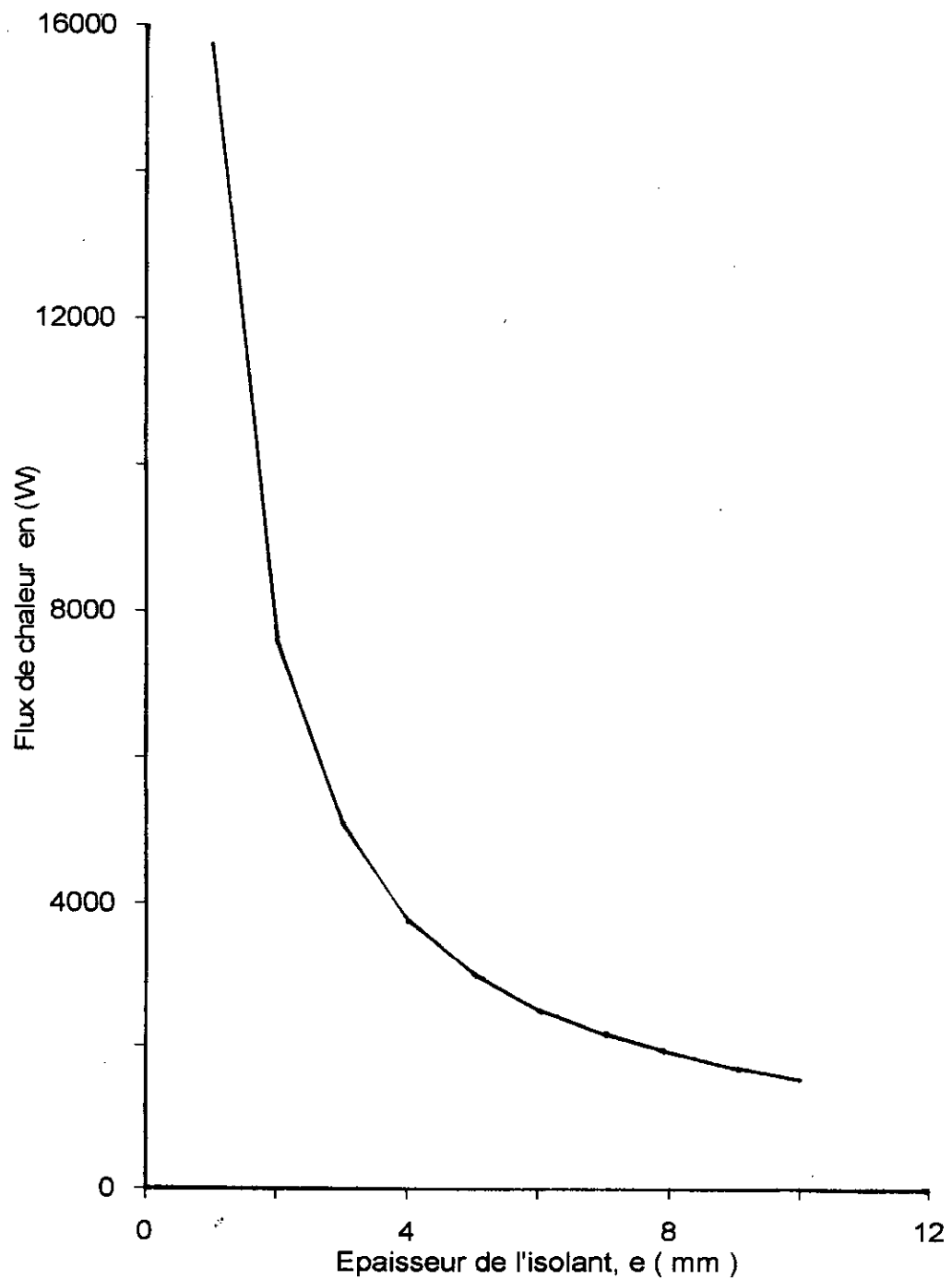


Figure (4.13) : Variation de ϕ_1 en fonction de l'épaisseur e.

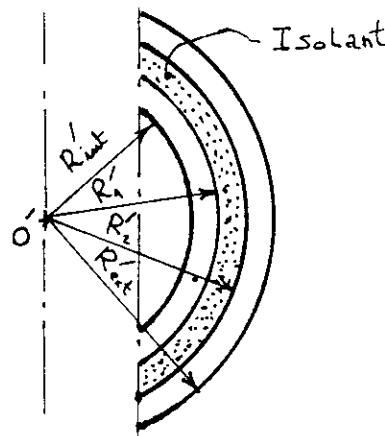
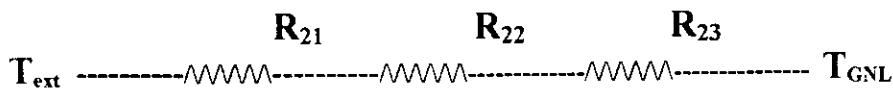
• **Remarques :**

D'après le **tableau (4.4)**, on remarque qu'à partir de $e = 2 \text{ mm}$ le flux de chaleur ϕ_1 diminue par rapport au flux correspondant à $e = 1 \text{ mm}$ d'environ la moitié, puis le flux ϕ_1 continue à diminuer avec l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant (e) jusqu'à l'épaisseur $e = 10 \text{ mm}$, où ϕ_1 représente $(1/10)$ de la valeur initiale (pour $e_v = 1 \text{ mm}$).

On constate aussi, que le flux de chaleur à travers la partie cylindrique est presque indépendant de l'épaisseur intérieure du réservoir donc ($\phi_1 = f(e)$).

a.2- Calcul de ϕ_2 :

- Le réseau électrique équivalent est :



Le flux de chaleur ϕ_2 est donné par :

$$\phi_2 = (T_{ext} - T_{G.NL}) / (R_{21} + R_{22} + R_{23}) \quad (4.27)$$

Avec : $T_{ext} = 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300 \text{ k.}$

$T_{G.NL} = -162 \text{ }^\circ\text{C} = 111 \text{ k.}$

R_{2i} ($i = 1,3$) : Les résistances thermiques.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{21} = (R'_{ext} - R'_2) (S_{ext} \cdot S_2)^{-1/2} \cdot K_p^{-1} \quad (1) \\ R_{22} = (R'_2 - R'_1) (S_2 \cdot S_1)^{-1/2} \cdot K_{is}^{-1} \quad (2) \\ R_{23} = (R'_1 - R'_{int}) (S_1 \cdot S_{int})^{-1/2} \cdot K_p^{-1} \quad (3) \end{array} \right.$$

Avec :

$$R'_{int} = R_S$$

$$R'_1 = R_S + e_v$$

$$R'_2 = R_S + e_v + e$$

$$R'_{ext} = R_S + e_v + e + e_1$$

S_{int}, S_1, S_2, S_3 : Représentes les surfaces des calottes pour différents rayons.

• **Calcul des S_i :**

D'après [13], la surface d'une calotte sphérique est donnée par :

$$S = 2 \pi \cdot R_i'^2 \cdot \sin \{ (\alpha - \beta) / 2 \} \quad (4.28)$$

On a : $\alpha = \pi - 2 \varphi$.

$$\sin(\varphi) = X / R_S \Rightarrow \varphi = \arcsin(X / R_S)$$

• On considère H comme hauteur du G.N.L conté sur la verticale à partir du point (m).

$$\alpha = \pi - 2 \cdot \arcsin \{ X / R_S \} \quad (4.29)$$

On a : $h_S = R_S \sin [(\alpha / 2) - \beta]$

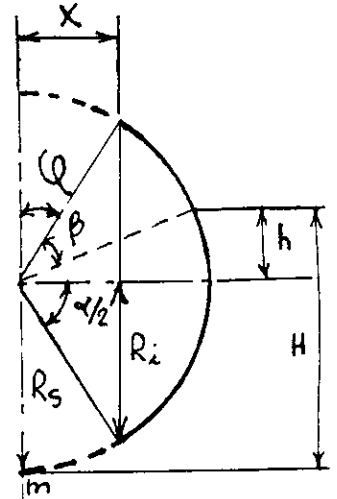
Donc : $H = H_i = R'_i + h_S = R'_i + R_S \sin [(\alpha / 2) - \beta]$

$$\Rightarrow \sin [(\alpha / 2) - \beta] = (H - R'_i) / R_S$$

Se qui donne :

$$(\alpha / 2) - \beta = \arcsin [(H - R'_i) / R_S]$$

$$\Rightarrow \beta = (\alpha / 2) - \arcsin [(H - R'_i) / R_S] \quad (4.30)$$



Puisque : $X = (5/12) R_i = 0.2952 \text{ mm}$.

$R_S = (13/12) R_i = 0.7675 \text{ mm}$.

Donc : $\sin \varphi = 0.3846 \rightarrow \varphi = 22,62^\circ$ et $\alpha = 134,76^\circ$.

A partir de l'éq (4.30) :

$$(\alpha - \beta) / 2 = (1/2) \{ \alpha - (\alpha/2) + \arcsin [(H - R'_i) / R_S] \}$$

Donc :

$$(\alpha - \beta) / 2 = (\alpha / 4) + (1/2) \arcsin [(H - R_i') / R_s]$$

Soit :

$$(\alpha - \beta) / 2 = 33,69 + (1/2) \arcsin [(H - R_i') / R_s] \quad (4.31)$$

Finalement :

$$\text{Pour } S_{\text{int}}(H) \text{ on a : } R_i' = R_s = 0,7675 \text{ mm.}$$

$$\Rightarrow S_{\text{int}}(H) = 1,18 \pi \sin [(1/2) \arcsin (1,3 H - 1) + 33,69]$$

On remarque que $S_{\text{int}} = S_{\text{int}}(H)$

$$\text{Si : } A = A(H) = \sin [(1/2) \arcsin (1,3 H - 1) + 33,69] \quad (4.32)$$

$$S_{\text{int}}(H) = 1,18 \pi \cdot A(H)$$

• De même pour $S_1(H)$, $S_2(H)$ et $S_{\text{ext}}(H)$:

$$S_1(H) = 2\pi (0,7675 + e_v)^2 \cdot A(H)$$

$$S_2(H) = 2\pi (0,7675 + e_v + e)^2 \cdot A(H)$$

$$S_{\text{ext}}(H) = 2\pi (0,7685 + e_v + e)^2 \cdot A(H)$$

Finalement :

$$R_{21} = \{ 3 \pi 10^{-4} \cdot A(H) (0,7685 + e_v + e) (0,7675 + e_v + e) \}^{-1} \quad (4)$$

$$R_{22} = \{ 4 \pi 10^{-3} \cdot A(H) (0,7675 + e_v + e) (0,7675 + e_v) \}^{-1} \cdot e \quad (5)$$

$$R_{23} = \{ 23 \pi \cdot A(H) (0,7675 + e_v) \}^{-1} \cdot e_v \quad (6)$$

$$\text{On pose : } C(e_v, e, H) = R_{21} + R_{22} + R_{23}$$

$$\phi_2 = 189 / C(e_v, e, H) \quad (4.33)$$

A partir de l'éq (4.33) on peut dire que $\phi_2 = \phi_2(H, e, e_v)$.

Le **figure (4.14)** nous montre la variation de ϕ_2 en fonction de la hauteur H pour différentes valeurs de e ($e_v = 1 \text{ mm}$).

On remarque aussi que le flux de chaleur qui passe par les deux calottes est indépendant de l'épaisseur de la virole e_v .

• **Flux total ϕ :**

$$\text{Puisque on a : } B(e_v, e) = B(e) = R_{11} + R_{12} + R_{13}$$

$$C(e_v, e, H) = C(e, H) = R_{21} + R_{22} + R_{23}$$

$$\phi = 189 / B(e) + 378 / C(e, H) \quad (4.34)$$

E(mm) H(m)		ϕ_2 (W)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1		78,7	39,4	26,2	19,7	15,7	13,1	11,2	9,8	8,7	7,9
0,2		225	112	75	65,2	45	37,5	32,1	28,1	25	10,3
0,4		450	255	150	112	90	75	64,3	56,2	49,7	45
0,6		675	337	225	156	135	112	96,4	84,4	75,0	67,5
0,8		787	394	262	197	157	131	112	98,4	87,5	78,7
1,0		900	450	300	225	180	150	129	112	100	90
1,2		995	497	332	249	199	166	142	124	110	99
1,3		1260	630	420	315	282	210	180	157	140	126

Tableau (4.5) : Variation de flux de chaleur (ϕ_2) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur du G.N.L (H).

E(mm) H(m)		ϕ (W)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1		15903	7638	5160	3874	3080	2546	2195	1929	1705	1540
0,2		16195	7784	5258	3910	3138	2595	2236	1965	1737	1545
0,4		16645	8009	5408	4005	3228	2670	2301	2021	1787	1614
0,6		17095	8234	5558	4092	3318	2745	2365	2078	1837	1659
0,8		17320	8346	5633	4173	3363	2782	2397	2106	1862	1681
1,0		17545	8459	5708	4230	3408	2820	2430	2134	1887	1704
1,2		17735	8554	5871	4277	3446	2851	2456	2158	1908	1723
1,3		18265	8819	5948	4410	3612	2940	2532	2224	1967	1776

Tableau (4.6) : Variation de flux de chaleur (ϕ) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur du GNL (H)

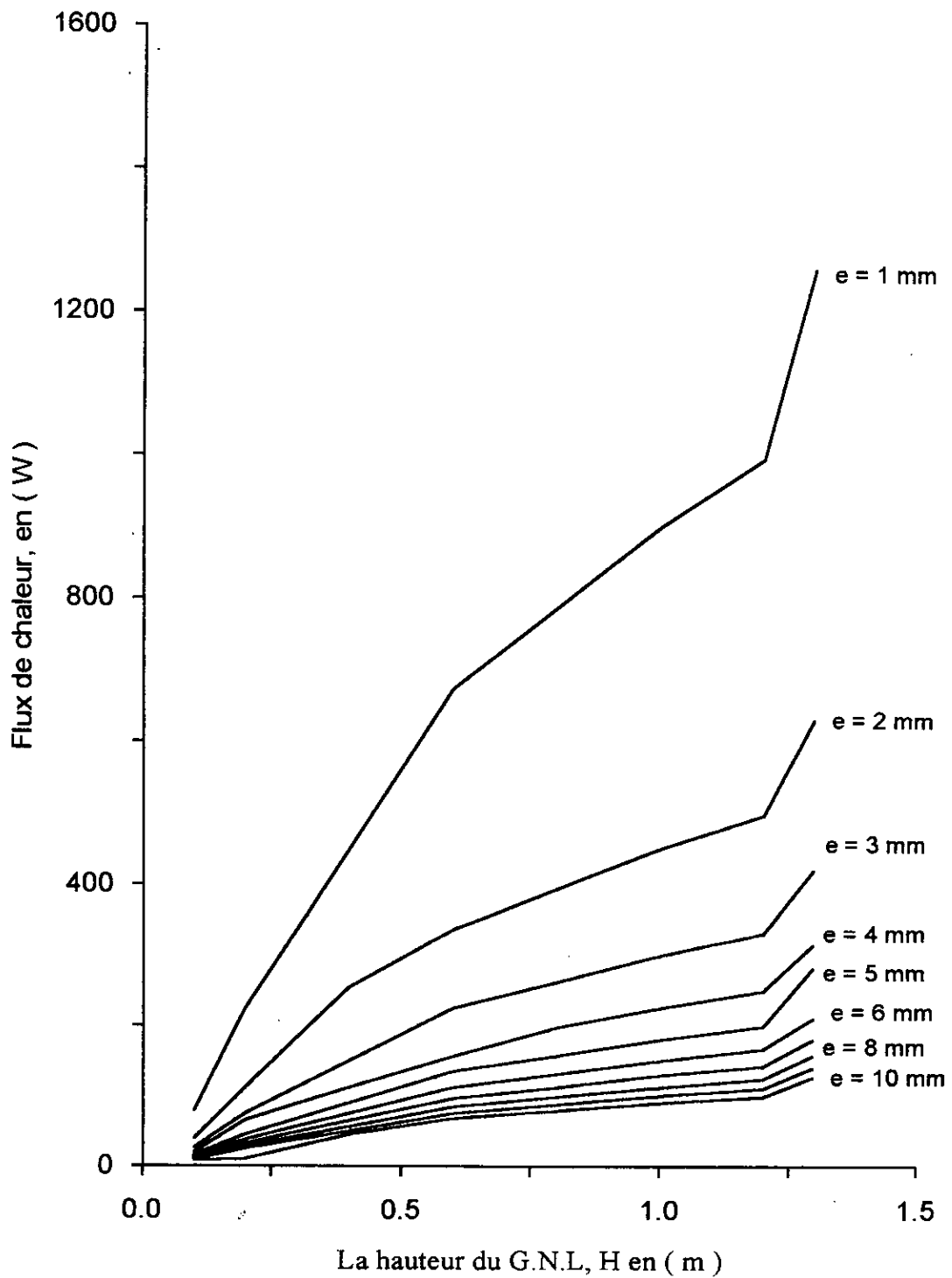


Figure (4.14) : Variation de flux de chaleur ϕ_2 en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur du GNL (H).

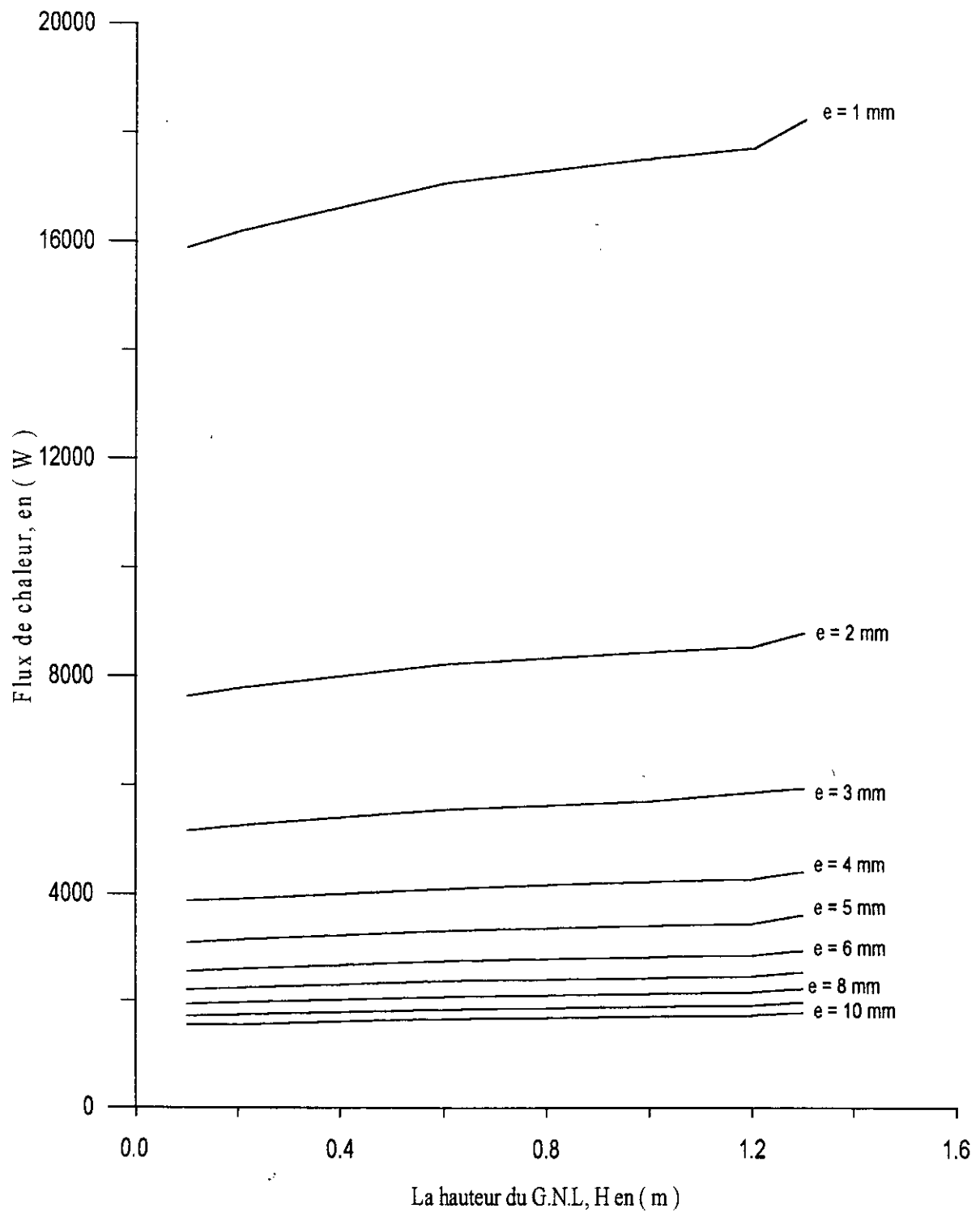


Figure (4.15) : Variation de flux de chaleur ϕ en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur du GNL (H).

On trace le **tableau (4.6)** qui donne la variation de ϕ en fonction de H pour différentes valeurs de l'épaisseur d'isolant e ($e_v = 1$ mm).

• **Résultats :**

D'après les figures (4.14) et (4.15), on peut constater ces remarques :

- Pour une épaisseur d'isolant (e) constant, le flux de chaleur ϕ_2 transmis à travers une calotte augmente avec la croissance de la hauteur du remplissage H du gaz naturel liquéfié.
- La comparaison entre les deux flux ϕ_1 et ϕ_2 montre que le flux de chaleur ϕ_1 est en fonction de l'épaisseur d'isolant (e), tandis que ϕ_2 est en fonction de (e) et la hauteur (H).
- Le flux de chaleur total ϕ est indépendant de l'épaisseur de l'acier inoxydable utilisé.
- On remarque aussi que pour une épaisseur d'isolant (e) constante, le flux total augmente avec la croissance de la hauteur (H). Et pour une hauteur (H) constante, le flux total est inversement proportionnel à l'épaisseur d'isolant (e).
- Dans la réalité, il faut combiner entre le choix d'une hauteur H équivalente à un maximum de volume, et d'utiliser convenablement une épaisseur d'isolant (e) correspond au flux le plus faible possible pour diminuer les pertes par évaporation.

4.8.2 Calcul de débit du G.N.L évaporé :

Le débit du G.N.L évaporé (m_e) est donné par l'équation :

$$m_e(t) = \phi / \Delta H_v$$

ΔH_v : La chaleur latente de vaporisation du G.N.L, elle est donnée par :

$$\Delta H_v = \Delta H_v(-152^\circ\text{C}) + C_p \cdot \Delta T \quad (4.35)$$

$\Delta H_v(-152^\circ\text{C}) = 581,71$ KJ / Kg : Chaleur de vaporisation à $T = -152^\circ\text{C}$, car la température de vaporisation du G.N.L est $T = -152^\circ\text{C}$.

$C_p = 3,2477$ KJ / Kg . $^\circ\text{C}$: La chaleur massique du G.N.L à $T = -162^\circ\text{C}$.

$\Delta T = T_{ev} - T_{G.N.L} = -152 - (-162) = 10^\circ\text{C}$.

Donc : $\Delta H = 581,71 + 3,2477(10) = 6144,187$ KJ / Kg.

Ou : $\Delta H = 614160$ W. S / Kg.

Finalement :

$$m_e(t) = 10^{-4} \{ 3,1 / B(e) + 6,1 / C(e, H) \} \quad (4.36)$$

$\begin{matrix} e(\text{mm}) \\ H(\text{m}) \end{matrix}$		$m_e \text{ (Kg/S)} * 10^{+3}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,1		26	12	8	7	5	4	4	3	3	2
0,2		26	13	8	7	5	4	4	3	3	2
0,4		27	13	9	7	5	4	4	3	3	3
0,6		28	13	9	7	5	4	4	3	3	3
0,8		28	13	9	7	5	4	4	3	3	3
1,0		28	14	9	7	5	5	4	3	3	3
1,2		29	14	9	7	5	5	4	3	3	3
1,3		30	14	10	7	5	5	4	4	3	3

Tableau (4.7) : Variation de débit du G.N.L évaporé (m_e) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

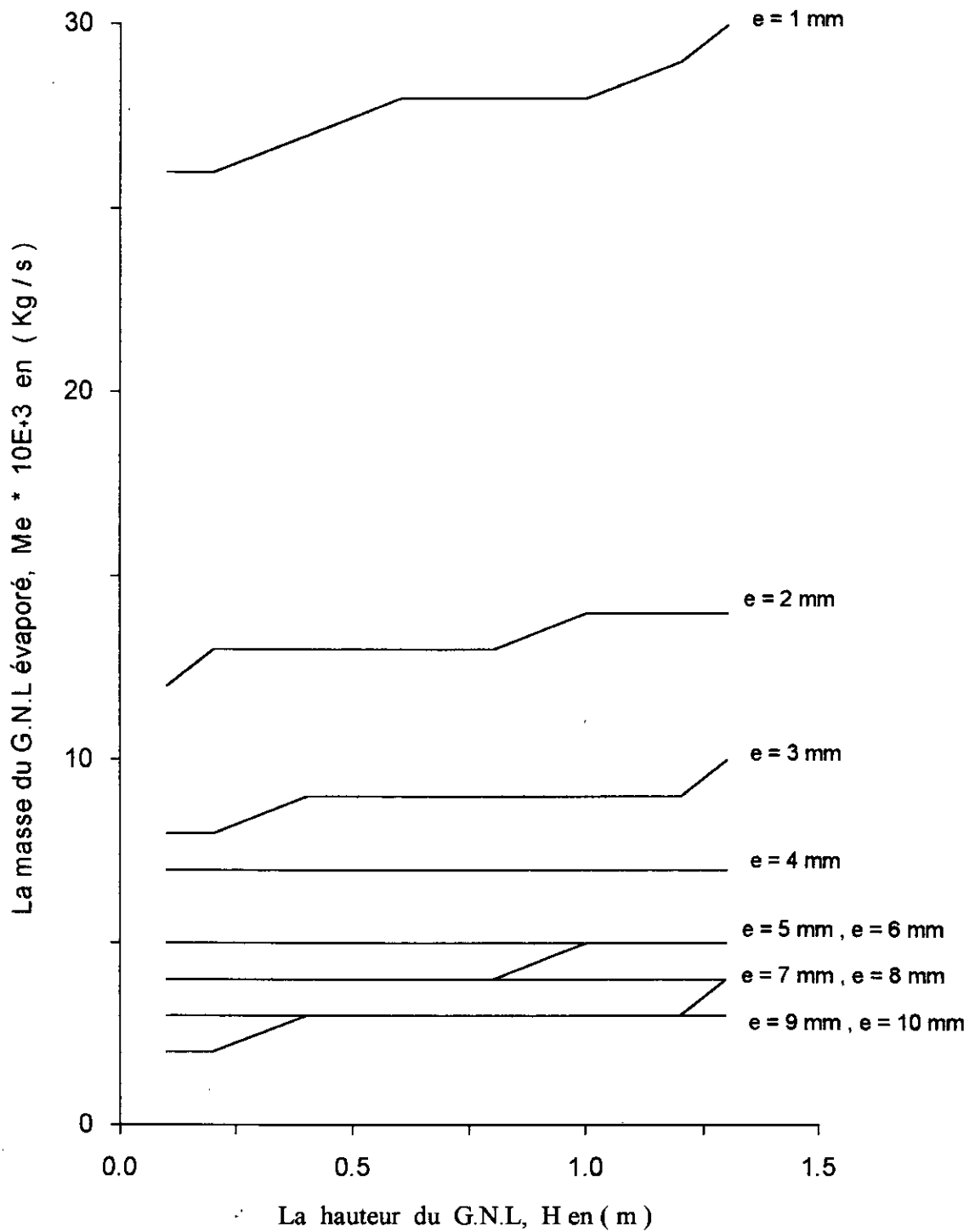


Figure (4.16) : Variation de débit du G.N.L évaporé (m_e) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

A partir de l'éq (4.36), on trace le **tableau (4.16)** qui donne la variation du débit évaporé en fonction de la hauteur (H) pour différentes valeurs de l'épaisseur d'isolant (e) (on fixe e_v à 1 mm).

4.8.3 Calcul du taux d'évaporation du G.N.L :

D'après l'éq (4.2), pour calculer le taux d'évaporation il faut calculer la masse du G.N.L qui se trouve dans le réservoir.

Pour une hauteur de remplissage (H), la masse du carburant est donné par :

$$1- \quad M_{GNL} = \rho_{GNL} \cdot V \quad (4.37)$$

$$V = V_{cylindre} + 2 \cdot V_{calotte} \quad (4.38)$$

$$a- \quad V_{cylindre} = L_1 \cdot S_1$$

$$S_1 = \text{aire (ABOA)} + \text{aire (AOBA)}^{\text{triangle}}$$

$$\bullet \quad \text{L'air curviligne (ABOA)} = 2 \int_0^{R_i} \int_0^{\pi} r \, dr \, d\theta$$

$$= R_i^2 (\pi - \theta).$$

$$\bullet \quad \text{L'air du triangle (AOBA)} = (\frac{1}{2}) \sin(2\theta) R_i^2.$$

$$\text{Donc :} \quad S_1 = R_i^2 \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin(2\theta) \}$$

Le volume du G.N.L dans la partie cylindrique :

$$V_{cylindrique} = L_1 \cdot R_i^2 [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin(2\theta)] \quad (4.39)$$

• Détermination de l'angle θ :

A partir de la figure ci-dessus on a :

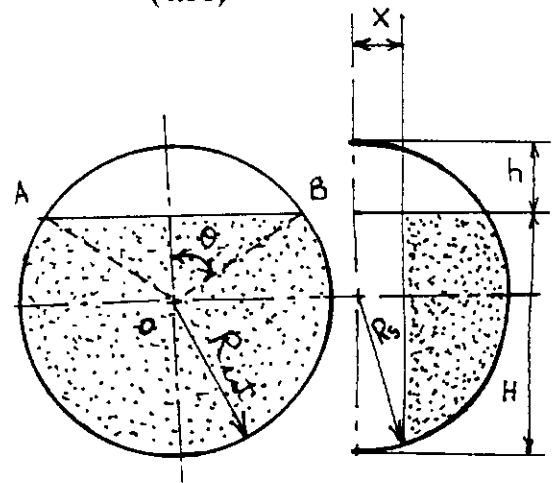
$$\text{Et :} \quad \begin{cases} h = R_i - R_i \cos(\theta) \\ h = 2 R_i - H \end{cases} \Rightarrow \theta = \arccos [(H / R_i) - 1]$$

$$R_i = 0,7085 \text{ m.}$$

$$L_1 = 8,9740 \text{ m.}$$

$$\text{Donc :} \quad \theta(H) = \arccos \{ 1,4 H - 1 \} \quad (4.40)$$

L'éq (4.39) devienne :



$$V_{\text{cylindrique}} = 4,5 \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2 \theta) \} \tag{4.41}$$

b- D'après [13], le volume d'un corps qui se caractérise par une projection connue des différentes aires $S(z)$ en fonction de z est donné par :

$$V_{\text{calotte}} = \int_X^{R_s} S_1(z) dz$$

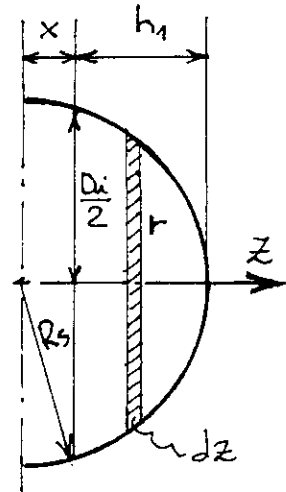
$$S_1(z) = R_i^2(z) [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta)]$$

Dans ce cas :

- L'angle θ est en fonction de H seulement.
- Le rayon $R_i^2(z) = R_s^2 - z^2$.

Donc :

$$V_{\text{calotte}} = \int_X^{R_s} (R_s^2 - z^2) \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta) \} dz$$



$$V_{\text{calotte}} = [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta)] [R_s^2 (R_s - X) - (R_s^3 - X^3)/3] \tag{4.42}$$

Donc :

$$V_{\text{calotte}} = 0,136 [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta)] \tag{4.43}$$

A partir des deux équation (4.41) et (4.43), le volume total du G.N.L est donné par:

$$V_{\text{GNL}} = 4,64 \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta) \} \tag{4.44}$$

D'après le premier chapitre $\rho_{\text{GNL}} (T = -162^\circ\text{C}) = 472 \text{ Kg/m}^3$.

La masse du gaz naturel liquéfié s'écrit sous la forme :

$$M_{\text{GNL}} = 2188,2 \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta) \} \tag{4.45}$$

Le **tableau (4.8)** montre la variation de la masse du G.N.L contenu dans le réservoir en fonction de la hauteur H .

$$TE = 4,6 \cdot 10^{-8} [3,1 / B(e) + 6,1 / C(e,H)] \cdot \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2\theta) \}^{-1} \tag{4.46}$$

Le **tableau (4.9)** représente la variation du taux d'évaporation en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H) du gaz naturel liquide contenu dans le réservoir de stockage.

H (m)	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,3
M_{GNL} (Kg)	5086,4	5236,9	5484,2	5709,4	5881,9	6075,4	6307,6	6462,4

Tableau (4.8) : Variation de la masse du GNL en fonction de la hauteur H.

		$TE (S)^{-1} * 10^{+7}$									
$e(mm)$ $H(m)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,1	51	24	16	14	10	8	8	6	6	4	
0,2	49	25	15	13	9	8	8	6	6	4	
0,4	49	24	16	13	9	7	7	5	5	5	
0,6	49	23	16	12	9	7	7	5	5	5	
0,8	48	22	15	12	8	7	7	5	5	5	
1,0	46	23	15	11	8	8	6	5	5	5	
1,2	46	22	14	11	8	8	6	5	5	5	
1,3	46	22	15	11	8	8	6	6	5	5	

Tableau (4.9) : Variation du taux d'évaporation (TE) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

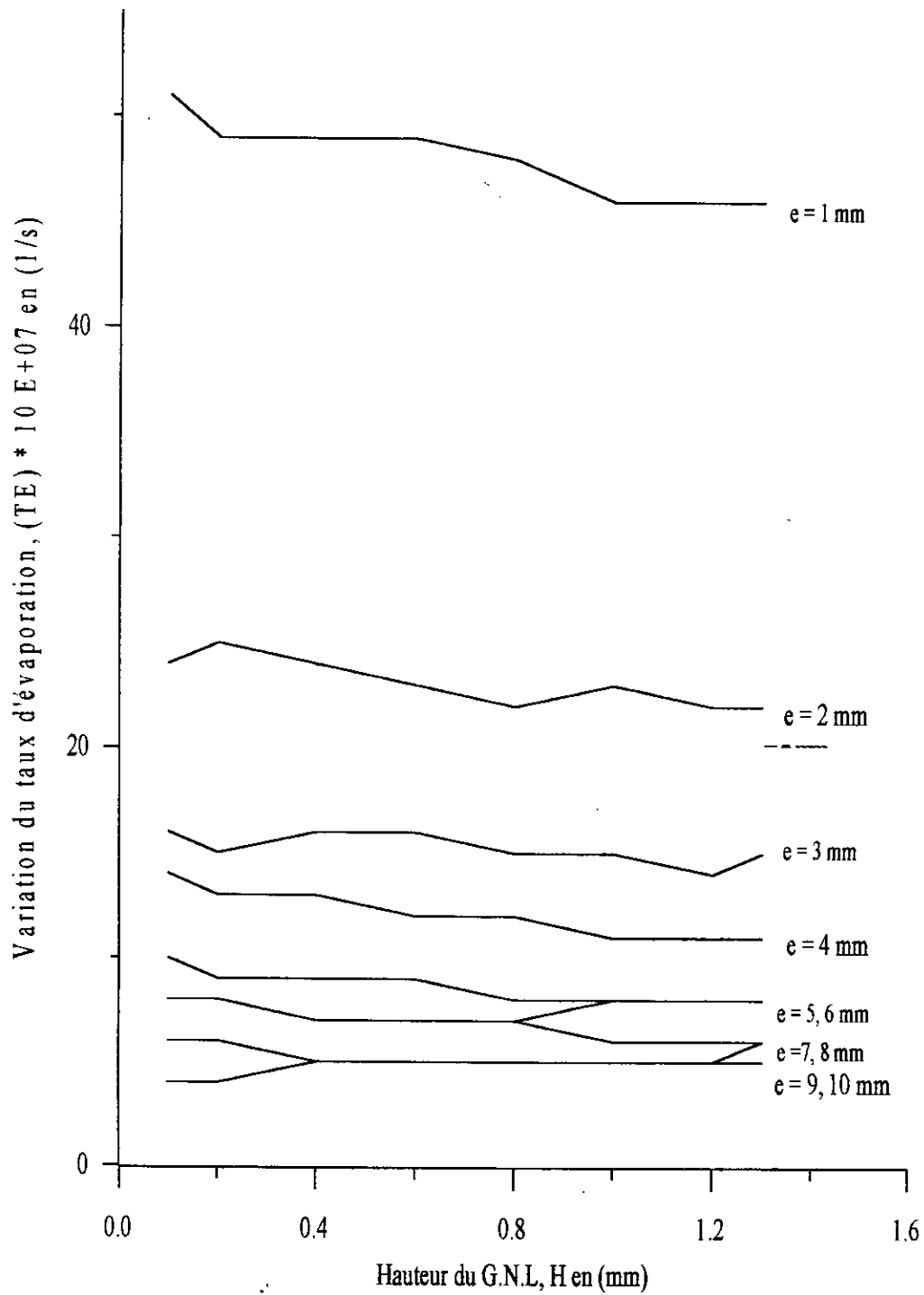


Figure (4.17) : Variation du taux d'évaporation (TE)
En fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

4.8.4 Calcul de l'indice de structure :

D'après l'équation (4.1), pour calculer l'indice de structure il faut calculer la masse du réservoir vide M_{rv} .

La masse du réservoir vide est la somme de la masse de la partie cylindrique et la masse des deux calottes.

Soit : M_{cyv} : Masse du cylindre vide.

M_{cv} : Masse d'une calotte vide.

$$M_{rv} = M_{cyv} + 2 \cdot M_{cv} \quad (4.47)$$

a.1- La masse de la partie cylindrique vide :

$$M_{cyv} = \pi L_1 \{ \rho_{acier} (R_1^2 - R_i^2 + R_{ext}^2 - R_2^2) + \rho_{isolant} (R_2^2 - R_1^2) \}$$

$$M_{cyv} = \pi L_1 \{ \rho_{acier} (R_{ext}^2 - R_i^2) + (\rho_{isolant} - \rho_{acier}) (R_2^2 - R_1^2) \}$$

$$\rho_{acier} = 472 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\rho_{isolant} = 55 \text{ Kg/m}^3.$$

$$L_1 = 8,974 \text{ m.}$$

Donc :

$$M_{cyv} = \pi \{ 4235,73 (R_{ext}^2 - R_i^2) - 3742,16 (R_2^2 - R_1^2) \}$$

$$\begin{aligned} \text{Soit : } U_1(e, e_v) &= R_{ext}^2 - R_i^2 \\ &= (0,7095 + e_v + e)^2 - 0,5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2(e_v, e) &= R_2^2 - R_1^2 \\ &= (0,7085 + e_v + e)^2 - (0,7085 + e_v)^2 \end{aligned}$$

$$M_{cyv} = \pi \{ 4235,73 U_1(e, e_v) - 3742,16 U_2(e_v, e) \} \quad (4.48)$$

a.2- La masse d'une calotte vide :

Pour calculer cette masse, il faut déterminer le volume total d'une calotte vide.

D'après l'éq (4.42) :

$$V_{calotte} = \cdot [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin (2 \theta)] [R_s^2 (R_s - X) - (R_s^3 - X^3) / 3]$$

R_i , X : constantes, mais seul dans ce cas le rayon R_s est variable.

$$V_c = V_c(\theta = 0)$$

$$V_c = \pi [R_s^2 (R_s - X) - (R_s^3 - X^3) / 3]$$

Donc :

$$V_c = \pi [R_S^2 (R_S - 0,09) - (R_S^3 - 0,026) / 3]$$

Donc le volume de la calotte est divisé en trois volumes :

1- Volume de la paroi intérieure d'épaisseur (e_v), [entre $R_S = R_{int}'$ et $R_S = R_1'$] :

$$V_{1cv} = V_{cv}(R_1') - V_{cv}(R_{int}')$$

$$= \pi [R_1'^2 (R_1' - 0,09) - (R_1'^3 - 0,026) / 3 - R_i'^2 (R_i' - 0,09) + (R_i'^3 - 0,026) / 3]$$

$$R_i' = R_S = 0,7675 \text{ m.}$$

$$R_1' = R_S + e_v = 0,7675 + e_v.$$

$$V_{1cv} = \pi [(0,7675 + e_v)^2 (0,7675 + e_v) - \{ (0,7675 + e_v)^3 - 0,026 \} / 3 - 0,26]$$

$$\text{Soit : } W_1(e_v) = (0,7675 + e_v)^2 (0,7675 + e_v) - \{ (0,7675 + e_v)^3 - 0,026 \} / 3$$

$$V_{1cv} = \pi [W_1 - 0,26] \quad (4.49)$$

2- Volume de la partie isolante d'épaisseur (e), [entre $R_S = R_1'$ et $R_S = R_2'$] :

$$V_{2cv} = V_{cv}(R_2') - V_{cv}(R_1')$$

$$V_{2cv} = \pi [(0,7675 + e_v + e)^2 (0,7675 + e_v + e) - \{ (0,7675 + e_v + e)^3 - 0,026 \} / 3 - W_1(e)]$$

$$\text{Soit : } W_2(e_v, e) = (0,7675 + e_v + e)^2 (0,7675 + e_v + e) - \{ (0,7675 + e_v + e)^3 - 0,026 \} / 3$$

$$V_{2cv} = \pi [W_2 - W_1] \quad (4.50)$$

3- Volume de la paroi extérieure d'épaisseur (1mm), [entre $R_S = R_2'$ et $R_S = R_{ext}'$] :

$$V_{3cv} = V_{cv}(R_{ext}') - V_{cv}(R_2')$$

$$V_{3cv} = \pi [(0,7685 + e_v + e)^2 (0,7685 + e_v + e) - \{ (0,7685 + e_v + e)^3 - 0,026 \} / 3 - W_2(e)]$$

$$\text{Soit : } W_3(e_v, e) = (0,7685 + e_v + e)^2 (0,7685 + e_v + e) - \{ (0,7685 + e_v + e)^3 - 0,026 \} / 3$$

$$V_{3cv} = \pi [W_{ext} - W_2] \quad (4.51)$$

Donc la masse de la calotte vide est donné par :

$$M_{cv} = \pi [\rho_{acier} (W_1 - 0,26) + \rho_{isolant} (W_2 - W_1) + \rho_{acier} (W_{ext} - W_2)]$$

$$\rho_{acier} = 472 \text{ kg / m}^3.$$

$$\rho_{isolant} = 55 \text{ kg / m}^3.$$

$$M_{cv} = \pi [417 (W_1 - W_2) - 472 W_{ext} - 122,72] \quad (4.52)$$

Donc :

$$M_{rv} = \pi \{ 4235,73 U_1(e, e_v) - 3742,16 U_2(e_v, e) + 417 (W_1 - W_2) - 472 W_{ext} - 122,72 \}$$

$$IS = \pi \{ 1,94 U_1(e, e_v) - 1,71 U_2(e_v, e) + 0,19 (W_1 - W_2) - 0,22 W_{ext} - 0,06 \} \{ \pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin(2\theta) \}.$$

$$\text{Si : } V(e, e_v) = 1,94 U_1(e, e_v) - 1,71 U_2(e_v, e) + 0,19 (W_1 - W_2) - 0,22 W_{\text{ext}} - 0,06$$

$$\text{Et } G(H) = \pi [\pi - \theta + (\frac{1}{2}) \sin(2\theta)]$$

$$\text{Donc : } IS = V(e, e_v) \cdot G(H) \quad (4.53)$$

Le tableau (4.10) montre la variation de la masse du réservoir vide en fonction de l'épaisseur (e).

Le tableau (4.11) représente la variation de l'indice de structure en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

$U_1 \cdot 10^3$ (m)	6,2	7,6	9,1	10,5	11,9	13,4	14,8	16,2	17,9	19,2
$U_2 \cdot 10^3$ (m)	1,4	2,8	4,3	5,7	7,1	8,5	10	11,4	12,8	14,3
M_{CYLV} (Kg)	66	68,2	70,5	72,7	74,8	78,3	79,3	81,5	87,7	87,9
W_1 (m)	0,258									
W_2 (m)	0,259	0,260	0,261	0,263	0,264	0,265	0,266	0,267	0,268	0,269
W_{ext} (m)	0,260	0,261	0,262	0,263	0,264	0,265	0,266	0,267	0,268	0,269
M_{CALV} (Kg)	3,14	3,31	3,48	2,34	2,51	2,69	2,86	3,04	3,21	3,38
$M_{\text{rév}}$ (Kg)	69,14	71,51	73,98	75,04	77,31	80,99	82,16	84,54	90,87	91,28

Tableau (4.10) : La variation de la masse du réservoir vide $M_{\text{rév}}$ en fonction de l'épaisseur (e). [$e_v = 1\text{mm}$].

		IS . 10 ⁺³									
e(mm) H(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,1	13.6	14.0	14.5	14.7	15.2	15.9	16.1	16.6	17.8	17.9	
0,2	13.2	13.6	14.1	14.3	14.7	15.5	15.7	16.1	17.3	17.4	
0,4	12.6	13.0	13.5	13.7	14.1	14.8	15.0	15.4	16.6	16.6	
0,6	12.1	12.5	12.9	13.1	13.5	14.2	14.4	14.8	15.9	16.0	
0,8	11.7	12.1	12.6	12.7	13.1	13.8	13.9	14.4	15.4	15.5	
1,0	11.4	11.8	12.2	12.3	12.7	13.3	13.5	13.9	14.9	15.0	
1,2	10.9	11.3	11.7	11.9	12.2	12.8	13.0	13.4	14.4	14.5	
1,3	10.7	11.1	11.4	11.6	11.9	12.5	12.7	13.1	14.0	14.1	

Tableau (4.11) : Variation de l'indice de structure (IS)
en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).

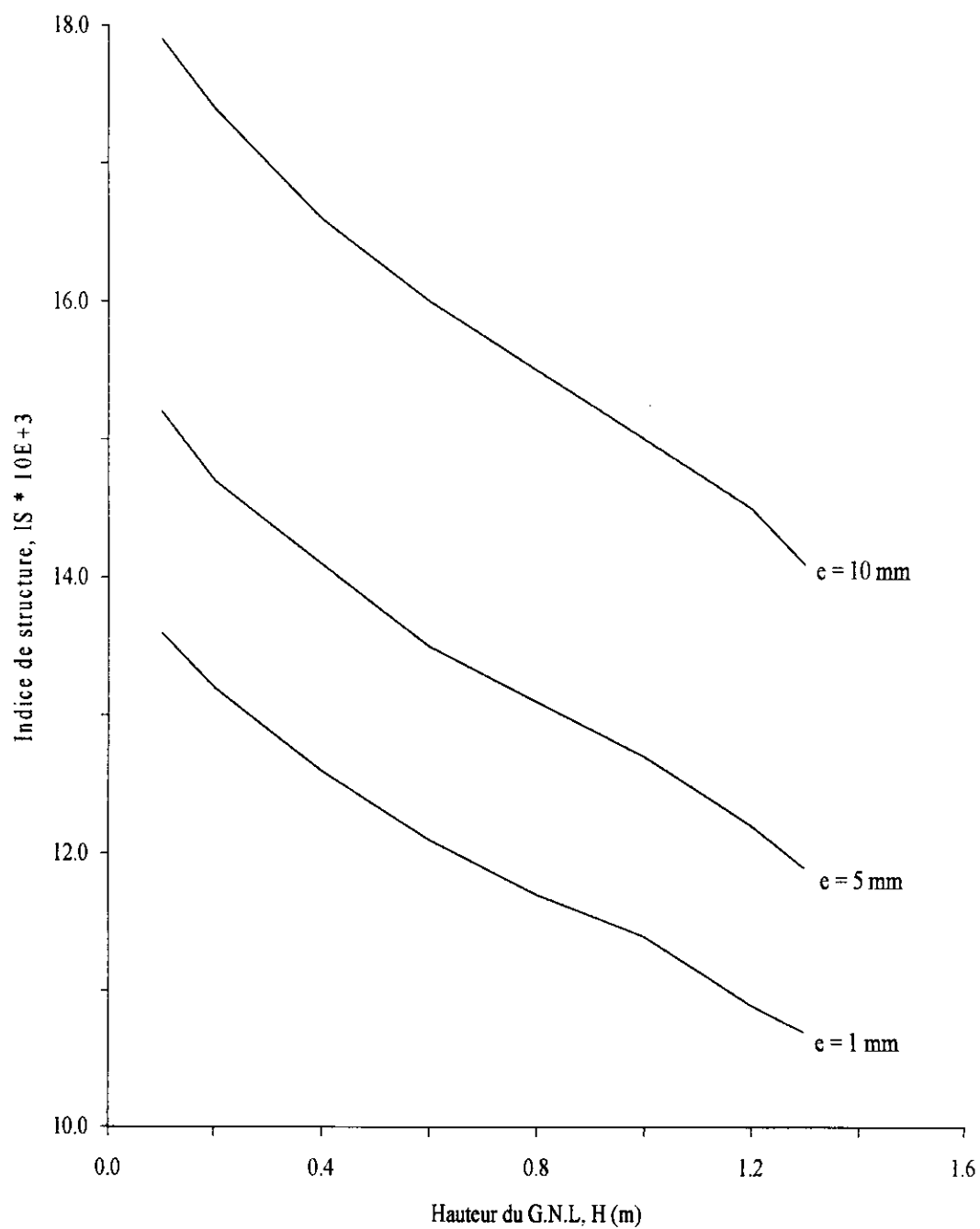


Figure (4.18) : Variation de l'indice de structure (IS) en fonction de l'épaisseur (e) et la hauteur (H).



CONCLUSION

CONCLUSION :

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction générale, les réservoirs de stockage du G.N.L dont dispose le laboratoire de thermo-fluides, remontent aux années soixante dix [5], est nécessitent par conséquent un contrôle préalable avant une éventuelle utilisation.

Dans ce projet, nous avons procédé à une étude de dimensionnement des réservoirs de stockage sous leurs aspects mécanique et thermique, dans les conditions sévères de fonctionnement. Les résultats obtenus montrent que :

- 1- Le débit de G.N.L évaporé est indépendant de la hauteur de remplissage en G.N.L. Il est inversement proportionnel à l'épaisseur d'isolant ; ainsi pour minimiser l'évaporation, on augmente l'épaisseur.
- 2- Le taux d'évaporation diminue en sens inverse de la hauteur de remplissage en G.N.L, pour une épaisseur d'isolant constante. A partir d'une épaisseur de 5 mm, le taux d'évaporation devient indépendant de la hauteur de remplissage, dans ce cas il est fonction uniquement de cette épaisseur.

On a donc intérêt à augmenter l'épaisseur d'isolant et la hauteur de remplissage en G.N.L, compte tenu que les augmentations réduisent le taux d'évaporation. A titre d'exemple, le taux d'évaporation diminue de 90 % en passant d'une épaisseur d'isolant de 1 mm à une épaisseur de 10 mm.

- 3- L'indice de structure caractérise l'aspect économique de notre réservoir de stockage, il est défini comme étant le rapport de la masse du réservoir vide à la masse du G.N.L contenu dans ce réservoir.

On a donc intérêt à diminuer l'indice de structure (problème d'investissement) ; ainsi diminuer l'indice de structure, il faut augmenter la hauteur de remplissage et diminuer l'épaisseur d'isolant. Néanmoins, en diminuant l'épaisseur d'isolant ; on augmente le débit du G.N.L évaporé. On doit alors trouver un compromis entre un réservoir moins coûteux, et qui a de bonnes performances mécanique et thermique.

Un autre élément important du banc d'essai de combustion est l'échangeur de chaleur. L'étude préliminaire des performances de cet échangeur a montré que la température de sortie correspond à l'état gazeux du fluide entrant (G.N.L).

Il est bien évident qu'une étude scientifiquement fondée doit passer obligatoirement par une étape intermédiaire consistant en l'étude diphasique du problème, compte tenu des processus de changement de phase (G.N.L - G.N), qui se produisent suite à la différence de température entre le gaz naturel liquéfié (-162°C) et l'ambiance (27°C).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Alexander Rojey**.
Le gaz naturel : Production – Traitement – Transport.
Edition Technip, 1994.
- [2] **Bernart Hébral (CNRS)**.
La Cryogénie et ces applications dans la supraconducteur.
Technique d'ingénieur, 1996.
- [3] **Services éditoriaux et techniques d'Encyclopedia Universalis**.
CD – ROM Encyclopédie Universalis.
Ingénierie diffusion multimédia, 1995.
- [4] **M. Bendjemil**.
La liquéfaction du gaz naturel.
Projet de fin d'étude, I.N.H 1971.
- [5] **G.E.J. Matton**.
Considération sur l'utilisation du Méthane liquide par les avions de transport supersoniques.
Edition I.F.P, 1970.
- [6] **M. Ikene et R. Merzougui**.
Etude sur l'utilisation du G.N.L comme fuel d'aviation.
Projet de fin d'étude, E.N.P 1992.
- [7] **M. Hamlaoui Boughouas, D. Boumaza et M. Zairi**.
Etude théorique et expérimentale sur chambre de combustion G.N & G.N.L.
Projet de fin d'étude, E.N.P 1975.
- [8] **S. Atif et A. Belghache**.
Etude du liquéfacteur d'air Philips Pla-107.
Projet de fin d'étude, E.N.P 1996.
- [9] **S. Achiche**.
Etude analytique du liquéfacteur d'air Philips Pla-107 et optimisation de ses performances.
Projet de fin d'étude, E.N.P 1997.
- [10] **Léon Herenstein**.
Manuel pour le transport et la distribution du gaz naturel.
Edition Technip. 1975.
- [11] **Léon Herenstein**.
Manuel pour le stockage du Propane.
Edition Technip. 1979.

- [12] **I. Miolioubov.**
Résistances des matériaux : Manuel de résolution des problèmes.
Edition Mir, Moscou 1977.

- [13] **P. Danko et A. Popov.**
Exercices et problèmes des mathématiques supérieures.
Edition Mir, Moscou 1982.

- [14] **Association Algérienne de l'industrie du gaz : AIG.**
Symposium biennal : La valorisation des G.P.L, (Tome I et II).
Edition AIG 12-1997.

- [15] **R.R. Conte.**
Eléments de Cryogénie.
Edition Masson, 1970.

- [16] **Philips Laboratories.**
Notice d'emploi : « Cylinder gas liquefier ».
Edition Philips, 1995.

- [17] **J.F. Sacadura.**
Introduction aux transferts thermiques.
Edition Bayeusaine, 1982.

- [18] **M. Ait Saada et M. Benabderrahmane.**
Conception et réalisation d'un Cryostat expérimental pour l'étude des échanges de chaleur en Cryogénie.
Projet de fin d'étude, E.N.P 1994.

- [19] **J.P. Holman.**
Heat transfer.
Edition Mc Graw-Hill, 1972.

- [20] **D. Latz.**
Handbook of naturel gaz engineering.
Edition Mac Graw Hill, 1959.