

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DE GÉNIE DE CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme
Master en Génie Mécanique
Option : Energétique

THÈME

*Etude préliminaire d'un réservoir de
stockage de gaz naturel à usage
domestique*

Proposé par : M^r MANSOUR Saïd
Dirigé par : M^r FERROUK Mohamed

Réalisé par : M^r HAMRI Lakhdar

Promotion 2009/ 2010

Remerciements

Tous d'abord je remercie Dieu de m'avoir donné la force et la patience pour finir ce mémoire.

Je tiens à remercier tout les enseignants du département de génie mécanique en particulier ceux qui ont contribué dans ma formation en licence et en master.

Arrivé au terme de mon travail, je tiens à remercier mon promoteur Mr FERROUK Mohamed pour son aide et son suivi durant l'élaboration de ce mémoire, ainsi que Mr MONSEUR Saïd mon Co-promoteur, de m'avoir accueilli au sein de l'entreprise.

Je tiens aussi à remercier les membres jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents.

A ma grande mère.

A mes frères et à mes sœurs.

A mon oncle et à toute sa famille surtout Celia.

A toute ma famille.

A tous mes amis d'enfance, mes amis d'université.

A toute ma promotion d'étude.

Liste des figures

Figure. I.1 : Schéma de la filière du gaz naturel.....	07
Figure. I.2 : Réservoirs de gaz à Karlsruhe (Allemagne).....	11
Figure. I.3 : Les réservoirs en nappe aquifère, [GDF-DER, 1995].....	12
Figure. I.4 : Les réservoirs en cavités salines, [GDF-DER, 1995].....	13
Figure II.1 : Schéma de principe d'un poste HP/MP.....	16
Figure. II.2 : Schéma d'un détendeur régulateur d'abonnés domestiques.....	17
Figure. II.3 : Batteries de détente.....	18
Figure II.4. Armoires de détente.....	18
Figure. II.5 : Poste de détentés en coffrets.....	19
Figure. II.6 : Poste de détente de type antenne.....	20
Figure III.1 : Matériaux employés en fonction de la température d'emploi et du produit stocké.....	26
Figure III. 2 : Réservoirs à simple paroi métallique.....	27
Figure III. 3 : Réservoirs à simple paroi métallique avec mur de rétention secondaire.....	28
Figure III. 4 : Réservoir à double paroi métallique avec double toit dôme conventionnel.....	29
Figure III.5. Réservoir à double paroi métallique avec toit dôme et pont suspendu.....	29
Figure III.6 : Réservoir à double paroi à double rétention avec enceinte extérieure en béton précontraint.....	33
Figure IV.1 : Fiche de sélection des fluides.....	37
Figure IV.2 : fiche de description des fractions massique ou molaires.....	38
Figure IV.3 : Les constituants de la variante 1.....	38
Figure IV.4 : Les constituants de la variante 2.....	39
Figure IV.5 : Diagramme (P,H) représentant isotherme pour le cas de 5°C de la variante 1.....	41
Figure IV.6 : Diagramme (P, H) représentant isotherme pour le cas de 5°C de la variante 2.....	42
Figure IV.7: Diagramme (P, H) représentant isotherme de 5°C pour le cas de la variante 3.....	43

Figure IV.8: Diagramme (T, S) de la variante 01 sous une pression de 5 bars.....	44
Figure IV.9: Diagramme (T, S) de la variante 02 sous une pression de 5 bars.....	45
Figure IV.10 : Diagramme (T, S) de la variante 03 sous une pression de 5 bars.....	46
Figure IV.11 : vue de face du réservoir normalisé.....	48
Figure IV .12: La contrainte transversale exercée sur le réservoir.....	52
Figure IV.13 : schéma de la contrainte longitudinale exercée sur le réservoir.....	53
Figure IV.14 : Schéma de l'installation proposée.....	54
Figure IV.15 : Système de purge.....	54

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Matériaux utilisées en fonction des pressions.....	15
Tableau II.2 : Pression de fonctionnement des appareils d'utilisation.....	20
Tableau II.3 : Matériaux utilisé en fonction des diamètres.....	22
Tableau II.4 : Les pressions effectives.....	23
Tableau IV.1 : Diamètre de la sphère pour différents jours d'autonomie.....	36
Tableau IV.2 : Les propriétés thermophysiques du gaz naturel.....	37
Tableau IV.3 : La masse volumique et l'enthalpie du gaz naturel pour les trois variantes.....	39
Tableau IV.4 : Masse de gaz à stocker pour les trois et pour différents jours.....	40
Tableau IV.5 : Enthalpie du gaz à l'état initial pour les trois variantes.....	47
Tableau IV.6 : Quantités de chaleur à extraire pour les trois variantes par unité de kilogramme.....	47
Tableau IV.7 : Volume du gaz naturel à l'état liquide pour les trois variantes.....	48
Tableau IV.8 : Les dimensions caractéristiques des réservoirs.....	49
Tableau IV.9 : capacité des réservoirs normalisés pour la variante 1.....	50
Tableau IV.10 : capacité des réservoirs normalisés pour la variante 2.....	51
Tableau IV.11 : capacité des réservoirs normalisés pour la variante 3.....	51

Liste des symboles utilises

- Ø **SONELGAZ** : Société Nationale de Distribution de l'Electricité et du Gaz.
- Ø **SDC** : Société de Distribution de l'électricité et du gaz du Centre.
- Ø **GNC** : Gaz naturel comprimé.
- Ø **GNL** : Gaz naturel liquéfié.
- Ø **GPL** : Gaz pétrole liquéfié.
- Ø **GN** : Gaz naturel.
- Ø **DP** : Distribution publique.
- Ø **BP** : Basse pression.
- Ø **MPA** : Moyenne pression type A.
- Ø **MPB** : Moyenne pression type B.
- Ø **MPC** : Moyenne pression type C.
- Ø **HP/MP** : Haute pression/ Moyenne pression.
- Ø **HP/BP** : Haute pression/ Basse pression.
- Ø **P_{min}** : Pression minimale.
- Ø **P_{max}** : Pression maximale.
- Ø **P_n** : Pression normale.
- Ø **P_e** : Pression effective (Pa).
- Ø **Q** : Débit du gaz (N m³/h)
- Ø **V** : Volume du gaz (m³)
- Ø **V_l** : Volume du gaz liquide (m³).
- Ø **D** : Diamètre de la sphère (m).
- Ø **D_i** : Diamètre intérieur du réservoir (m).
- Ø **m** : Masse du gaz (kg).

- ρ : Masse volumique (kg/m^3).
- ρ_l : Masse volumique de la phase liquide (kg/m^3).
- h_i : Enthalpie du gaz à l'état initial (KJ/ kg).
- h_l : Enthalpie de la phase liquide (KJ/ kg).
- Q : Quantité de chaleur à extraire du gaz par unité de kilogramme (KJ).
- σ_T : Contrainte transversale (MPa).
- σ_L : Contrainte longitudinale (MPa).
- F : Force (N).
- S : Section du réservoir (m^2).
- e : Epaisseur de l'enveloppe (m).
- R_e : La limite élastique (MPa).
- R_T : La résistance à la traction (MPa).

SOMMAIRE

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur le gaz naturel

I.1.Introduction.....	02
I.2. Origine et histoire	02
I.3.Types de gaz naturel	03
I.3.1.Gaz conventionnel non associé	03
I.3.2.Gaz associé	03
I.3.3.Gaz biogénique	03
I.3.4.Gaz de charbon.....	04
I.3.5. Gaz de schiste	04
I.3.6.Hydrate.....	04
I.4.Secteurs d'utilisation.....	05
I.4.1.Utilisateurs domestiques	05
I.4.2.Applications commerciales	05
I.4.3.Industrie.....	05
I.4.4.Production d'électricité	05
I.4.5.Industrie automobile	06
I.4.6.Piles à combustible.....	06
I.5.Filière du gaz naturel	07
I.5.1.Description des opérations de transformation	07
I.5.1.1.Exploration.....	08
I.5.1.2.Extraction	08
I.5.1.3.Traitement.....	08
I.6.Transport de gaz naturel	09
I.6.1.Le méthanier	09
I.6.2.gazoduc.....	10
I.7.Le stockage du gaz naturel	10
I.7.1.Stockage aérien	10
I.7.1.1.Particularités du stockage sphérique.....	11
I.7.2.Les réservoirs en nappe aquifères.....	11
I.7.3.Les réservoirs en cavités salines.....	12
I.8. Conclusion	13

Chapitre II : Réseaux de distribution

II.1. Introduction.....	14
II.2. Constitution des réseaux de distribution	15
II.2.1.Conduites ou canalisations	15
II.2.2. Les poste de détendeurs	16
II.2.2.1. Poste de détente HP/MP	16
II.2.2.2.Poste de détente HP/BP	16
II.A. Détendeur d'abonnés domestique	17

II.B. Batteries de détente.....	17
II.C. Poste de détente	18
II.C.1. Poste type chaufferie	19
II.C.2. Poste type antenne	19
II.C.3. Postes de livraison des abonnés moyens pression.....	21
II.2.3. Les branchements	21
II.A. Branchements d'abonnés	21
II.B. Les piquages de branchements	22
II.B.1. Sur réseau primaire.....	22
II.B.2. Sur les réseaux secondaires.....	22
II.B.3. Pour les réseaux tertiaires	22
II.4.Conclusion.....	23

Chapitre III : Les réservoirs de stockage des liquides

III.1.Introduction	24
III.2.Réservoirs semi-réfrigérés	24
III.2.1.La température de stockage	24
III.2.2.Isolation thermique	24
III.3.Réservoirs réfrigérés et cryogéniques	25
III.3.1. Aspects des réservoirs réfrigérés et cryogéniques	25
III.3.1.1.Réservoirs à simple paroi	26
III.3.1.2.Réservoirs à double paroi	26
III.3.1.2.1.Réservoirs double paroi à simple rétention	27
III.3.1.2.2.Réservoirs double paroi à double rétention	27
III.4.Réservoirs à simple paroi	27
III.4.1.Principe	27
III.4.2.Réservoirs à toit dôme conventionnel	28
III.4.3.Réservoirs à toit dôme et pont suspendu	28
III.5. Réservoirs à double paroi	28
III.5.1.Généralités	28
III.5.2.Réservoirs à double toit dôme conventionnel	28
III.5.3.Réservoirs à toit dôme et pont suspendu	29
III.5.4.Réservoirs double paroi à simple rétention	30
III.5.4.1. Réservoirs à double toit dôme	30
III.5.4.1.1.Le réservoir intérieur	30
III.5.4.1.2.Le dimensionnement du toit dôme intérieur	30
III.5.4.1.3.Le réservoir extérieur	30
III.5.4.1.4.Le fond	30
III.5.4.1.5.Les épaisseurs de la robe	31
III.5.4.1.6.Le toit dôme autoportant	31
III.5.4.1.7.L'isolation du fond	31
III.5.4.1.8.L'isolation de la robe et du toit	31
III.5.4.2. Réservoirs à toit dôme et pont suspendu	31
III.5.4.3. Réservoirs double paroi à double rétention	32
III.5.4.3.1.Réservoirs avec enveloppe externe métallique	32
III.5.4.3.2.Réservoirs avec enceinte extérieure en béton	33

III.5.4.3.3.Réservoirs à membrane	33
III.6. Conclusion	34

Chapitre IV : Dimensionnement du réservoir de stockage

IV.2. Données de calcul	35
IV.1.Objectif de l'étude	35
IV.3. Calcul du volume de gaz	35
IV.4. Détermination des propriétés thermophysiques du gaz naturel	36
IV.4. Détermination des propriétés thermophysiques du gaz naturel	39
IV.6. Compression du gaz à la température moyenne de 5°C.....	40
IV.6.1.Variante 01.....	41
IV.6.2.Variante 02.....	42
IV.6.3.Variante 03.....	43
IV.7.Refroidissement du gaz sous une pression de 5 bars.....	44
IV.7.1.Variante 01.....	44
IV.7.2.Variante 02	45
IV.7.3.Variante 03.....	46
IV.8.Quantité de chaleur à extraire du gaz	47
IV.9.Estimation du volume du réservoir	47
IV.10.Dimensionnement du réservoir	48
IV.11.Calcul de résistance des matériaux	51
IV.11.1.Contrainte transversale	52
IV.11.2.Contrainte longitudinale	53
IV.12. Système de sécurité	55
IV.12.1. Système d'isolation thermique.....	55
 Conclusion générale	 56

Introduction générale

Introduction

Le présent travail a été proposé par le service recherche de la Société de Distribution de l'Electricité et du Gaz du Centre (SDC) de TIZI-OUZOU .Il consiste à mener une étude préliminaire sur le dimensionnement d'un réservoir (ou ballon) de stockage de gaz naturel pouvant alimenter, la résidence universitaire jeunes filles de Oued Aissi, pour une autonomie allant d'une journée à sept jours de fonctionnement en cas de l'indisponibilité du poste gaz, ou du réseau de distribution.

Pour mener à bien notre étude, nous avons organisé notre travail comme suit :

- Le chapitre 1 est consacré à la description de différent, types de gaz naturel, les secteurs d'utilisations et a tenu leurs modes de transport et de stockage.
- Dans le chapitre 2, description des éléments constituant les réseaux distribution.
- Les différentes formes de réservoirs de stockage de gaz, ainsi que leurs caractéristiques sont présentées au chapitre 3.
- Le chapitre 4 est consacré au dimensionnement du réservoir de stockage de gaz naturel.

Chapitre I :
Généralités sur le gaz
naturel

I.1. Introduction :

Le gaz naturel est un combustible fossile, il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures présent naturellement dans des roches poreuses sous forme gazeuse [1]. C'est la source d'énergie fossile qui a connu la plus forte progression depuis les années 70. Elle représente le cinquième de la consommation énergétique mondiale.

I.2. Origine et histoire :

Le gaz naturel a été découvert au Moyen-Orient au cours de l'antiquité [1]. Il y a de cela quelques milliers d'années, l'apparition soudaine de gaz naturel s'enflammant brutalement était assimilée à des sources ardentes. En Perse, en Grèce ou en Inde, les Hommes ont érigé des temples autour de ces feux pour leurs pratiques religieuses. Cependant ils n'évaluèrent pas immédiatement l'importance de cette découverte. C'est la Chine qui comprit l'importance de ce produit autour de 900 avant Jésus-Christ et foras le premier puits aux alentours de 211 avant Jésus Christ.

En Europe, il a fallu attendre jusqu'en 1659 pour que la Grande-Bretagne découvre le gaz naturel et le commercialise à partir de 1790. En 1821, à Fredonia (Etats-Unis), les habitants ont découvert le gaz naturel dans une crique par l'observation de bulles de gaz qui remontaient à la surface. William Hart est considéré comme le "père du gaz naturel". C'est lui qui creusa le premier puits nord-américain.

Au cours du XIXème siècle, le gaz naturel a presque exclusivement été utilisé comme source de lumière. Sa consommation demeurait très localisée en raison du manque d'infrastructures de transport qui rendait difficile l'acheminement de grandes quantités de gaz naturel sur de longues distances. En 1890, un changement important intervint avec l'invention des joints à l'épreuve des fuites. Cependant, les techniques existantes ne permettaient pas de transporter le gaz naturel sur plus de 160 kilomètres et ce produit a été gaspillé pendant des années car brûlé sur place. Le transport du gaz naturel sur de longues distances s'est généralisé au cours des années 1920, grâce aux progrès technologiques apportés aux gazoducs. Après la seconde guerre mondiale, la consommation de gaz naturel s'est développée rapidement en raison de l'essor des réseaux de canalisation et des systèmes de stockage.

Dans les premiers temps de l'exploration du pétrole, le gaz naturel était souvent considéré comme un sous-produit sans intérêt qui entravait même le travail des ouvriers forcés de s'arrêter pour laisser échapper le gaz des poches découvertes lors du forage.

Aujourd'hui, et en particulier depuis les crises pétrolières des années 70, le gaz naturel est devenu une source importante d'énergie dans le monde.

I.3.Types de gaz naturel :

Il existe plusieurs formes de gaz naturel, se distinguant par leur origine, leur composition et le type de réservoirs dans lesquels ils se trouvent [2]. Néanmoins, le gaz est toujours composé principalement de méthane et issu de la désagrégation d'anciens organismes vivants.

I.3.1.Gaz conventionnel non associé :

C'est la forme la plus exploitée du gaz naturel. Son processus de formation est similaire à celui du pétrole [2]. On distingue le gaz thermogénique primaire, issu directement de la pyrolyse du kérogène, et le gaz thermogénique secondaire, formé par la pyrolyse du pétrole. Le gaz thermogénique comprend, outre le méthane, un taux variable d'hydrocarbures plus lourds, pouvant aller jusqu'à l'heptane (C_7H_{16}). On peut y trouver aussi du dioxyde de carbone (CO_2), du sulfure d'hydrogène appelé aussi « gaz acide » (H_2S), et parfois de l'azote (N_2) et de petites quantités d'hélium (He). C'est principalement ce type de gaz conventionnel non associé qui alimente le marché international du gaz naturel et ses réseaux de transport par gazoducs et méthaniers.

I.3.2.Gaz associé :

Il s'agit de gaz présent en solution dans le pétrole. Il est séparé lors de l'extraction de ce dernier [2]. Pendant longtemps, il était considéré comme un déchet et détruit en torchère, ce qui constitue un gaspillage de ressources énergétiques non renouvelables et une pollution inutile. Aujourd'hui, une partie est soit réinjectée dans les gisements de pétrole (contribuant à y maintenir la pression et à maximiser l'extraction du pétrole), soit valorisée.

I.3.3.Gaz biogénique :

Le gaz biogénique est issu de la fermentation par des bactéries de sédiments organiques [2]. À l'instar de la tourbe, c'est un combustible fossile mais dont le cycle est relativement rapide. Les gisements biogéniques sont en général petits et situés à faible profondeur. Ils représentent environ 20 % des réserves connues du gaz conventionnel. Le gaz biogénique a moins de valeur par mètre cube que le gaz thermogénique, car il contient une part non

négligeable de gaz non combustibles (notamment du dioxyde de carbone) et ne fournit pas d'hydrocarbures plus lourds que le méthane.

I.3.4. Gaz de charbon :

Le charbon contient naturellement du méthane et du dioxyde de carbone dans ses pores [2]. Historiquement, ce gaz a surtout été connu pour la menace mortelle qu'il présente sur la sécurité des mineurs, il est alors resté dans la mémoire collective sous le nom de grisou. Cependant, son exploitation est en plein développement, en particulier aux États-Unis. L'exploitation porte sur des strates de charbon riches en gaz et trop profondes pour être exploitées de façon conventionnelle. Il y a eu des essais en Europe également, mais la plupart des charbons européens sont assez pauvres en méthane. La Chine s'intéresse également de plus en plus à l'exploitation de ce type de gaz naturel.

I.3.5. Gaz de schiste :

Certains schistes contiennent aussi du méthane piégé dans leurs fissurations [2]. Ce gaz est formé par la dégradation du kérogène présent dans le schiste, mais, comme pour le gaz de charbon, il existe deux grandes différences par rapport aux réserves de gaz conventionnel. La première est que le schiste est à la fois la roche source du gaz et son réservoir.

La seconde est que l'accumulation n'est pas discrète (beaucoup de gaz réuni en un point) mais continue (le gaz est présent en faible concentration dans un énorme volume de roche), ce qui rend l'exploitation bien plus difficile.

I.3.6. Hydrate :

Les hydrates de méthane sont des structures de glace contenant du méthane prisonnier [2]. Ils sont issus de l'accumulation relativement récente de glace contenant des déchets organiques, la dégradation est biogénique. On trouve ces hydrates dans le permafrost ou sur le plancher océanique. Le volume de gaz existant sous cette forme est inconnu, variant de plusieurs ordres de grandeur selon les études. Aucune technologie ne permet actuellement d'exploiter ces ressources.

I.4.Secteurs d'utilisation :

Le gaz naturel est une source d'énergie polyvalente qui peut être employée dans des domaines très variés [2]. Traditionnellement, la fourniture de chauffage et d'électricité en sont les principaux débouchés. En outre, les préoccupations grandissantes liées à la protection de l'environnement devraient conduire à accroître encore le recours au gaz naturel dans les transports.

I.4.1.Utilisateurs domestiques :

Les applications domestiques sont les principaux débouchés du gaz naturel [2]. Ce dernier peut être utilisé pour cuisiner, laver, sécher, faire chauffer de l'eau, chauffer une maison ou la climatiser. En outre, les appareils ménagers sont sans cesse améliorés afin de pouvoir être utilisés par le biais de gaz naturel, plus économique et plus sûr. Les frais d'exploitation du matériel fonctionnant au gaz naturel sont généralement plus faibles que ceux liés à d'autres sources d'énergie.

I.4.2.Applications commerciales :

Les principaux utilisateurs commerciaux de gaz naturel sont les fournisseurs de services (restaurants, hôtels, services médicaux, bureaux, etc.) [2]. Les applications commerciales du gaz naturel incluent la climatisation (air conditionné et réfrigération), la cuisson et le chauffage.

I.4.3.Industrie :

Le gaz naturel entre dans la fabrication de la pâte à papier, du papier, de certains métaux, produits chimiques, pierres, argile, verre et dans la transformation de certaines denrées [2]. Il peut également être employé pour le recyclage des déchets, pour l'incinération, le séchage, la déshumidification, le chauffage, la climatisation et la cogénération.

I.4.4.Production d'électricité :

Les installations électriques et les fournisseurs d'énergie indépendants emploient de plus en plus le gaz naturel pour alimenter leurs centrales du fait de son coût d'exploitation [2]. En général, les centrales fonctionnant au gaz naturel sont moins coûteuses, plus rapides à construire, plus productives et moins polluantes que des centrales utilisant d'autres

combustibles fossiles. Les améliorations technologiques en matière de conception, d'efficacité et d'emploi de turbines à cycles combinés ainsi que de processus de cogénération encouragent le recours au gaz naturel dans les industries de production d'énergie. Les centrales à cycles combinés (CCGT) utilisent la chaleur perdue pour produire davantage d'électricité, alors que la cogénération de gaz naturel fournit en même temps de la puissance et de la chaleur utile aussi bien pour l'industrie que pour les utilisateurs commerciaux. Cette cogénération réduit très fortement le rejet de gaz polluants dans l'atmosphère.

I.4.5. Industrie automobile :

Le gaz naturel peut être utilisé comme combustible pour les véhicules à moteur de deux manières [2] :

En tant que gaz naturel comprimé (GNC), qui est la forme la plus répandue ou en tant que gaz naturel liquéfié.

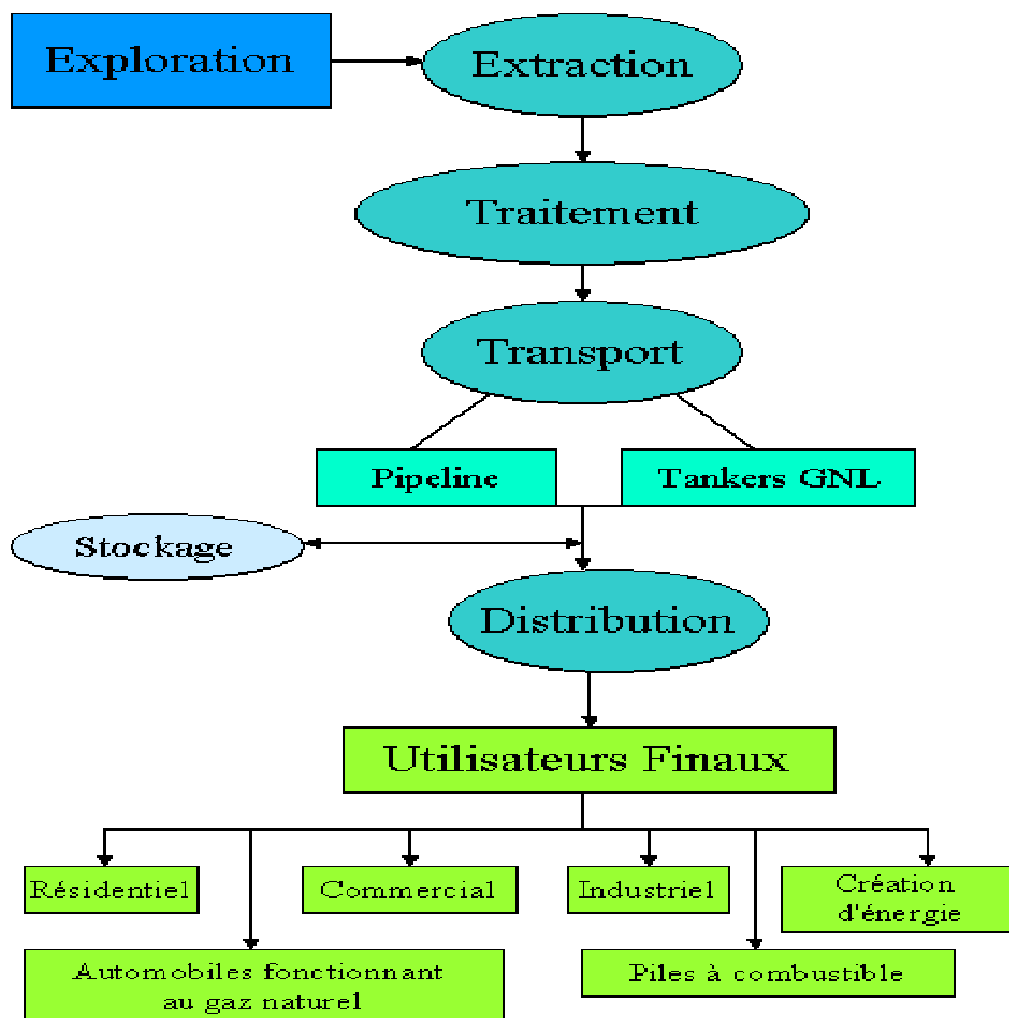
Le parc de véhicules fonctionnant au gaz naturel était d'environ 6366500 automobiles à travers le monde en juin 2007 (selon l'Association internationale des véhicules à gaz naturel). Les préoccupations relatives à la qualité de l'air dans la plupart des régions du monde renforcent l'intérêt pour le gaz naturel dans ce secteur. On estime que les voitures utilisant ce type de combustible émettent 20% de gaz à effet de serre en moins que les véhicules à essence ou diesel. Contrairement aux idées reçues, l'emploi du gaz naturel dans les véhicules à moteur n'est pas une nouveauté, puisqu'il était déjà utilisé dans les années 30. Dans beaucoup de pays, ce type de véhicules est présenté comme un substitut aux bus, taxis et autres transports publics. Il représente un système peu onéreux et pratique

I.4.6. Piles à combustible :

La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui permet de combiner l'hydrogène et l'oxygène contenus dans l'air afin de produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau [2]. Les piles à combustible fonctionnent sans combustion. Elles ne polluent donc pratiquement pas. Une pile à combustible peut être utilisée à des rendements beaucoup plus élevés que les moteurs à explosion puisque le combustible est directement transformé en électricité et qu'elle produit plus d'énergie à partir de la même quantité de combustible. La pile à combustible ne possède aucune pièce mobile, ce qui en fait une source d'énergie relativement silencieuse et fiable. Le gaz naturel est un des multiples combustibles à partir desquels les piles à combustible peuvent fonctionner.

I.5.Filière du gaz naturel :

L'industrie de gaz naturel est un secteur vaste, concentré et qui réclame des capitaux important [3]. Etant donné le lien étroit qui existe entre l'exploration et la production de gaz naturel et du pétrole, les compagnes pétrolières sont également les principales entreprises impliquées dans le secteur du gaz naturel. Toutefois, le transport et la distribution de gaz sont plus proches du transport et de la distribution d'électricité.



Source : Secrétariat de la CNUCED

Figure. I.1 : Schéma de la filière du gaz naturel.

I.5.1.Description des opérations de transformation :

Le processus de production du gaz naturel est simple et très proche de celui du pétrole [3]. Le gaz naturel est tout d'abord extrait du sol ou des océans par forage, puis transporté par voie terrestre (gazoducs) ou maritime jusqu'à une installation de nettoyage et de

transformation pour être ensuite acheminé vers une zone de stockage et de traitement, puis envoyé vers des cavités creusées dans le sol ou des installations de stockage.

I.5.1.1.Exploration :

L'exploration est une étape très importante du processus [3]. Au cours des premières années de l'industrie du gaz naturel, lorsque les connaissances dans ce domaine étaient encore limitées, les puits étaient uniquement creusés à l'intuition. Aujourd'hui, au regard des coûts d'extraction très élevés, les compagnies ne peuvent pas prendre le risque de forer n'importe où. Les géologues jouent alors un rôle essentiel en identifiant les poches de gaz naturel. Pour trouver une zone où du gaz naturel est susceptible d'être découvert, ils analysent la composition du sol et comparent les échantillons prélevés avec ceux d'autres zones où du gaz a déjà été trouvé. Puis ils réalisent des tests spécifiques comme l'étude des couches supérieures des formations rocheuses où des poches de gaz naturel pourraient s'être formées. Les techniques de prospection ont évolué au fil du temps et fournissent aujourd'hui des informations d'une grande fiabilité sur l'existence possible de dépôts de gaz naturel. Plus précises sont ces techniques, plus forte sera la probabilité de découvrir du gaz lors du forage.

I.5.1.2.Extraction :

Le gaz naturel est extrait en creusant un trou dans la roche. Le forage peut être effectué sur terre ou en mer [3]. Le matériel employé est fonction de la localisation de la poche de gaz et de la nature de la roche. Si c'est une formation peu profonde, des câbles de forage peuvent être utilisés. Un mouvement de va et vient dans le sol est effectué à plusieurs reprises à l'aide d'un foret métallique.

Le plus souvent, le gaz naturel sous pression sortira du puits sans intervention extérieure. Toutefois, il est parfois nécessaire de faire appel à des pompes ou à d'autres méthodes plus complexes. La méthode d'extraction la plus répandue est basée sur le recours à des équipements de pompage.

I.5.1.3.Traitement :

A sa sortie du gisement, le gaz naturel est inutilisable en cet état [4]. Essentiellement constitués de méthane, il contient en effet, selon sa provenance, une quantité variable d'autres composants dont certains sont impropres à la distribution. Le gaz naturel va donc subir une

série de traitements dont la finalité est triple : éliminer les éléments nocifs, augmenter son PCI et donner au gaz son odeur caractéristique.

Si l'ancien gaz de ville possédait naturellement une odeur bien particulière, le gaz naturel est inodore. Il faut donc lui donner une odeur caractéristique qui ne puisse être confondu avec un autre et soit décelable par tous. On utilise soit du T.H.T. (tétrahydrothiophène) soit d'autres mercaptans.

Au poste de livraison, on injecte l'odorant afin de le rendre facilement perceptible, avant que sa concentration n'atteigne un niveau critique.

I.6.Transport du gaz naturel :

Le gaz naturel a longtemps été transporté uniquement par voie de terre via des gazoducs [2]. Différents facteurs ont favorisé ces dernières années le développement du mode de transport maritime qui croît plus vite que le transport par gazoduc : l'éloignement des champs de production par rapport aux zones de consommation (les gazoducs ne traversent pas les mers), la souplesse apportée par ce mode de transport. Aujourd'hui le transport par méthanier a une part modale un peu inférieure à 10 % du volume de gaz transporté. Les principales routes fréquentées par les méthaniers relient les champs de production de l'Indonésie au Japon, ceux du Moyen Orient aux pays développés (Japon, Europe, États-Unis), ceux du Nigeria et de l'Algérie à l'Europe.

I.6.1.Le méthanier :

Un méthanier présente de nombreuses particularités découlant des caractéristiques physiques du GNL, de la dangerosité de ce type de cargaison et de sa température de stockage [2].

Du fait de la faible densité du GNL qui nécessite de grands volumes, le méthanier est un navire haut sur l'eau. Sa cargaison est transportée généralement dans 4 à 5 cuves. En 2006 le plus grand méthanier du monde, le Provalys livré à Gaz de France, avait une capacité de 154500 m³ pour une longueur de 290 mètres, une largeur de 43 mètres, un tirant d'eau de 12 mètres et un tirant d'air de 40 mètres. Les méthaniers se déplacent généralement à une vitesse moyenne de 19 nœuds.

I.6.2.gazoduc :

Un gazoduc est une canalisation destinée au transport de matières gazeuses sous pression, la plupart du temps des hydrocarbures, sur de longues distances [2].

La majorité des gazoducs acheminent du gaz naturel entre les zones d'extraction et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre.

À partir des sites de traitement des gisements ou des stockages, le gaz est transporté à haute pression, (de 16 jusqu'à plus de 100 bar), dans des réseaux de grand transport dont les gazoducs constituent les principaux maillons. Ces réseaux comprennent en outre :

- Des stations de compression, régulièrement espacées (tous les 80 à 250 km selon les réseaux) qui maintiennent la pression du gaz transporté et assurent sa progression dans les canalisations.
- Des stations d'interconnexion qui constituent des nœuds importants du réseau de transport
- Des postes de livraison qui assurent la livraison du gaz naturel chez les gros industriels ou dans les réseaux aval de distribution. Ces postes assurent généralement des fonctions de détente, de réchauffage, de filtrage et de mesurage du gaz.

I.7. Le stockage du gaz naturel :

I.7.1.Stockage aérien :

Il existe plusieurs types d'infrastructures pour le stockage aérien du gaz [5]. Celles-ci se traduisent par la conception d'équipements adaptés à l'état du gaz à stocker :

Etat gazeux sous pression atmosphérique ou plus élevée ou état liquide réfrigéré (jusqu'à -50°C) ou cryogénique (jusqu'à -200 °C),

Mais aussi selon des spécificités comme le volume à stocker, les cycles de vidange et de remplissage ainsi que les processus de traitement et de manutention envisagés.

Selon les cas, les solutions de stockage passent par l'emploi d'appareils à pression ou de réservoirs de stockage. On distingue

- Les capacités cylindriques horizontales (aussi appelées « cigare ») et les sphères qui sont utilisées pour le stockage des gaz sous pression comme le butane ou le propane par exemple.

Les volumes stockés sont de l'ordre de 3000 m³ pour les cigares et de 500 m³ à 10000m³ pour les sphères

- Les réservoirs cylindriques verticaux à simple ou double paroi avec enceinte extérieure métallique ou béton qui sont utilisés pour le stockage du gaz à l'état liquide. Selon le cas ces réservoirs peuvent être enterrés, semi enterrés, posés ou ancrés au sol voire montés sur pilotis. Les volumes stockés sont de l'ordre de 50 000 m³ à 200 000 m³. Ces réservoirs équipent les terminaux méthaniers ou GNL d'exportation des pays producteurs (Pays du golf, Nigéria, Algérie, Norvège...) ou importateurs comme, en Belgique, à Zeebrugge ou, en France, à Montoir-de-Bretagne, Fos-sur-Mer ou encore à Dunkerque où EDF a planifié la construction d'un terminal GNL prévu en exploitation dès 2014.



Figure. I.2 : Réservoirs de gaz à Karlsruhe (Allemagne).

I.7.1.1.Particularités du stockage sphérique :

Concernant les capacités sphériques, au delà de 10 000 m³ et selon les modes de sollicitations (séisme, cycles de vidange/remplissage) la jonction entre la paroi de la sphère et son support doit faire l'objet d'études de conception appropriées afin d'éviter les problèmes liés aux concentrations de contraintes au droit du support qui, si elles sont mal maîtrisés, peuvent causer la ruine de l'équipement [5].

I.7.2.Les réservoirs en nappe aquifères :

Pour concevoir un réservoir en nappe aquifère il faut trouver, entre 400 et 1 200 m de profondeur, une structure géologique présentant des caractéristiques identiques à celles d'un gisement, à savoir une roche poreuse et perméable imprégnée d'eau susceptible de contenir le gaz, et une roche de couverture imperméable (figure. I.3). Premièrement, on injecte un gaz

inerte sous une pression qui chasse l'eau et assure l'étanchéité du réservoir vers le bas [5]. Le gaz naturel de densité moins forte prend place au-dessus, bien calé sous la roche couverture. Une dizaine d'années sont nécessaires pour remplir entièrement le réservoir car il faut une injection relativement lente, mais il est exploitable dès la première année. Par la suite, il est rempli en été et utilisé, si nécessaire, tout au long de l'hiver pour compléter les approvisionnements.

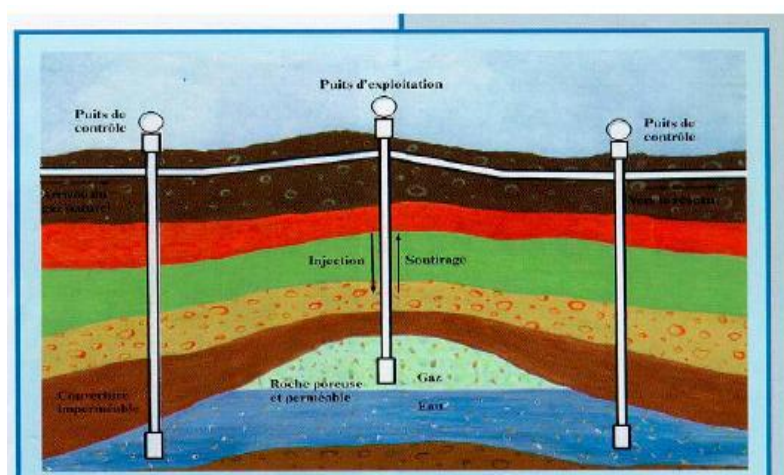


Figure. I.3 : Les réservoirs en nappe aquifère, [GDF-DER, 1995].

I.7.3. Les réservoirs en cavités salines :

Les cavités salines présentent la particularité de supporter des pressions importantes sans se fissurer mais en se déformant [5].

Par injection d'eau, on lessive le sel et l'évacuation de la saumure génère de vastes cavités où le gaz naturel est stocké à une pression élevée. Il est soutiré par simple détente. Plusieurs cavités hautes d'une centaine de mètres sont nécessaires pour constituer un stockage. Il faut environ trois ans de lessivage pour une cavité de 200 000 m³ de volume (figure 1.4). Par rapport au stockage précédent, la capacité n'est que de 0,65 milliard de m³, en revanche celui-ci offre la possibilité de prélever brièvement mais très rapidement de grandes quantités de gaz en période de pointe.

Un autre type de stockage de gaz naturel est constitué par les anciens sites on shore. Après que le gaz naturel a été extrait ce type de gisement est le lieu parfait pour stocker le gaz naturel. Pour le transport en méthaniers, les deux types de stockage sont utilisés :

- Des réservoirs cryogéniques.

Ø Des réservoirs en béton.

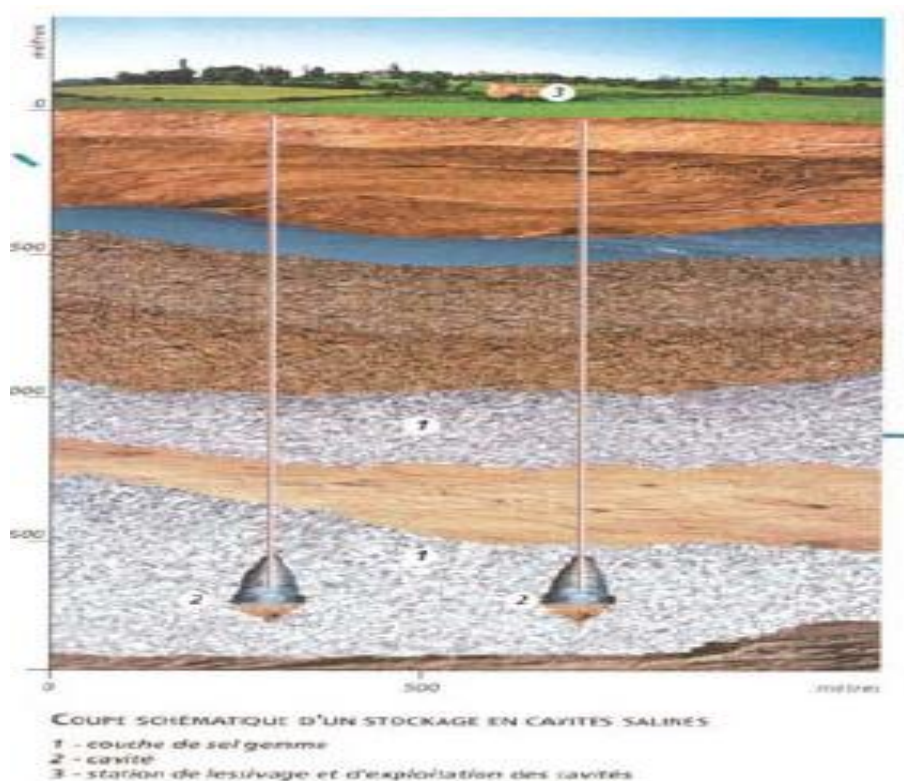


Figure. I.4 : Les réservoirs en cavités salines, [GDF-DER, 1995].

I.8. Conclusion :

Ce n'est pas un hasard si le gaz naturel est distribué via des réseaux de gazoducs terrestres : le stockage du gaz naturel est délicat. Contrairement aux GPL, le gaz naturel ne peut être liquéfié qu'à très haute pression ou très basse température. Ce principe n'est utilisé que sur les méthaniers, navires qui transportent le gaz en mer. Pour les utilisations qui nécessitent un stockage ponctuel (carburant automobile), il faut utiliser des réservoirs qui supportent des pressions de l'ordre de 300 bars.

Sur terre, on préfère utiliser des gazoducs. Le stockage de gros volumes de gaz est réalisé dans des cavités souterraines aux propriétés géologiques stables.

Chapitre II :

Réseaux de distribution

II.1. Introduction :

Le gaz naturel est une source d'énergie bon marché propre et pratique ; sans stockage pour l'utilisateur [6]. Grâce au réseau de distribution, Le gaz est assimilable à l'électricité, on ne paie la facture qu'après avoir consommé l'énergie cependant la création des réseaux de distribution sont conditionnée par le nombre de clients potentiels.

On ne verra pas de réseaux du gaz naturel dans les petites communes.

Les ouvrages de distribution ont pour vocation l'alimentation en gaz combustible des consommateurs, à une pression d'utilisation comprise à l'intérieur d'une fourchette bien précise.

Les réseaux de distribution comprennent des conduites, des postes de détente et des branchements.

Il existe des différents types de réseaux classés en quatre (04) catégories suivant le niveau de la pression de service.

Ø Catégorie basse pression (B.P) :

Réseaux fonctionnant à une pression correspondant sensiblement à la pression effective nécessaire à l'entrée des appareils d'utilisation. Cette pression est de 21 mbar. Cette catégorie de réseaux est en voie d'extinction.

Ø Catégorie moyenne pression type A (M.P.A):

Réseaux fonctionnant à des pressions comprises entre 50 et 400 mbar délivrant le gaz sur les réseaux B.P. et chez les clients par l'intermédiaire des détendeurs. Cette catégorie de pression n'est plus autorisée par "SONELGAZ"; elle est déclassée.

Ø Catégorie moyenne pression type B (M.P.B) :

Réseaux fonctionnant à des pressions relatives entre 0.4 et 4 bars délivrant le gaz sur les réseaux de pression inférieure et chez les clients par l'intermédiaire de détendeurs.

Après une détente, on peut obtenir deux niveaux de pressions selon le type d'usages :

- Ø 21 mbar pour les clients domestiques, tertiaires et industriels,
- Ø 300 mbar pour les clients tertiaires et industriels.

Ø Catégorie moyenne pression type C (M.P.C):

Réseaux fonctionnant à des pressions relatives comprises entre 4 et 16 bars, délivrant le gaz sur les réseaux de pression inférieure et chez les clients importants par

l'intermédiaire des postes de livraison. C'est une technique envisagée dans le futur.

II.2. Constitution des réseaux de distribution :

Un réseau de distribution comprend :

- Ø des conduites.
- Ø des postes de détentés.
- Ø des branchements.

II.2.1. Conduites ou canalisations :

Les réseaux B.P sont constitués en majeure partie de conduites en fonte. Ils sont un héritage des anciennes distributions de gaz manufacturé. Ils peuvent être également réalisés en polyéthylène ou en acier.

Les réseaux M.P.B. plus récents, sont constitués de conduites en acier et en polyéthylène et pour certaines parties (réseaux tertiaires) en cuivre. Depuis 1996 l'emploi de ce dernier, en ouvrages enterrés n'est plus autorisé par la "SONELGAZ".

On distingue plusieurs types de canalisations classés dans l'ordre des pressions décroissantes.

Tableau II.1 : Matériaux utilisées en fonction des pressions.

NATURE DE L'OUVRAGE	PRESSION	POSITION	MATERIAU	MODE D'ASSEMBLAGE
Réseau primaire M.P.C.	> 4 bar ≤ 16 bar	Enterré	Acier	Soudage
Réseau secondaire et tertiaire M.P.B.	≤ 4 bar > 0.4 bar	Aérien***	Acier Cuivre	Soudage Brasage capillaire fort
		Enterré	Acier P.E Cuivre.(*)	Soudage Electrofusion Fusion bout à bout Brasage capillaire fort
Réseau secondaire et tertiaire B.P.(**)	≤ 0.05 bar	Aérien***	Acier Cuivre	Soudage Brasage capillaire fort
		Enterré	Acier P.E Fonte grise Fonte ductile	Soudage Electrofusion Fusion bout à bout Jonction Mécanique Jonction Mécanique

II.2.2. Postes de détendeurs :

On appelle poste détente l'enceinte ou le local spécialement affecté ; occupé par le bloc de détente .Il joue le rôle de régulateur qui est rarement seul, d'autres appareils assurant divers fonctions lui sont généralement associés : robinets, filtres, vanne de sécurité, etc, ...

II.2.2.1. Poste de détente HP/MP :

Les postes de détente HP/MP ou postes de livraison ont pour fonction de livrer le Gaz aux distributions publiques, à la pression de service contractuelle de 4 bars relatifs. Ils sont équipés de deux lignes de détente équivalentes. Ils peuvent être à détente unique (70/4), et dans ce cas équipés d'un réchauffeur, ou alors à double étage de détente, et dans ce cas ils sont précédés d'un poste de pré détente (70/20 et 20/4).

Le schéma de principe d'un poste HP/MP est donné ci de sous :

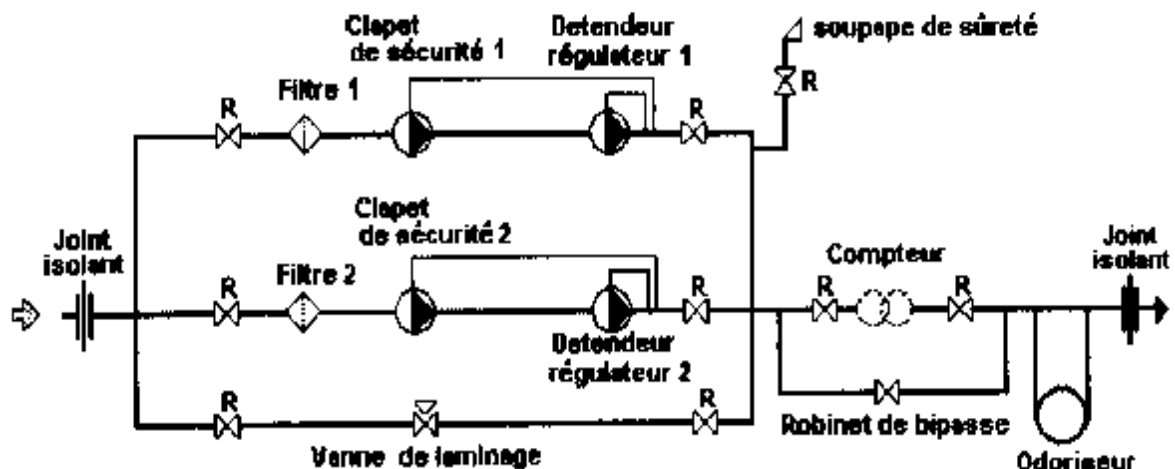


Figure II.1. Schéma de principe d'un poste HP/MP.

II.2.2.2. Poste de détente HP/BP :

Les éléments à prendre en compte pour le choix du bloc de détente sont généralement

- la nature du gaz distribué (GN, propane)
- les plages des pressions en amont et aval
- la nature des réseaux ou des clients à alimenter
- le débit à assurer
- le degré de sécurité à assurer

- l'emplacement du poste
- les fonctions complémentaires (correction de température et de pression, télé relevé...etc)

Lorsque l'adaptation du bloc de détente n'est pas réalisable, des solutions particulières seront recherchées.

Le choix du bloc de détente est basé essentiellement sur le débit et la pression demandés et éventuellement la pression disponible au point de raccordement.

Les détendeurs régulateurs individuels ou collectifs placés à l'amont de l'installation du client, sont pourvus de sécurités qui protègent l'installation par un dispositif de coupure automatique produisant l'interruption du gaz en cas de sur ou sous pression amont et aval.

Les détendeurs d'abonnés sont conçus pour fonctionner sous une pression amont comprise entre 0.5 bar et 4 bar.

La pression fournie à l'aval est de 21 mbar.

II.A. Détendeur d'abonnés domestique :

Ils sont prévus pour les débits de 5 à 25 Nm³/h, ils sont placé à intérieur d'un coffret ou en façade avec captage incorporé ou indépendant.

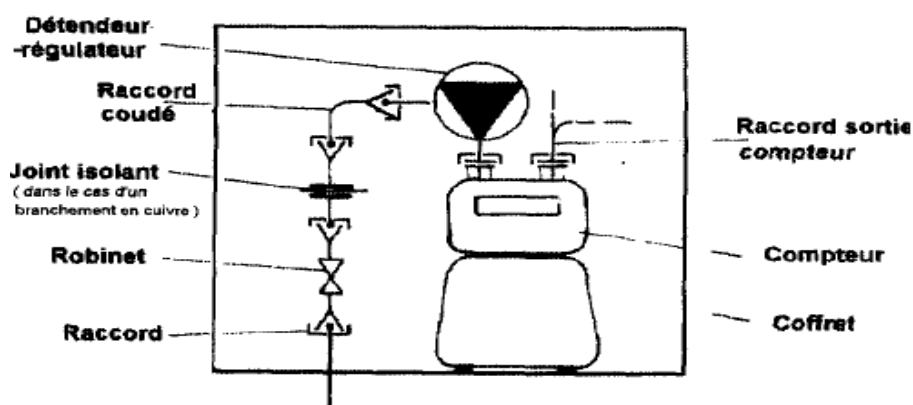


Figure. II.2. Schéma d'un détendeur régulateur d'abonnés domestiques.

II.B. Batteries de détente :

C'est un assemblage de 2, 3 à 4 .montés en parallèles, place dans un coffret on en façade avec captage incorporé ou indépendant . Les débits permis varient de 40 à 100 Nm³/h.

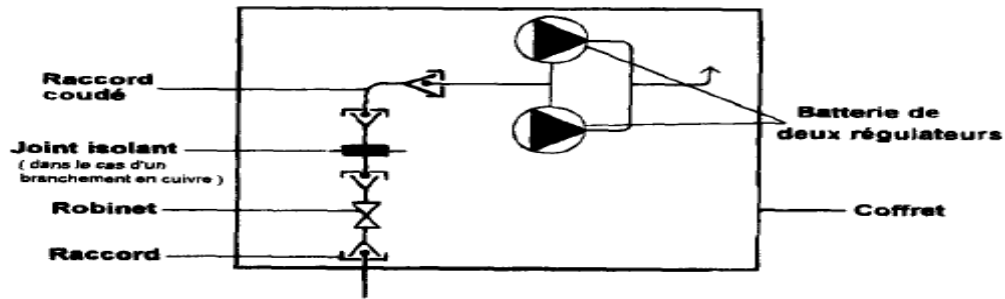


Figure. II.3. Batteries de détente

II.C. Poste de détente :

Ils sont placés dans des armoires préfabriquées, ou en abri maçonné avec comptage incorporé. Ils sont constitués :

- D'une seule ligne pour un poste type chaufferie.
- De deux lignes pour un poste type antenne.



Figure II.4. Armoires de détente

II.C.1. Poste type chaufferie :

Les régulateurs équipant ces postes sont appelés à fonctionner par variation rapide de débit (tout ou rien) dans ce cas, la surpression à la fermeture ne doit dépasser 5%. Le détendeur sera du type action directe.



Figure. II.5. poste de détentés en coffrets

Un régulateur-détendeur ne s'ouvre ni se ferme instantanément. Suivant l'utilisation, le débit peut passer brusquement du maximum à zéro se traduisant par une montée de pression pouvant être excessive ; ou inversement de zéro à un maximum, entraînant une chute de pression.

Afin d'éviter ces inconvénients, il y'a lieu de créer une « capacité tampon » entre détendeur et brûleur.

Pour la réaliser on calculera le diamètre de la tuyauterie afin d'avoir la perte de charge inférieure au maximum préconisé par le fournisseur de brûleur mais aussi, afin d'obtenir un volume au moins égale au 1/1000 du débit maximum total horaire exprimé en Nm^3/h .

II.C.2. Poste type antenne :

Les clients dont l'alimentation ne peut être interrompue (hôpitaux, gros industriels, etc...), ou poste DP dont le réseau aval n'est pas alimenté par plusieurs sources.

Ils comporteront en plus de la ligne principale de détente une ligne dite de secours destinée à assurer une alimentation du réseau en cas de défection de la ligne principale.

Cette ligne sera équipée des mêmes appareils que ceux de la ligne principale à savoir :

- Une vanne d'entrée.
- Un filtre.
- Un clapet de sécurité.
- Une vanne de sortie.

Le débit nominal de la ligne de secours doit être équivalent à celui de la ligne principale. Le détendeur sera du type piloté.

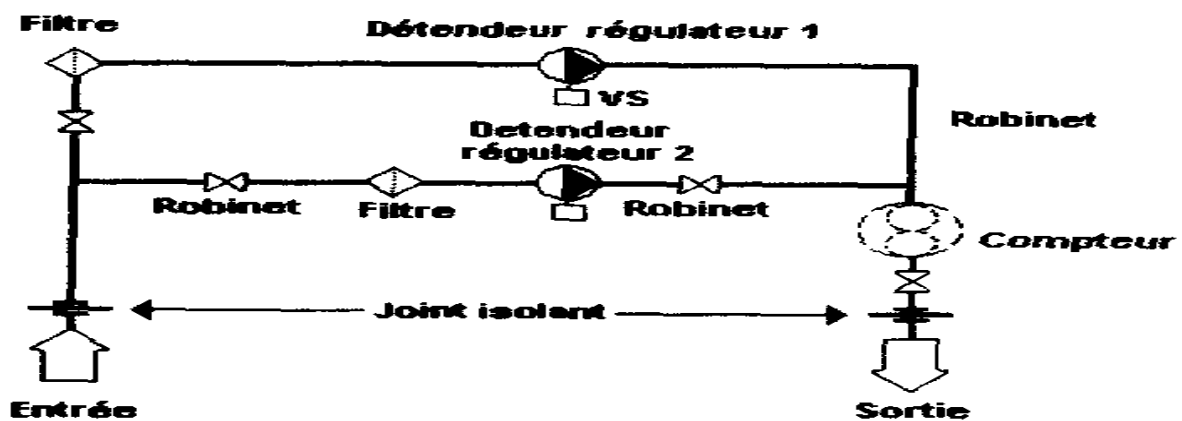


Figure. II.6. poste de détente de type antenne.

Les appareils d'utilisation sont conçus pour fonctionner de façon satisfaisante dans les plages de pression suivantes (pressions d'essai) :

Tableau II.2. Pression de fonctionnement des appareils d'utilisation :

Nature du gaz	Pmin (mbar)	Pn (mbar)	Pmax (mbar)
G.N type H Adrar - Hassi- R'Mel	17	21	25
G.N TYPE L ou B Sbaa	20	25	30
Gaz propane	25	37	45

Avec :

- **Pressions d'essais** : Pressions de gaz utilisées pour vérifier les caractéristiques de fonctionnement des appareils utilisant les combustibles gazeux. Elles comprennent les pressions normales (P_n) et les pressions limites (P_{\min} et P_{\max}).
- **Pression normale (P_n)** : Pression sous laquelle les appareils fonctionnent dans les conditions nominales, lorsqu'ils sont alimentés avec le gaz de référence correspondant

II.C.3. Postes de livraison des abonnés moyens pression :

Les abonnés moyenne pression (MP) est nécessite l'implantation d'un poste de livraison et de détente. Le poste de livraison comprend des dispositifs de détente, de sécurité et de comptage, et doit être situé en limite de propriété et de façon à permettre un accès facile et permanent aux agents de "SONELGAZ".

II.2.3. Les branchements :

A l'aval de ces réseaux, se situent des branchements individuels ou collectifs et des conduites montantes dans le cas des immeubles collectifs, qui alimentent les installations intérieures des clients.

Les branchements en polyéthylène sont réalisés sur les conduites acier, polyéthylène, cuivre et même fonte.

La réalisation des branchements nouveaux en cuivre et en plomb n'est plus autorisée.

Les réseaux M.P.C construits entièrement en acier, permettent de véhiculer des quantités importantes de gaz.

Un branchement est constitué de toute canalisation à basse ou moyenne pression, ayant pour objet d'amener le gaz à l'intérieur d'une propriété.

II.A. Branchements d'abonnés :

Les abonnés sont branchés soit directement dans le cas d'une distribution basse pression soit à travers un détendeur dans le cas d'une distribution moyenne pression. Le branchement est limité :

- à l'amont par le point de piquage sur la canalisation du réseau de distribution.
- à l'aval par le raccord de sortie du compteur.

II.B. Les piquages de branchements :

Les piquages de branchement sont réalisés suivant :

- la nature du réseau,
- le diamètre des conduites,
- le débit demandé

II.B.1. Sur réseau primaire :

Les piquages de branchement sur les conduites du réseau primaire sont interdits quelque soit le débit demandé.

II.B.2. Sur les réseaux secondaires :

Les piquages de branchement destinés aux abonnés domestiques et tertiaires dont le débit est inférieur ou égal à 65 Nm³/h sont :

- interdits en piquage direct sur les canalisations de diamètre supérieur ou égal à 90 mm.
- autorisés, à partir d'une amorce d'extension en diamètre 40 mm ou plus, dans le cas où le réseau tertiaire est inexistant. Les piquages de branchement destinés aux abonnés industriels (MP) dont le débit est supérieur ou égal à 100 Nm³/h sont autorisés et ils seront réalisés comme suit :

Tableau II. 3. Matériaux utilisés en fonction des diamètres.

Diamètre	Acier	P.E
Branchement (mm)	≥ 50	≥ 63
Canalisation (mm)	≥ 100	≥ 90

II.B.3. Pour les réseaux tertiaires :

Les piquages de branchement sont autorisés dans ces conditions suivantes :

- abonnés domestiques quelque soit le débit demandé.
- abonnés tertiaires à des débits inférieurs ou égaux à 65 Nm³/h.
- abonnés tertiaires et industriels à des débits de 100 à 250 Nm³/h.

Les pressions effectives de service sont normalisées aux valeurs suivantes :

Tableau II.4. Les pressions effectives.

P aval (mbar)	P amont maxi (bar)	P amont mini (bar)
21	04	01
300	04	01

Le débit nominal d'un bloc de détente est le débit exprimé en Nm^3/h , qu'un poste doit assurer dans les conditions suivantes :

- pression amont : 1 bar effectif
- pression aval : pression de fonctionnement normal

Les débits nominaux sont fixes aux valeurs suivantes :

- pour les détendeurs d'abonnés : 5, 10, 25 Nm^3/h .
- pour les batteries de détentes : 40, 65, 100 Nm^3/h
- pour les postes de détentes : 100, 250, 500, 1000, 1600 et 2500 Nm^3/h .

Pour le débit de 100 Nm^3/h , trois solutions peuvent être adoptées :

- batteries de détente (quatre régulateurs de 25 Nm^3/h)
- poste de coffret (simplifié).
- Poste en cabine ou maçonné.

II.3. Conclusion :

Les réseaux de distribution de gaz naturel, jouent un rôle d'alimenter les consommateurs de manière suffisante et continue de sorte à satisfaire leurs besoins, donc la moindre défection d'un réseau peut causer l'arrêt de l'alimentation en gaz naturel, ce qui nous pousse à trouver des solutions de rechange afin d'éviter ces arrêts d'alimentation. Parmi ces solutions, on opte pour le stockage du gaz naturel.

Chapitre III :
Les réservoirs de stockage des
liquides

III.1.Introduction :

Le stockage des gaz se fait généralement dans des réservoirs de forme cylindrique ou sphérique. Au cours de ce chapitre nous allons décrire la forme et les caractéristiques de chaque type de réservoir [7].

III.2.Réservoirs semi-réfrigérés :

Ce mode de stockage est réservé aux gaz liquéfiés qui, à température ambiante, développent de fortes pressions [7]. Il consiste à stocker ces produits sous une pression d'exploitation réduite obtenue par abaissement de leur température au moyen de machines frigorifiques.

L'intérêt de ce mode de stockage réside dans l'accroissement des capacités qu'il permet en raison de la réduction des épaisseurs de paroi liée aux faibles pressions d'utilisation. La quantité de produit que l'on peut stocker dans chaque unité est augmentée non seulement par le plus grand volume permis, mais également par la plus forte densité des liquides à ces températures.

III.2.1.La température de stockage :

La température retenue se situe entre celle du produit sous pleine pression à température ambiante et celle du produit totalement réfrigéré au point normal d'ébullition [7]. Généralement, on retient une température positive voisine de 5°C pour échapper au problème du gel de l'eau qui pourrait être présente en solution dans le gaz liquéfié. C'est souvent le cas pour les stockages de butane ou propane commercial. Cependant lorsque le point normal d'ébullition est trop bas, comme par exemple pour le dioxyde de carbone ou l'éthylène, les températures de stockage adoptées se situent autour de -20 à -25 °C, ce qui permet de rester à un niveau de pression encore raisonnable de l'ordre de 20 à 25 bars. Par ailleurs, ces températures ne nécessitent pas l'emploi d'aciers alliés spéciaux.

III.2.2.Isolation thermique :

Bien entendu, les stockages semi-réfrigérés sont pourvus d'une isolation thermique placée sur leur face extérieure [7]. Son but est de réduire le plus possible l'apport calorifique du milieu ambiant plus chaud. Cette isolation est le plus souvent réalisée au moyen de mousse de polyuréthane (projetée ou en plaque) ou par des briques de verre cellulaire. Sa face

externe comporte un écran pare vapeur qui empêche la migration de l'humidité ambiante ainsi qu'un bardage métallique de protection contre les intempéries.

III.3. Réservoirs réfrigérés et cryogéniques :

Cette méthode de stockage est généralement considérée comme une solution économique lorsque l'on doit traiter de grandes quantités de gaz liquéfié supérieures en principe à 5 000 tonnes [7]. Elle permet en effet de réaliser de grands réservoirs à parois minces et, par ailleurs, de loger une plus grande masse de produit liquéfié par unité de volume. La valeur très faible des pressions de fonctionnement permet de construire sans problème majeur des capacités pouvant atteindre 150 000 m³.

Ces réservoirs, malgré leurs dimensions souvent respectables, sont cependant plus satisfaisants sur le plan de la sécurité pour l'environnement que les unités de gaz liquéfiés sous pression. L'énergie libérée en cas de rupture accidentelle est en effet bien moindre sur ce type d'ouvrage à pression atmosphérique que sur les stockages pressurisés.

En pratique, ces capacités sont étudiées sous une légère pression relative de quelques millibars pour simplifier l'exploitation et la régulation du réservoir et du système de réfrigération. La pression d'étude retenue est généralement de l'ordre de 100 mbar. Cependant les exploitants exigent quelquefois des valeurs supérieures pouvant atteindre 300 mbar. La présence de cette pression impose d'ancrer les fonds de ces réservoirs sur leur fondation pour reprendre les efforts de soulèvement qu'elle développe sur le toit. La dépression d'étude reste le plus souvent voisine de 5 mbar.

III.3.1. Aspects des réservoirs réfrigérés et cryogéniques :

Par convention et en regard des matériaux mis en œuvre pour la construction des récipients contenant le produit liquide froid, on désigne par réservoirs réfrigérés les unités dont la température de stockage est supérieure à -60 °C et par réservoirs cryogéniques les unités qui fonctionnent au-dessous de cette température. La frontière de -60 °C correspond sensiblement à la limite d'emploi des aciers au carbone faiblement alliés. Pour des températures d'exploitation plus basses, on doit avoir recours à des aciers spéciaux alliés au nickel, à des aciers inoxydables austénitiques ou à des alliages d'aluminium [7]. La figure III.5 illustre cette terminologie pour les produits les plus couramment stockés sous pression atmosphérique.

III.3.1.1. Réservoirs à simple paroi :

Ce sont des réservoirs cylindriques verticaux, à fond plat ancré, surmontés d'un toit dôme [7]. Ils comportent une isolation thermique placée, en principe, sur la face extérieure des parois. Ils sont employés pour les stockages réfrigérés et ne conviennent pas pour les réservoirs cryogéniques qui nécessitent une isolation plus performante.

III.3.1.2. Réservoirs à double paroi :

Le récipient de stockage proprement dit, constitué d'un réservoir cylindrique à fond plat avec ou sans toit dôme, est contenu et protégé par une seconde enceinte en contact direct avec l'air ambiant dont l'aspect est comparable à celui d'un réservoir à toit sphérique [7]. Le système isolant, plus important et plus performant que sur les réservoirs à simple paroi, est placé dans l'espace compris entre les deux réservoirs. Ce type de réservoir est utilisé pour les stockages réfrigérés et cryogéniques.

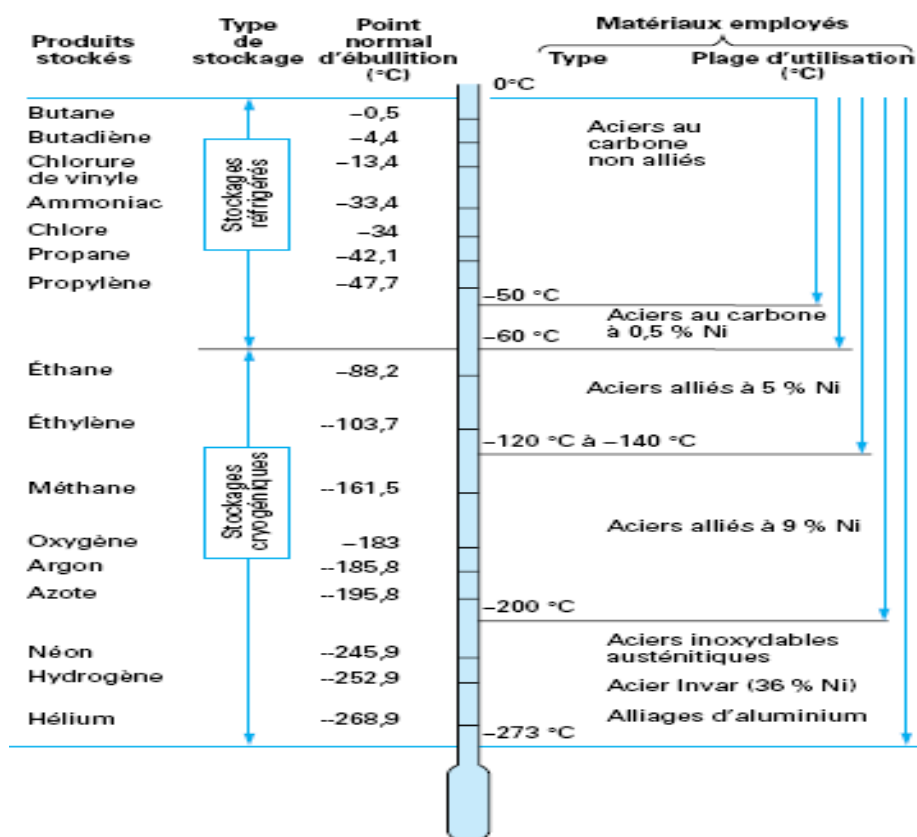


Figure III.1 : Matériaux employés en fonction de la température d'emploi et du produit stocké.

III.3.1.2.1. Réservoirs double paroi à simple rétention :

Ils comportent une cuve interne en métal résilient capable de contenir le liquide froid et une enveloppe externe en acier ordinaire qui supporte et protège l'isolation [7]. Sur les réservoirs comportant un pont suspendu, cette enveloppe contient également la pression de la phase gazeuse du produit stocké. L'enveloppe externe ne peut cependant en aucun cas contenir le liquide froid qui s'échapperait accidentellement de la cuve interne. Il n'y a donc pas de protection secondaire sur ce type de réservoir.

III.3.1.2.2. Réservoirs double paroi à double rétention :

Ces réservoirs comprennent une barrière secondaire qui protège le site d'un épandage à l'air libre du produit stocké, en cas de fuite sur la cuve intérieure [7]. Cette barrière permet donc de placer le stockage en situation de survie et d'éviter ainsi un processus de catastrophe inhérent à la vaporisation intense du liquide autour de l'installation. L'enveloppe extérieure assure donc les mêmes fonctions que dans la classe précédente mais elle est de plus conçue pour contenir le liquide froid.

III.4. Réservoirs à simple paroi :

III.4.1. Principe :

Les réservoirs à simple paroi (figure III.2) sont essentiellement utilisés pour les réservoirs réfrigérés avec températures d'étude supérieures à -60 °C [7].

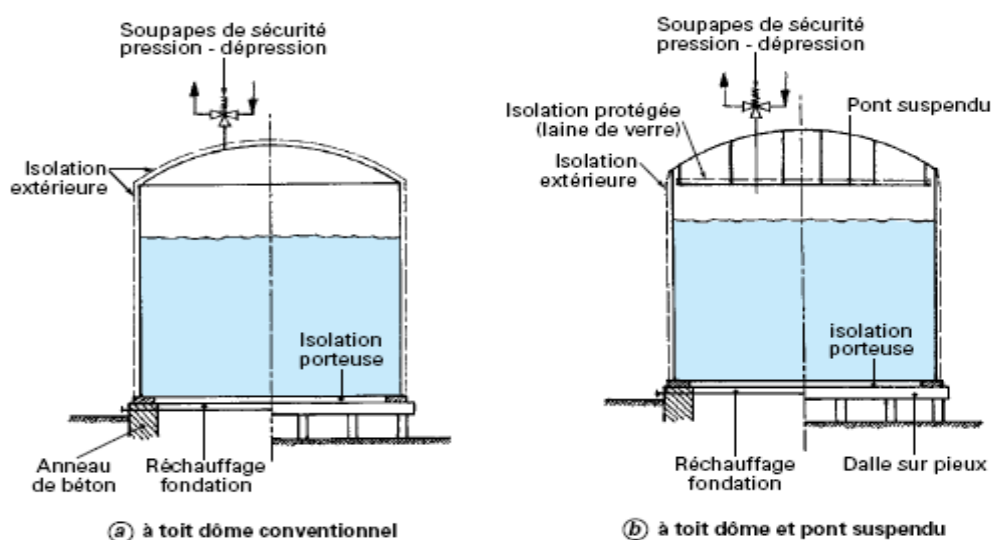


Figure III. 2 : Réservoirs à simple paroi métallique.

III.4.2. Réservoirs à toit dôme conventionnel :

Sur ces réservoirs l'isolation thermique de la robe et du toit est placée sur la face extérieure de l'ouvrage (figure III.2a). Elle est de ce fait directement exposée aux intempéries (vent, pluie, gel, neige), ce qui la rend assez vulnérable, en particulier pour la surface couvrant le toit dôme [7].

III.4.3. Réservoirs à toit dôme et pont suspendu :

Dans cette version, l'isolation du toit est installée à l'intérieur du réservoir, sur un voile métallique plan suspendu au toit dôme (figure III.2b) [7]. Ce système assure une grande longévité à l'isolation du toit et permet l'utilisation de matériaux isolants plus économiques et plus faciles à mettre en œuvre. Il en résulte un net avantage pour ce type de réservoir qui est d'ailleurs le plus répandu

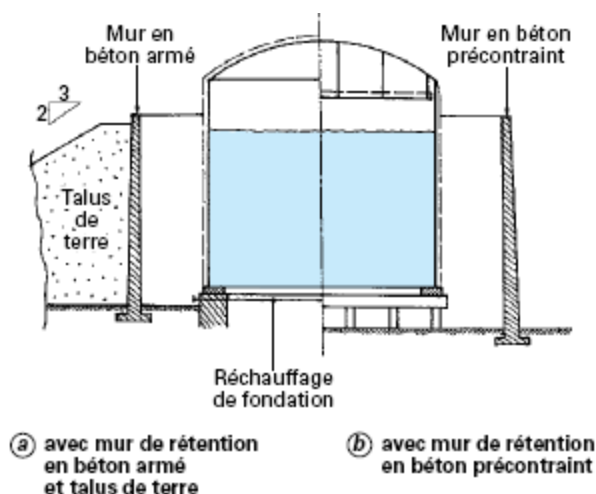


Figure III. 3 : Réservoirs à simple paroi métallique avec mur de rétention secondaire

III.5. Réservoirs à double paroi :

III.5.1. Généralités :

Ils sont systématiquement employés pour les stockages cryogéniques, mais également pour les stockages réfrigérés [7].

III.5.2. Réservoirs à double toit dôme conventionnel :

Ils se composent d'une capacité interne, qui contient le gaz liquéfié, comparable à un réservoir simple paroi conventionnel, et d'une enceinte extérieure (figure III.4) [7]. Cette enceinte, qui enveloppe le réservoir intérieur, ménage des espaces sous le fond, autour de la

robe et sur le toit, dans lesquels est placée l'isolation. Les deux enceintes sont étanches l'une par rapport à l'autre et fonctionnent chacune sous des conditions de pression et de température différentes.

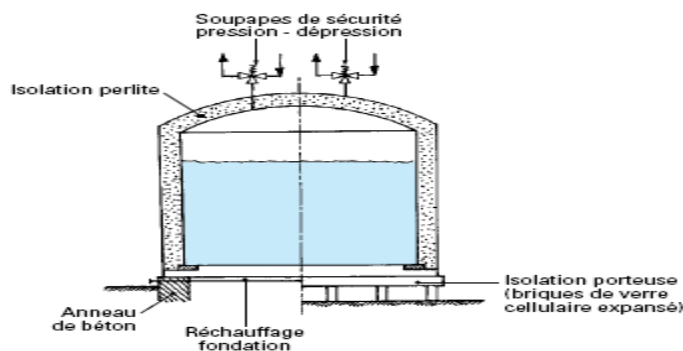


Figure III. 4 : Réservoir à double paroi métallique avec double toit dôme conventionnel.

III.5.3. Réservoirs à toit dôme et pont suspendu :

La capacité interne qui contient le gaz liquéfié est une cuve ouverte sans toit surmontée d'un pont suspendu (figure III.5) [7]. L'enceinte extérieure comporte un toit dôme auquel est accroché le pont suspendu. Elle abrite la cuve intérieure en formant un espace autour de la robe et sous le fond. Les deux enceintes communiquent entre elles en partie haute. La pression de la phase gazeuse du gaz liquéfié est contenue par les parois du réservoir extérieur. Elle est donc présente dans l'espace isolant et sous le toit dôme. L'isolation du toit est placée sur le pont suspendu au-dessus de la cuve interne, et celle de la robe et du fond dans l'espace constitué entre les deux parois.

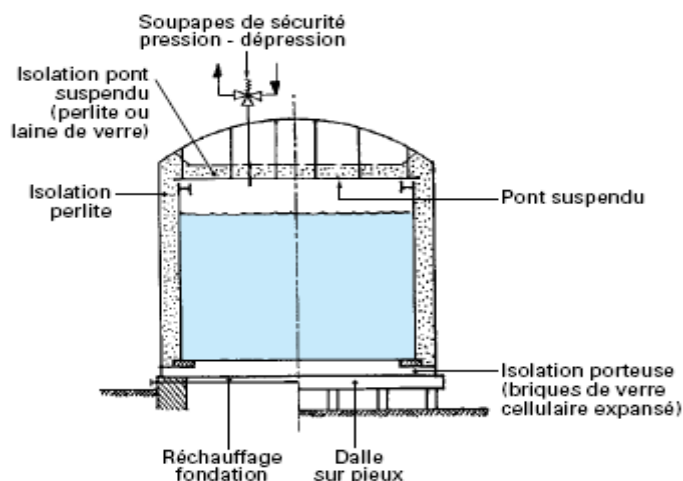


Figure III.5. Réservoir à double paroi métallique avec toit dôme et pont suspendu.

III.5.4.Réservoirs double paroi à simple rétention :

III.5.4.1. Réservoirs à double toit dôme :

Le réservoir intérieur est similaire à un réservoir simple paroi à toit dôme conventionnel (figure III.2a) [7]. Il ne se distingue essentiellement que par les quelques différences ci-après.

Les tôles employées Pour sa construction sont de qualités différentes selon les températures considérées. Pour les stockages réfrigérés, on utilise des aciers au carbone comme pour les réservoirs à simple paroi. Par contre, pour les réservoirs cryogéniques, il est nécessaire de mettre en œuvre des aciers alliés au nickel (5 à 9 %), des aciers inoxydables austénitiques ou des alliages d'aluminium.

III.5.4.1.1.Le réservoir intérieur :

Il n'est pas soumis à l'action du vent et de ce fait les ancrages installés à la jonction robe-fond ne sont plus dimensionnés que pour la pression interne et le cas échéant pour résister à un séisme [7].

III.5.4.1.2.Le dimensionnement du toit dôme intérieur :

Il est effectué en considérant le poids propre du toit, la charge exercée par l'isolation qu'il supporte, la pression dans l'inter paroi et la dépression du réservoir intérieur [7].

III.5.4.1.3.Le réservoir extérieur :

Il est une simple enceinte de confinement destinée à contenir et à protéger l'isolation qui entoure le réservoir intérieur [7]. Il est directement soumis aux conditions ambiantes du site et sa température de fonctionnement ne dépend que de la température atmosphérique. Il est en conséquence réalisé à partir de tôles en acier de construction ordinaire.

III.5.4.1.4.Le fond :

De ces réservoirs est réalisé à partir de tôles de 5 à 6,5 mm d'épaisseur soudées par recouvrement. Pour contrebalancer les efforts de renversement provoqués par le vent ou par un séisme, des boulons d'ancrage doivent être disposés à la périphérie du fond sur la robe [7].

III.5.4.1.5. Les épaisseurs de la robe :

Sont déterminées en compression à partir des charges verticales telles que : poids propre du toit et de la robe, dépression interne, actions du vent ou d'un séisme et frottement de la perlite sur la paroi cylindrique [7]. Bien entendu, ces épaisseurs ne doivent pas être inférieures aux épaisseurs minimales de construction fixées par chaque code en fonction du diamètre. La stabilité de la robe sous pression extérieure due au vent, à la dépression interne et, éventuellement, au souffle d'une explosion locale, doit être vérifiée et le cas échéant des raidisseurs circonférentiels doivent être installés.

III.5.4.1.6. Le toit dôme autoportant :

Un rayon de courbure égal à celui du réservoir intérieur majoré de l'épaisseur de l'isolation sur le toit. Il comporte ou non une charpente du même type que celle prévue sur le toit intérieur et doit pouvoir supporter une surcharge au moins égale à 120 da N/m² correspondant au cumul de la neige ou d'une charge et de la dépression interne [7].

III.5.4.1.7. L'isolation du fond :

Il est assuré comme pour les réservoirs à simple paroi par plusieurs couches de briques de verre cellulaire dont l'épaisseur totale dépend de la valeur des pertes thermiques que l'on se fixe, de la température du fluide stocké et de la température ambiante [7]. Cette isolation prend appui sur un lit de sable sec ou sur une chape de béton maigre de quelques centimètres placée sur le fond du réservoir extérieur pour constituer un plan de pose sans relief et assurer une meilleure répartition des charges.

III.5.4.1.8. L'isolation de la robe et du toit :

Est réalisée par un isolant pulvérulent placé en vrac dans l'espace libre compris entre les parois des deux réservoirs [7]. Pour des raisons de construction, la largeur minimale de l'inter-paroi entre les robes est le plus souvent fixée au voisinage de 750 mm. Lorsque cela est nécessaire pour limiter les évaporations du produit stocké, la largeur de cet espace isolant est augmentée et peut atteindre sur la robe 1 500 à 2000 mm.

III.5.4.2. Réservoirs à toit dôme et pont suspendu :

Ce type de réservoir est caractérisé par l'absence d'un toit étanche sur la cuve interne et par la communication qui existe de ce fait entre cette cuve et l'espace isolant de l'enceinte extérieure [7]. Il résulte de cette conception que la phase vapeur du gaz liquéfié est présente dans l'inter-paroi et pressurise les parois du réservoir extérieur. On retire de ce concept un certain nombre d'avantages, par rapport au réservoir double paroi conventionnel, qui concourent à la réalisation de structures plus simples et par conséquent plus économiques.

On notera en particulier :

- la simplicité d'un pont suspendu par comparaison à un toit dôme autoportant .
- l'amincissement des parois de la robe intérieure en raison de l'égalisation de la pression gazeuse sur les deux faces de cette robe .
- la suppression sur la cuve intérieure des ancrages de la robe non nécessaires en l'absence de toit.
- l'allégement du raidissage circonférentiel de la robe intérieure en l'absence de pression gazeuse différentielle.
- la suppression de l'alimentation en gaz neutre ou sec nécessaire sur les réservoirs à double paroi conventionnels pour la pressurisation de l'inter-paroi ;
- l'élimination du problème de régulation des pressions différentielles entre les enceintes intérieures et extérieures.
- la nécessité d'un seul ensemble de soupapes de sécurité pression-dépression placé sur le réservoir extérieur.
- la simplification des traversées de toits pour les tubulures d'exploitation supérieures.

III.5.4.3. Réservoirs double paroi à double rétention :

III.5.4.3.1. Réservoirs avec enveloppe externe métallique :

Ces réservoirs sont du même type que les stockages à simple rétention mais leur enveloppe externe est conçue pour contenir le liquide réfrigéré ou cryogénique en cas de défaillance accidentelle de la cuve interne [7]. Cela implique que le fond, la robe et la jonction robe-toit de cette enveloppe soient réalisés en acier présentant des garanties de résilience à basse température équivalentes à celles retenues pour le réservoir intérieur et que la robe soit suffisamment épaisse pour supporter la charge hydrostatique du liquide retenu.

III.5.4.3.2. Réservoirs avec enceinte extérieure en béton :

L'enceinte extérieure de rétention ultime n'est plus métallique mais en béton précontraint (figure III.6) avec des parois épaisses capables de contenir le liquide stocké [7].

Ce type de construction assure une sécurité pour l'environnement plus grande que celle apportée par une barrière secondaire métallique.

En plus de sa fonction de confinement de secours, l'enceinte extérieure constitue, en effet, un véritable bouclier contre les agressions extérieures.

Ces réservoirs sont en général du type à toit dôme et pont suspendu.

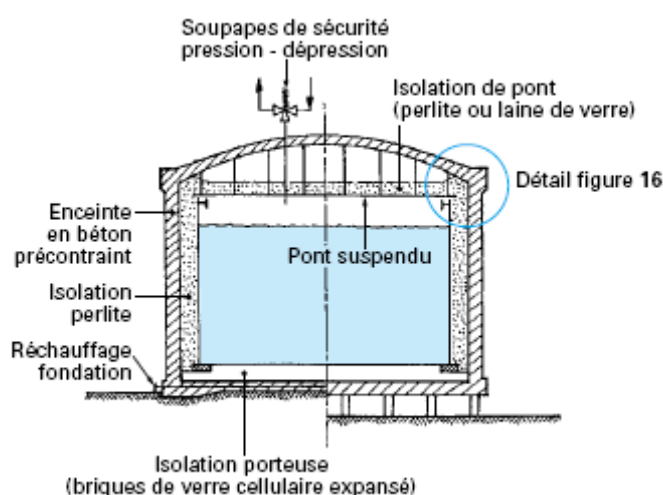


Figure III.6 : Réservoir à double paroi à double rétention avec enceinte extérieure en béton précontraint.

III.5.4.3.3. Réservoirs à membrane :

La technique employée pour ces réservoirs est dérivée de celle développée pour les cuves de stockage des navires de transport de gaz liquéfiés réfrigérés et cryogéniques [7]. Son usage à terre reste cependant limité et les unités de ce type sont encore peu nombreuses en comparaison avec les réservoirs à cuve autoportante existants.

Ces réservoirs à membrane sont du type à toit dôme et pont suspendu.

Ils comportent essentiellement :

- Un récipient interne, contenant le liquide stocké, constitué par une membrane d'étanchéité de très faible épaisseur disposée sur l'isolation porteuse du fond et de la robe.

- Un système isolant porteur, installé à l'arrière de la membrane d'étanchéité en appui sur le fond et la robe du réservoir extérieur en béton.
- Un pont suspendu et son isolation conventionnelle, accrochés à la coupole métallique du toit dôme, et placés au-dessus du récipient de stockage ;
- un réservoir extérieur autoportant en béton précontraint.

III.6. Conclusion :

Le choix de type de réservoir à concevoir se fait en fonction des paramètres fondamentaux qui sont les caractéristiques du gaz à stocker et le volume de stockage ainsi que le milieu ambiant.

Chapitre IV :
Dimensionnement du
réservoir de stockage

IV.1. Objectif de l'étude :

Le travail consiste à concevoir un réservoir de stockage d'un volume de gaz naturel. Ce volume sera utilisé dans le cas d'arrêt de l'alimentation causé par des problèmes de distribution.

Pour les données de calcul, nous avons pris l'exemple de la résidence universitaire de jeunes filles d'Oued Aissi.

La résidence est alimentée en gaz naturel par le réseau moyen pression type B (M.P.B) de distribution publique allant d'Oued Aissi vers le village Tabarkoukt.

IV.2. Données de calcul :

Un poste de détente de $450 \text{ Nm}^3/\text{h}$ est installé au niveau de la résidence. Ce poste est alimenté par un tronçon dérivé du réseau principal de diamètre 125 mm. La pression effective à l'entrée du détendeur est de 4 bars, la température du gaz varie entre $2,5^\circ$ et 10°C . Sa vitesse est généralement inférieure à 20 m/s.

A la sortie du poste de détente le gaz est transporté par une conduite de diamètre égale à 200 mm, la pression effective du gaz est de 21 mbar (pression d'utilisation). La température du gaz utilisé varie généralement entre 8 et 12°C .

Les appareils fonctionnant au gaz au niveau de la résidence sont les suivants :

- Quatre chaudières.
- Fours de cuisine au niveau du restaurant.

Selon SONELGAZ, la consommation est de l'ordre de $450 \text{ Nm}^3/\text{h}$ pour la durée moyenne de fonctionnement égale à 6 heures.

IV.3. Calcul du volume de gaz :

A la pression effective de 21 mbar et à la température moyenne 10°C . On a les données suivantes :

- Le débit du gaz consommé est : $Q = 450 \text{ Nm}^3/\text{h}$.
- Le temps de fonctionnement est de l'ordre de six (06) heures par jour ($t = 06$ heures)

On peut alors calculer le volume selon la relation suivante :

$$V = Q \cdot t \quad (1)$$

Le volume du gaz consommé pendant le fonctionnement d'une journée est donc:

$$V = 450 \times 06 = 2700 \text{ m}^3.$$

$$V = 2700 \text{ m}^3$$

A titre d'exemple, si on suppose une forme sphérique pour le réservoir, le diamètre de ce dernier est donné par :

$$D = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (2)$$

Pour les différents jours, la relation (2) donne les résultats résumés dans le tableau ci après :

Le tableau IV.1 : Diamètre de la sphère pour différents jours d'autonomie.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume (m ³)	2700	5400	8100	10800	13500	16200	18900
Diamètre (m)	17,279	21,770	24,921	27,429	29,547	31,398	33,054

A ces conditions de température et de pression, le volume de gaz à stocker (volume du réservoir) est énorme ce qui nous impose de le liquéfier, afin de réduire son volume au maximum.

IV.4. Détermination des propriétés thermophysiques du gaz naturel :

Le gaz naturel Algérien contient entre 81 et 97 % de méthane. Il est moins dense que l'air. Sa densité est de 0,6 et sa masse volumique est d'environ 0.8 kg/m³. Il se présente sous sa forme gazeuse au-delà de - 161 °C environ, à la pression atmosphérique. La composition chimique pour deux sites distincts (Adrar – Hassi R'mel) est donnée par le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : Les propriétés thermophysiques du gaz naturel.

Constituant	Formule	Hassi R'mel % Molaire	Adrar % Molaire
Azote	N ₂	6.15	2.30
Oxyde de carbone	CO ₂	0.19	6.12
Méthane	CH ₄	85.10	88.31
Ethane	C ₂ H ₆	5.90	2.48
Propane	C ₃ H ₈	1.92	0.61
Iso-butane	i-C ₄	0.24	0.06
N-butane	nC ₄	0.33	0.06
N-pentane	NC ₅	0.17	0.06

Les propriétés thermophysiques du gaz naturel, ne sont pas disponibles dans la littérature. Les handbooks et livres de thermodynamiques spécialisés fournissent les propriétés pour les gaz purs (corps purs). (Exemple méthane, seul, azote), mais pas pour le gaz naturel. Sachant que la composition de ce dernier est spécifique pour chaque gisement. Pour cela, on a fait appel au logiciel **Refprop**.

Ce logiciel permet de déterminer les caractéristiques thermophysiques d'un fluide pur ou d'un mélange de plusieurs éléments. Comme le montre la figure ci-dessous :

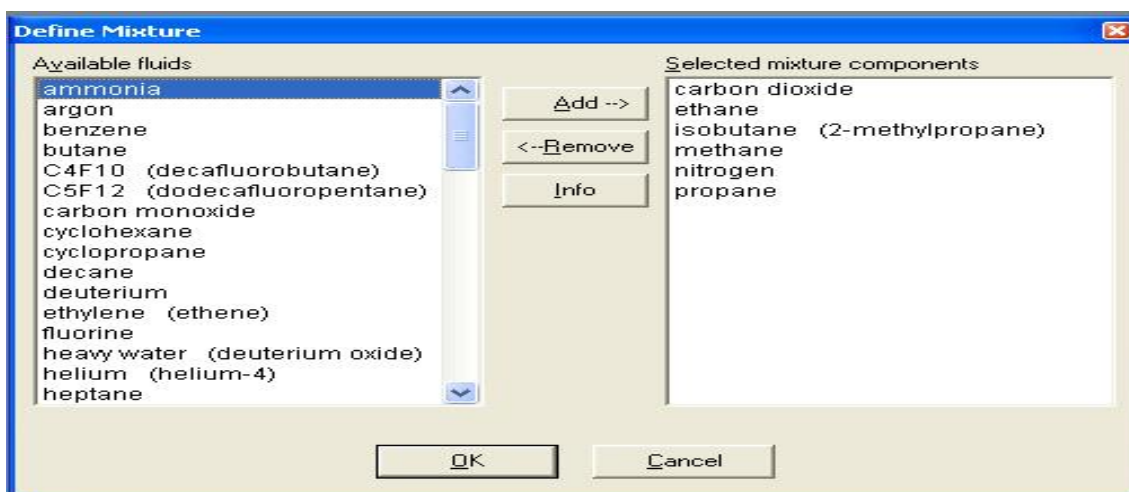


Figure IV.1 : Fiche de sélection des fluides.

Le logiciel Refprop permet de définir et de spécifier les fractions massiques ou molaires de chaque constituant composant le gaz naturel.

Specify Mixture Composition

Mixture Name: carbon dioxide/ethane/isob

Components: Mass Fraction

carbon dioxide	0,0019
ethane	0,059
isobutane	0,0024
methane	0,856
nitrogen	0,0615
propane	0,0192

Normalize composition to one

OK Cancel Store

Figure IV.2 : fiche de description des fractions massique ou molaires.

Pour voir l'influence des éléments qui constituent le gaz naturel, nous avons étudié trois variantes possibles :

- **Variante 1 :** Le gaz naturel est défini dans le logiciel Refprop avec tous ses constituants à l'exception de N-butane et de N-pentane. Car ces derniers constituants ne sont pas disponibles dans le logiciel. La composition du gaz naturel est donnée par le tableau suivant :

Mixture Information

Mixture name: VARIANTE 01
Molar mass: 17,231 kg/kmol

Estimated critical properties
Temperature: -75,316 °C
Pressure: 52,381 bar
Density: 180,27 kg/m³

Components and composition: Mass Fraction

carbon dioxide	0,0019000
ethane	0,059000
isobutane	0,0024000
methane	0,85600
nitrogen	0,061500
propane	0,019200

OK Cancel

Figure IV.3 : Les constituants de la variante 1

A. Variante 2 : Là, on n'a considéré que les constituants les plus prépondérants à savoir le méthane, l'azote et l'éthane. comme le montre la figure ci-dessous :

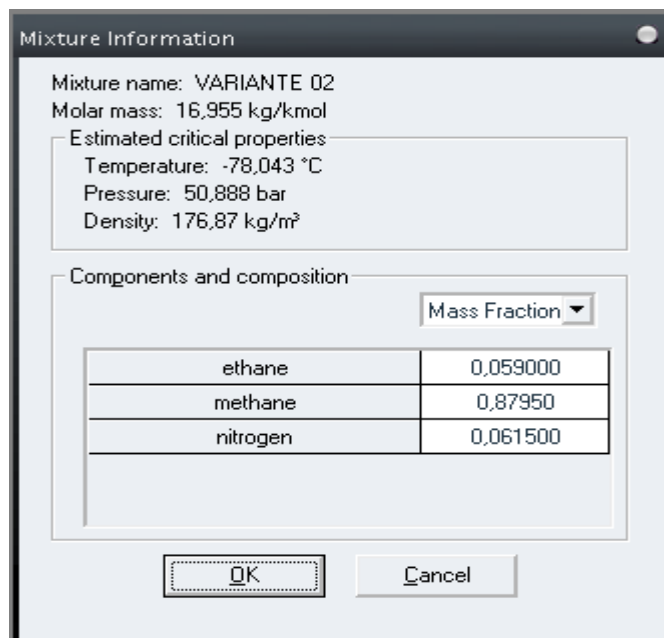


Figure IV.4 : Les constituants de la variante 2

Ø Variante 3 : Là, on a considéré uniquement le méthane pour le calcul des propriétés thermophysiques.

VI.5. Calcul de la masse du gaz naturel consommée :

Aux conditions d'utilisation du gaz naturel (pression absolue 1.021 bars et température 10°C), la masse volumique et l'enthalpie du gaz naturel pour les trois variantes, calculées par le logiciel Refprop, sont récapitulées dans le tableau IV.3 suivant :

Tableau IV.3: La masse volumique et l'enthalpie du gaz naturel pour les trois variantes.

Variante	Masse volumique (kg/m ³)	Enthalpie (Kj/kg)
Variante 01	0.74898	820.37
Variante 02	0.73692	826.99
Variante 03	0.69723	876.71

La masse volumique est donnée par :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

La masse du gaz qu'il faut stocker aux conditions de pression et de température de l'utilisateur, est calculée comme suit :

$$m = \rho \cdot V \quad (4)$$

Le tableau IV.4 : Masse de gaz à stocker pour les trois et pour différents jours.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume (m³)	2700	5400	8100	10800	13500	16200	18900
Masse de gaz (kg) variante1	2022.2	4044.4	6066.7	8088.9	10111.2	12133.4	14155.7
Masse de gaz (kg) variante2	1989.6	3979.3	5969.0	7958.7	9948.4	11938.1	13927.7
Masse de gaz (kg) variante3	1882.5	3765.0	5647.5	7530.1	9412.6	11295.1	13177.6

IV.6. Compression du gaz à la température moyenne de 5°C :

Le but recherché est de liquéfier le gaz. On s'intéresse donc à son comportement sous l'effet de la compression. Comme le gaz arrive au poste de détente à une température variant entre 2 et 10°C, on a représenté sur les figures IV.5, IV.6, IV.7, l'isotherme 5°C (température moyenne) sur le diagramme P, H (pression, enthalpie) obtenu à l'aide du logiciel Refprop pour les trois variantes considérées.

IV.6.1.Variante 01 :

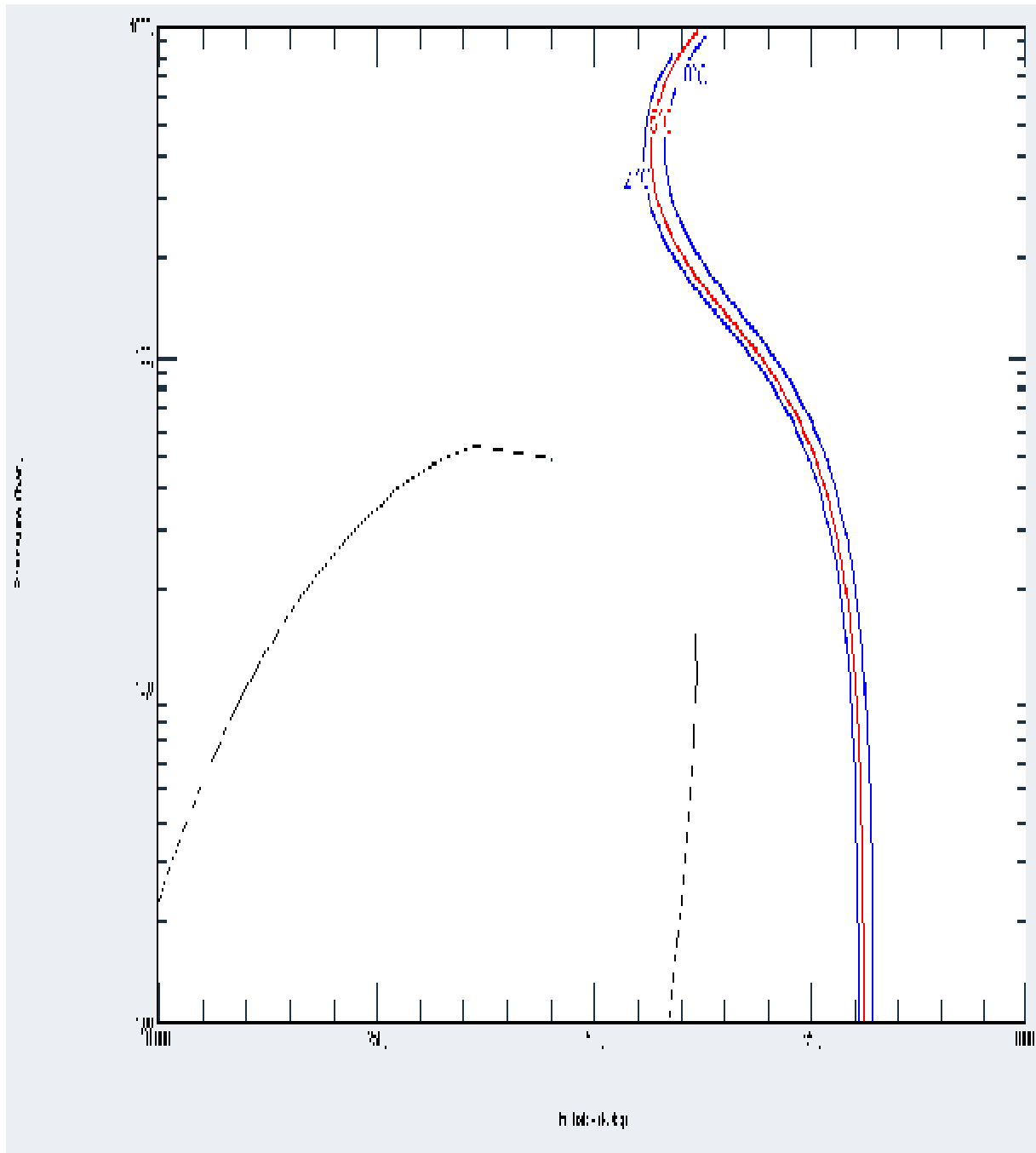


Figure IV.5 : Diagramme (P.H) représentant isotherme pour le cas de 5°C de la variante 1

Sur la **figure IV.5**, On remarque que pour l'isotherme de 5°C le gaz ne peut pas être liquifié quelque soit la pression. Les isothermes 2 et 10°C sont également représentées pour comparaison .

IV.6.2.Variante 02 :

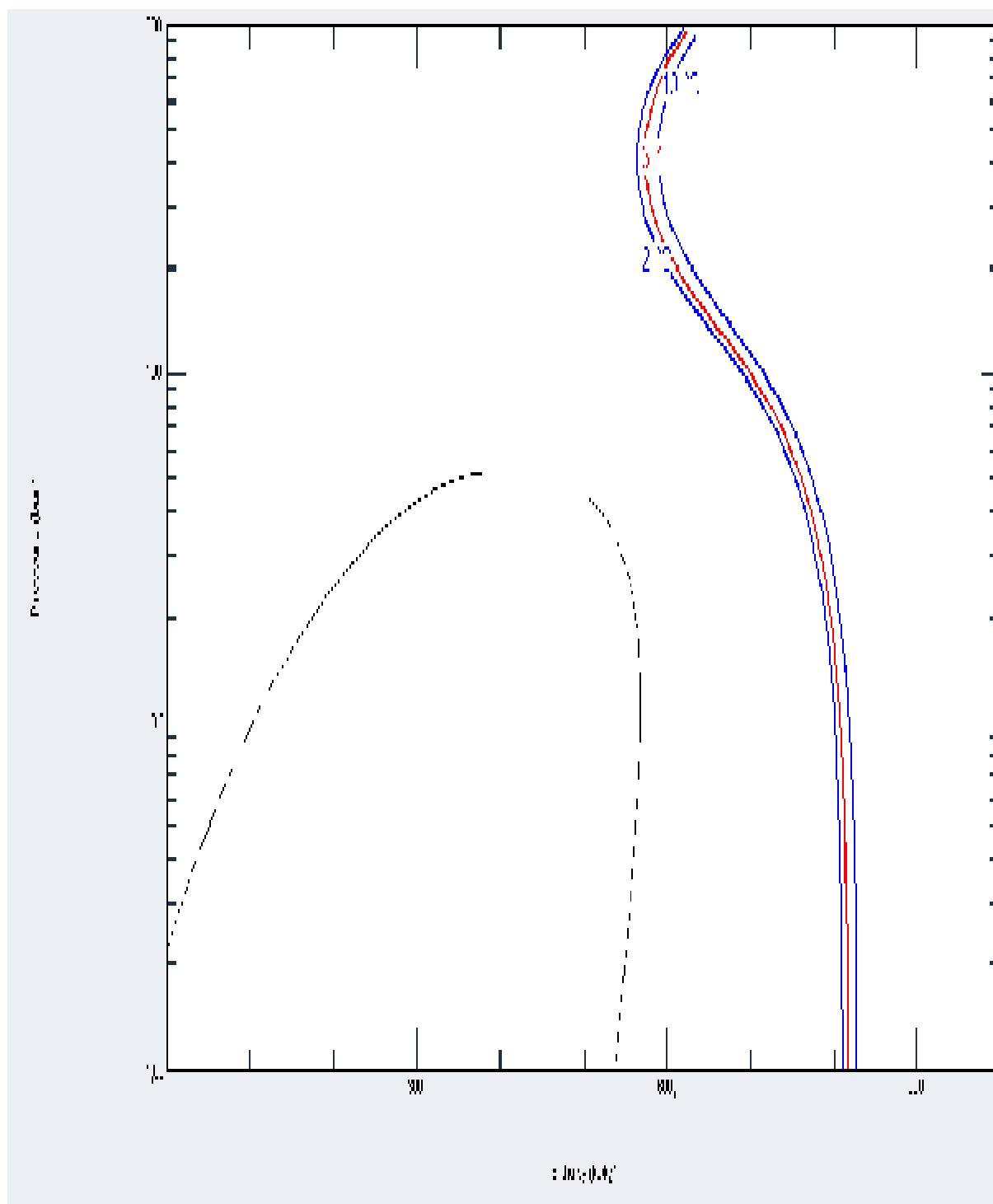


Figure IV.6 : Diagramme (P, H) représentant isotherme pour le cas de 5°C de la variante 2

Pour la variante 2, les résultats fournis par le logiciel Refprop sont presque similaires au cas précédent.

IV.6.3.Variante 03 :

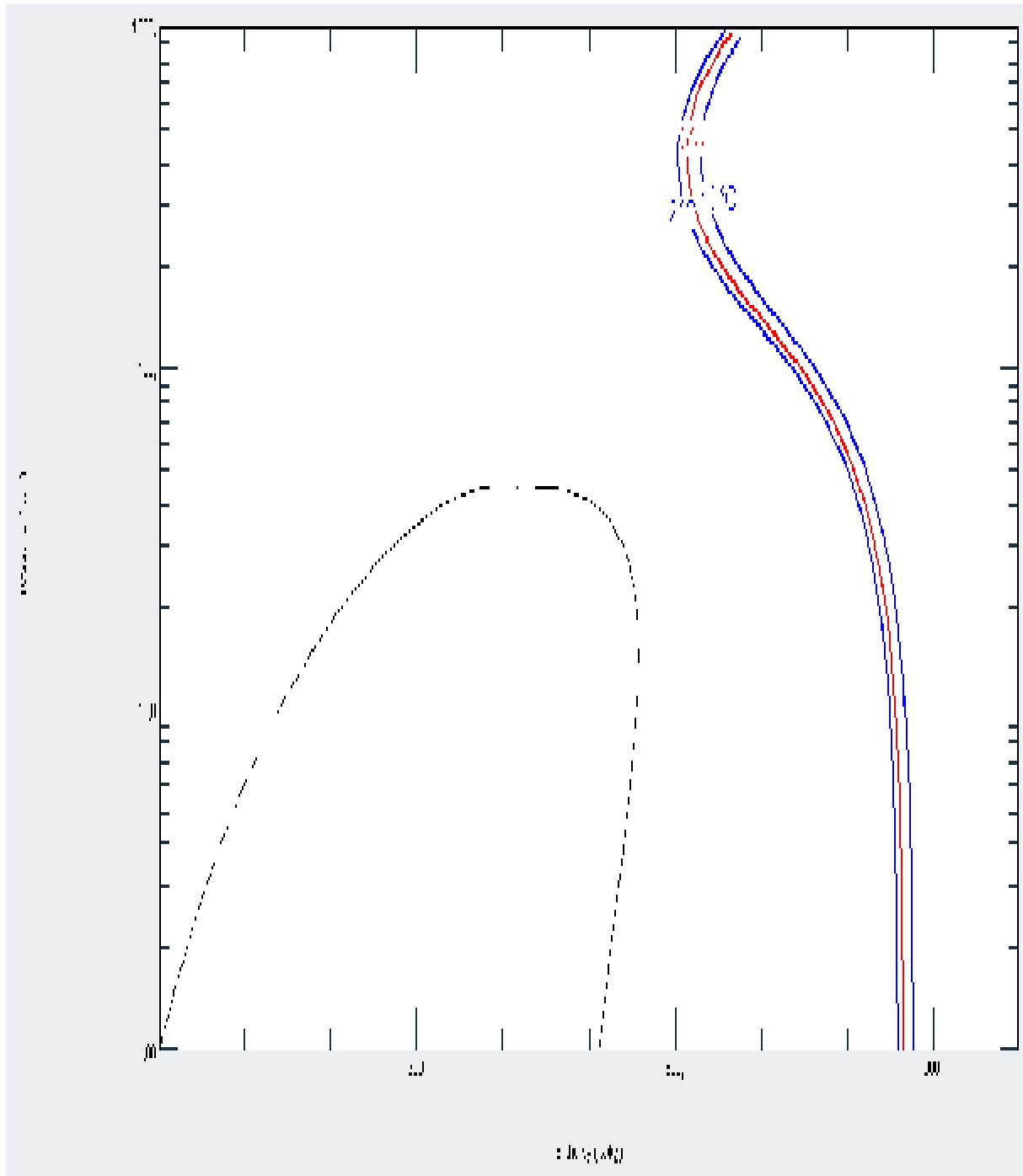


Figure IV.7: Diagramme (P, H) représentant isotherme de 5°C pour le cas de la variante 3

Là aussi, dans le cas où on considère le méthane seul, le gaz n'atteint jamais son état liquide même si on le comprime à de très hautes pressions sous une température constante de 5°C. Donc pour liquéfier on doit faire appel à un système cryogénique (à basse température) pour baisser la température du gaz.

IV.7. Refroidissement du gaz sous une pression de 5 bars :

IV.7.1. Variante 01 :

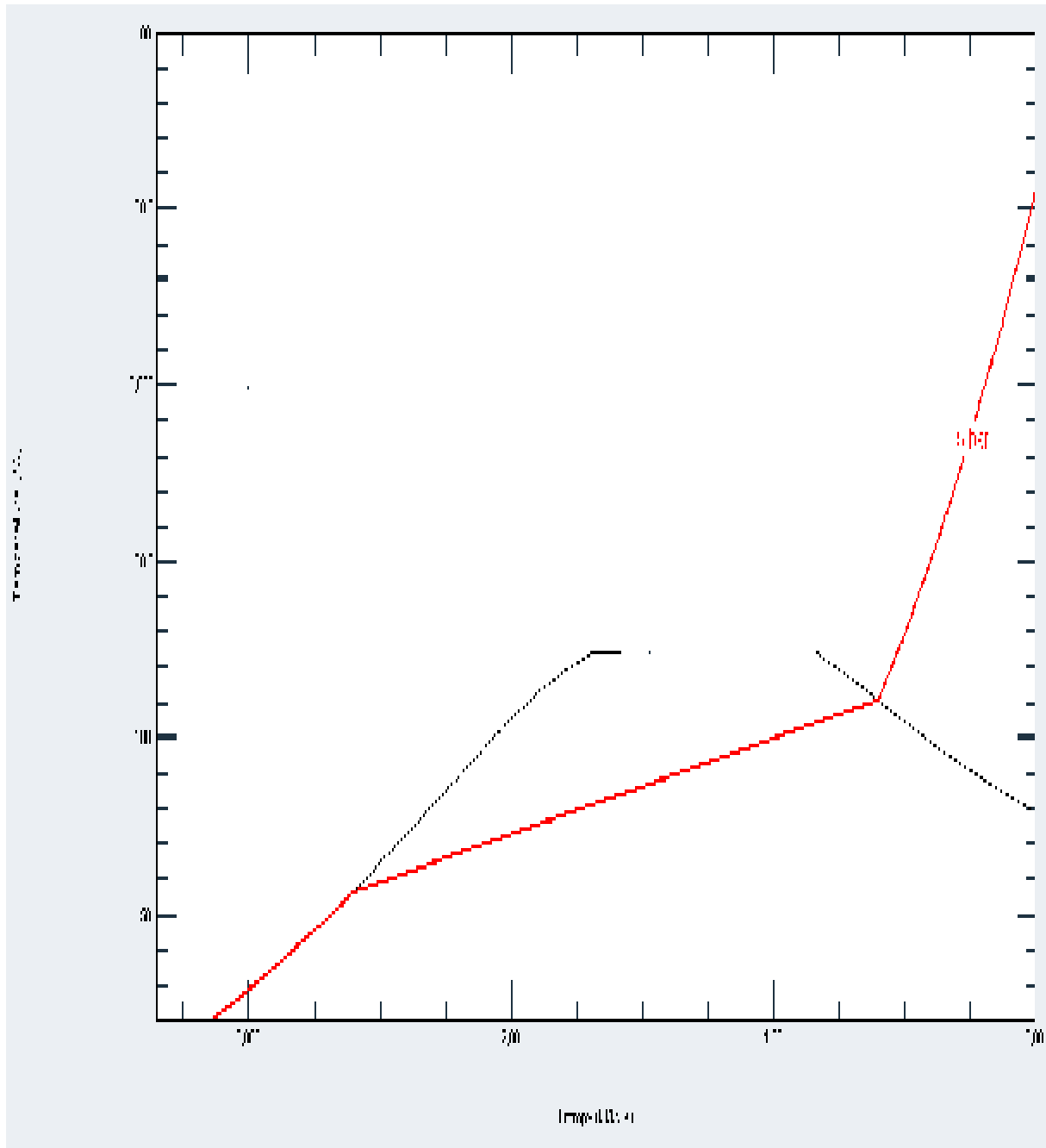


Figure IV.8: Diagramme (T, S) de la variante 01 sous une pression de 5 bars

D'après le logiciel Refprop le gaz atteint l'état liquide (liquéfaction) à la température de -143.65°C . A cet état la masse volumique de la phase liquide vaut 419.73 kg/m^3 et l'enthalpie 45.139 KJ/kg . L'enthalpie de la phase gazeuse vaut 611.01 KJ/kg , à la température -89.243°C .

IV.7.2.Variante 02 :

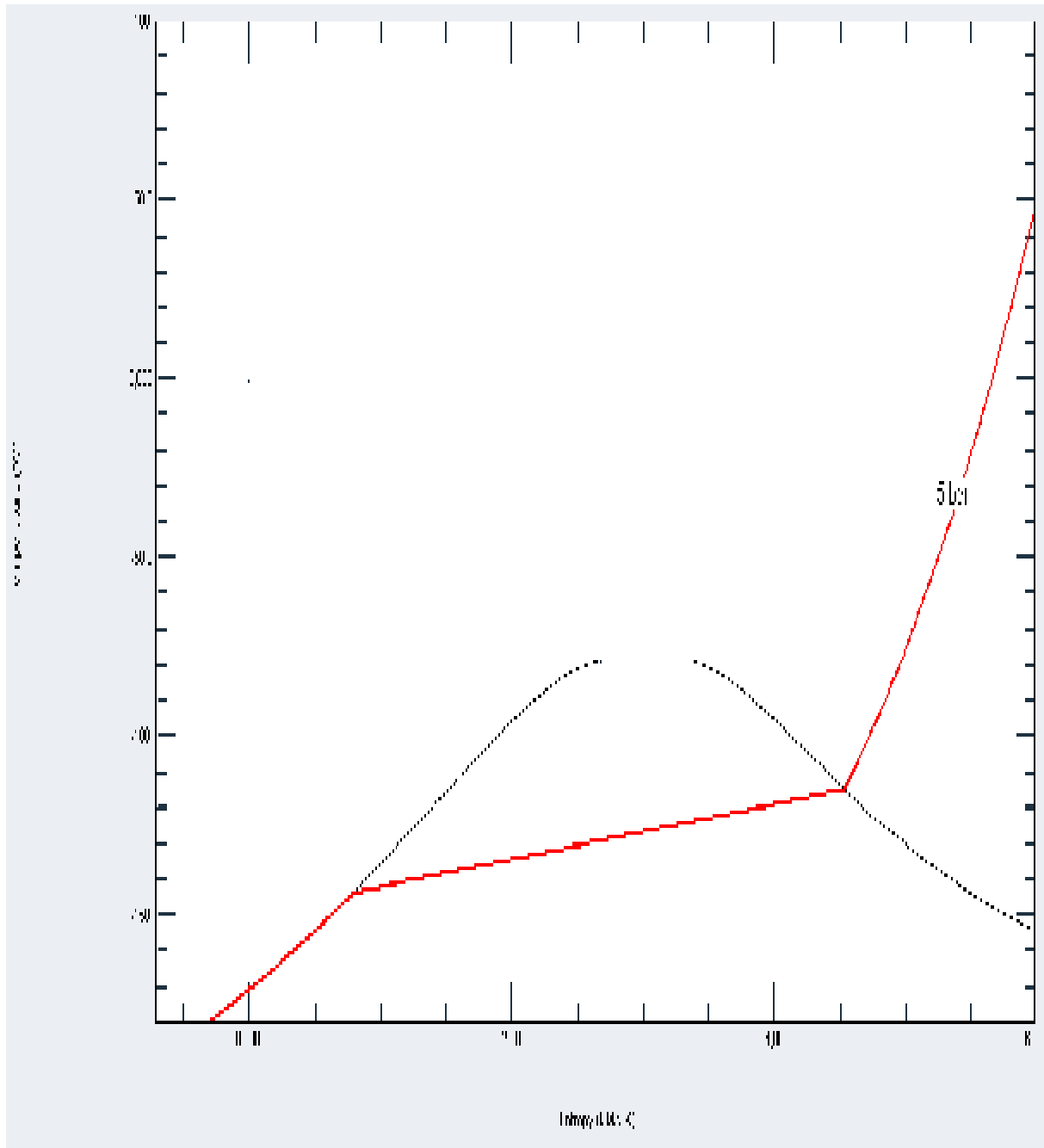


Figure IV.9: Diagramme (T, S) de la variante 02 sous une pression de 5 bars

D'après le logiciel Refprop le gaz atteint l'état liquide (liquéfaction) à la température de -143.54°C . A cet état la masse volumique de la phase liquide vaut 414.04 kg/m^3 et l'enthalpie 49.014 KJ/kg . L'enthalpie de la phase gazeuse vaut 561.91 KJ/kg , à la température -114.60°C .

IV.7.3.Variante 03 :

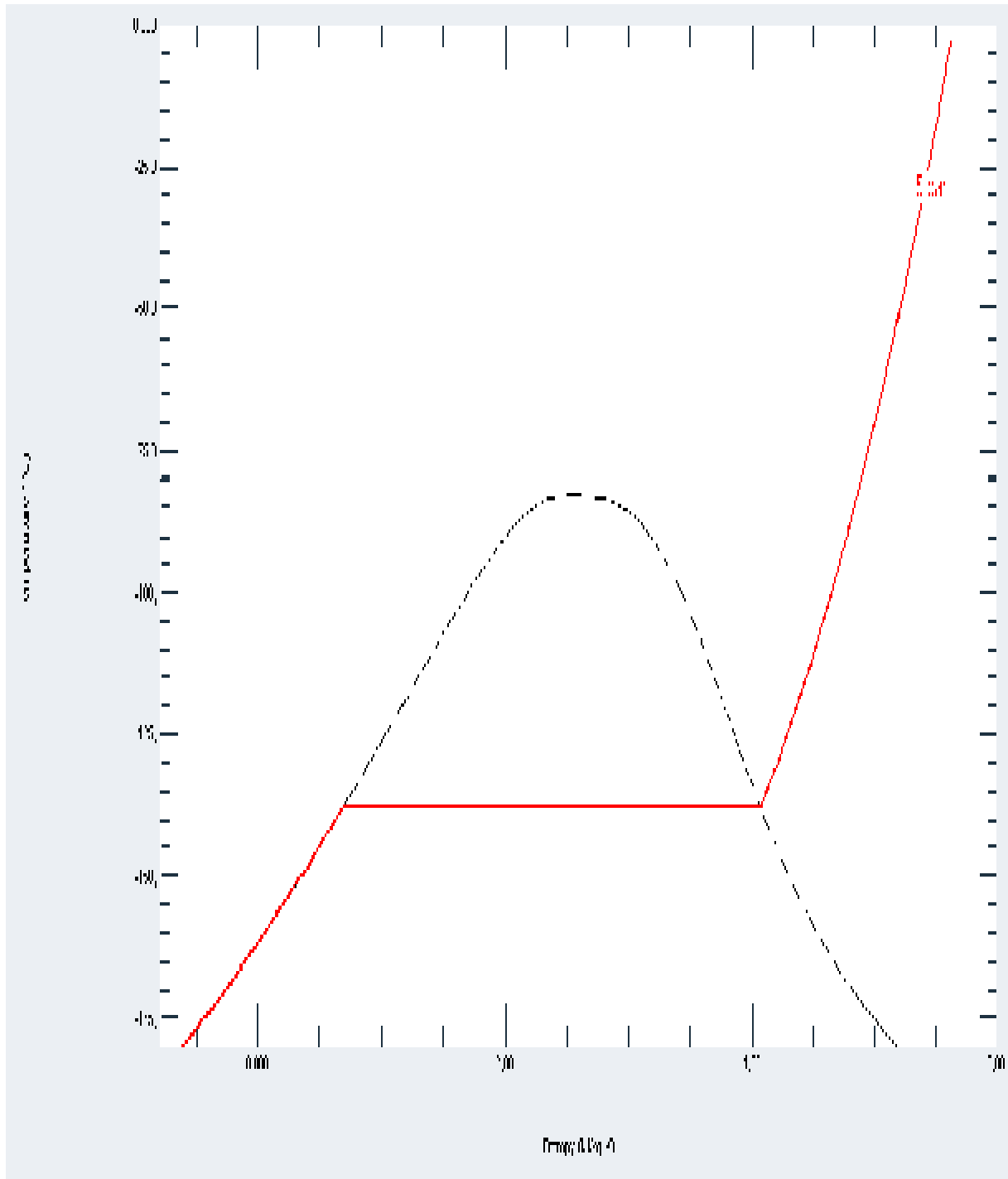


Figure IV.10 : Diagramme (T, S) de la variante 03 sous une pression de 5 bars

D'après le logiciel Refprop, le méthane atteint l'état liquide (liquéfaction) à la température de **-137.80°C**. A cet état la masse volumique de la phase liquide vaut **385.04 kg/m³** et l'enthalpie **85.539 KJ/kg**, l'enthalpie de la phase gazeuse vaut **543.79 KJ/kg**.

IV.8. Quantité de chaleur à extraire du gaz :

La quantité de chaleur à extraire du gaz pour sa liquéfaction par unité de kilogramme, est donnée par :

$$Q = (h_i - h_l) \quad (5)$$

Avec :

Q : La quantité de chaleur par kilogramme (kJ).

h_l : Enthalpie de la phase liquide à l'état final.

h_i : Enthalpie du gaz à l'état initial avant sa liquéfaction.

Aux conditions de distribution du gaz naturel correspondant à l'amont du poste de détente (pression absolue 5 bars et température 5°C), les enthalpies du gaz naturel à l'état initial avant sa liquéfaction (h_i) pour les trois variantes sont calculées par le logiciel Refprop. Elles sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Enthalpie du gaz à l'état initial pour les trois variantes.

Variantes	h_i (KJ/ kg)
Variante 1	805.62
Variante 2	812.21
Variante 3	861.33

Tableau IV.6 : Quantités de chaleur à extraire pour les trois variantes par unité de kilogramme.

Variantes	Q (KJ)
Variante 1	760.481
Variante 2	763.196
Variante 3	775.791

IV.9. Estimation du volume du réservoir :

Le volume du gaz refroidi est donné par la relation suivante:

$$V_l = \frac{m}{\rho_l} \quad (6)$$

Les volumes obtenus pour les différentes variantes sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Volume du gaz naturel à l'état liquide pour les trois variantes.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume de réservoir (m ³) variante 1	4.818	9.635	14.454	19.271	24.089	28.907	33.725
Volume de réservoir (m ³) variante 2	4.805	9.611	14.416	19.222	24.027	28.833	33.638
Volume de réservoir (m ³) variante 3	5.366	10.732	16.099	21.465	26.832	32.198	37.564

IV.10. Dimensionnement du réservoir :

Les réservoirs sont standards et normalisés [8]. Pour notre étude, on a opté pour un stockage aérien dont la forme du réservoir est cylindrique, horizontal, en acier en double enveloppe, répondant à la norme européenne NF EN 12285-2.

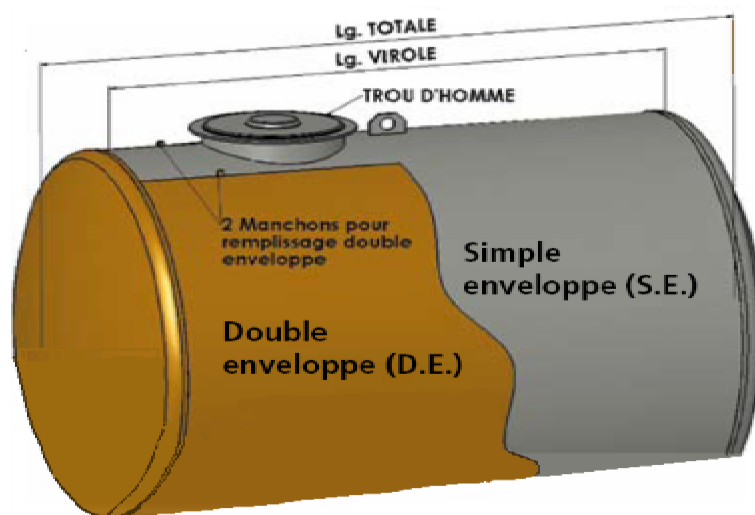


Figure IV.11 : vue de face du réservoir normalisé.

Les dimensions caractéristiques de ces réservoirs sont données par le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Les dimensions caractéristiques des réservoirs [8].

Capacité (l)	Ø nominal (mm)	Longueur totale (mm)	Longueur virole (mm)	Enveloppe	Poids (kg)	Ø Ext. D.E. (mm)	Ép. Tôles (mm)		Ép. Fond (mm)		Type T.H.
							S.E.	D.E.	S.E.	D.E.	
1 500	1 250	1580	1130	S.E.	385		5		5		B
				D.E.	590	1258	5	3	5	3	A
2 000	1 250	1990	1540	S.E.	450		5		5		B
				D.E.	690	1258	5	3	5	3	A
3 000	1 250	2720	2260	S.E.	560		5		5		B
				D.E.	880	1258	5	3	5	3	A
4 000	1 250	3530	3080	S.E.	695		5		5		B
				D.E.	1080	1258	5	3	5	3	A
5 000	1 500	3160	2600	S.E.	740		5		5		B
				D.E.	1220	1508	5	3	5	3	B
6 000	1 500	3740	3200	S.E.	870		5		5		B
				D.E.	1440	1508	5	3	5	3	B
8 000	1 900	3220	2540	S.E.	1110		6		6		C
				D.E.	1820	1908	6	3	6	3	C
10 000	1 900	3940	3260	S.E.	1310		6		6	3	C
				D.E.	2160	1908	6	3	6	3	C
12 000	1 900	4760	4075	S.E.	1585		6		6		C
				D.E.	2500	1908	6	3	6	3	C
15 000	1 900	5760	5080	S.E.	1900		6		6		C
				D.E.	2870	1908	6	3	6	3	C
20 000	2 500	4590	3650	S.E.	2140		6		6		C
				D.E.	3590	2512	6	4	6	5	C
25 000	2 500	5640	4800	S.E.	2470		6		6		C
				D.E.	4245	2512	6	4	6	5	C
30 000	2 500	6840	6000	S.E.	3920		6	4	6	5	C
				D.E.	4975	2512	6		6		C
40 000	2 500	8790	7950	S.E.	3690		6		6		C
				D.E.	6300	2512	6	4	6	5	C
40 000	3 000	6240	5100	S.E.	3760		6		7		C
				D.E.	6210	3012	7	4	7	5	C
50 000	3 000	7940	6800	S.E.	4670		7		7		C
				D.E.	7760	3012	7	4	7		C
60 000	3 000	9140	8000	S.E.	5590		7		7	5	C
				D.E.	9220	3012	7	4	7	5	C
80 000	3 000	12190	10800	S.E.	6955		7		7		C
				D.E.	11580	3012	7	4	7	5	C
100 000	3 000	14960	13900	S.E.	8600		7		7		C
				D.E.	14320	3012	7	4	7	5	C

Le matériau conseillé pour le réservoir de stockage réfrigéré est l'acier allié à 9% de nickel [9]. Ce type d'acier est utilisé dans le monde entier pour la construction de réservoirs GNL ainsi que les conduites s'y rapportant.

La composition métallurgique de ce matériau de base, ses caractéristiques chimiques et thermiques ainsi que ses propriétés mécaniques ne font que justifier son application dans les domaines susmentionnés. Même à des températures de -196°C , ses caractéristiques mécaniques restent excellentes. C'est une des raisons pour lesquelles ce matériel de soudage à haute teneur en nickel convient particulièrement au soudage d'acier Ni 9% et ce pour les raisons suivantes:

- Très bonnes valeurs de résilience à -196°C .
- Très grande résistance à la fragilisation.
- Dilatation thermique similaire au métal.

Pour le choix des réservoirs, On a opté pour ceux dont la capacité est tout juste supérieure à celles calculées précédemment pour les différents cas. Les capacités des réservoirs normalisés pour les trois variantes sont récapitulées dans les tableaux IV.9 à IV.11 :

Tableau IV.9: capacité des réservoirs normalisés pour la variante 1.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume calculé (m^3)	4.818	9.635	14.453	19.271	24.089	28.907	33.725
Volume du réservoir normalisé (m^3)	5	10	15	20	25	30	35

Tableau IV.10 : capacité des réservoirs normalisés pour la variante 2.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume calculé (m ³)	4.805	9.611	14.416	19.222	24.027	28.833	33.638
Volume du réservoir normalisé (m ³)	5	10	15	20	25	30	35

Tableau IV.11 : capacité des réservoirs normalisés pour la variante 3.

Jours	1	2	3	4	5	6	7
Volume calculé (m ³)	5.366	10.732	16.099	21.465	26.832	32.198	37.564
Volume du réservoir normalisé (m ³)	6	12	20	25	30	35	40

Les calculs montrent que pour la variante 3, c'est à dire le cas du méthane seul, les capacités des réservoirs sont plus importantes. Donc le fait de considérer le méthane seul est une approche conservative.

IV.11.Calcul de résistance des matériaux :

Dans ce paragraphe, on procède au calcul de vérification de résistances des matériaux d'un réservoir choisi sur le tableau IV.8. Pour le cas d'une autonomie d'une journée, les calculs et le tableau IV.8, donnent un réservoir dont les caractéristiques géométriques sont les suivantes :

- Ø Diamètre normal : 1500 mm
- Ø Longueur totale : 3740 mm
- Ø Longueur virole : 3200 mm
- Ø Poids : 1440 Kg

- Ø Diamètre extérieur : 1508 mm
- Ø Epaisseur tôles (D.E) : 3 mm
- Ø Epaisseur tôles (S.E) : 5 mm
- Ø Epaisseur fond bombé (D.E): 3 mm
- Ø Epaisseur fond bombé (S.E): 3 mm

Pour l'acier allié à 9 % de Nickel, la limite élastique et la résistance à la traction sont respectivement supérieures aux valeurs 430 MPa et 690 MPa.

R_e : la limite élastique ($R_e > 430 \text{ MPa}$)

R_T : la résistance à la traction ($R_T > 690 \text{ MPa}$)

IV.11.1. Contrainte transversale :

La contrainte transversale est donnée par [10] :

$$\sigma_T = \frac{F}{S} \quad (7)$$

$$\sigma_T = \frac{P \cdot D_i}{2e} \quad (8)$$

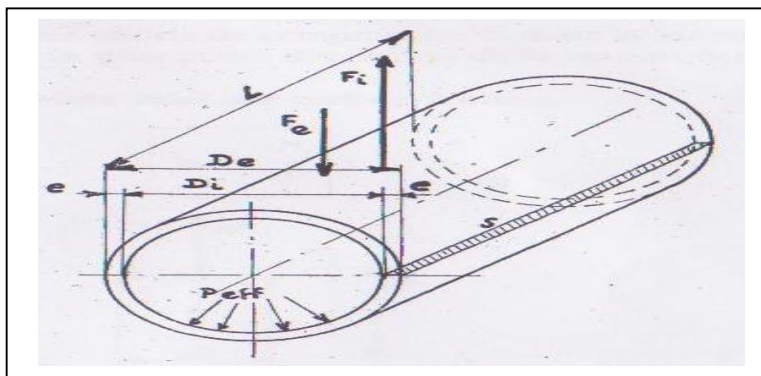


Figure IV .12: La contrainte transversale exercée sur le réservoir.

Où :

P : pression effective.

D_i : diamètre intérieur.

e : épaisseur de l'enveloppe.

Pour le cas du réservoir choisi sur le tableau IV.8, on trouve :

$$\sigma_T = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1500 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 125 \text{ MPa} < 430 \text{ MPa}$$

IV.11.2. Contrainte longitudinale :

La contrainte longitudinale est donnée par [10]:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_i}{4e} \quad (9)$$

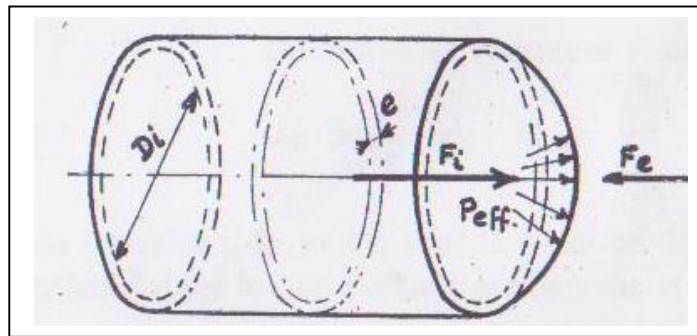


Figure IV.13 : schéma de la contrainte longitudinale exercée sur le réservoir.

Où :

$$\sigma_L = 62.5 \text{ Mpa} < 430 \text{ MPa}$$

On déduit donc, pour les conditions de service de notre réservoir, que les contraintes transversale et longitudinale sont très inférieures aux valeurs limites de la tenue mécanique du matériau. Donc notre réservoir est suffisamment résistant.

Une fois, la période d'autonomie désirée est fixée (choix de la capacité du réservoir), Il nous reste à dimensionner les autres systèmes de l'installation liées au réservoir à savoir le système de refroidissement et le vaporiseur. Nous représentons ci après le schéma de la solution préconisée.

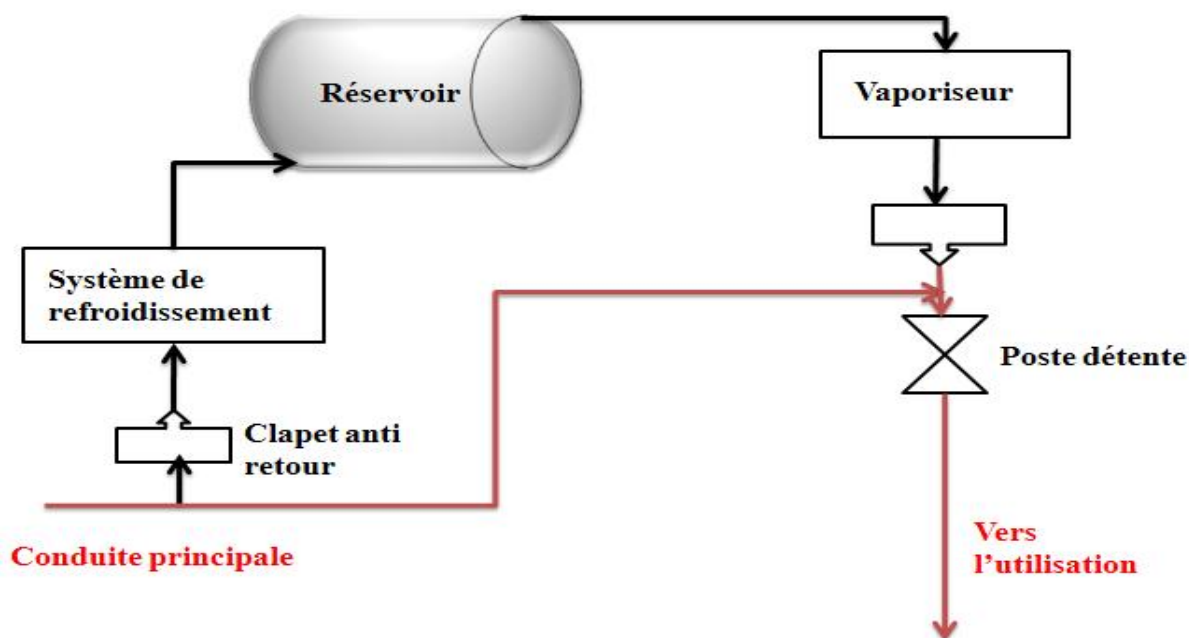


Figure IV.14 : Schéma de l'installation proposée.

Le système de refroidissement à concevoir doit évacuer une quantité de chaleur par unité de kilogramme de gaz de 775.79 KJ pour la variante 3 le cas plus défavorable.

Le vaporiseur doit apporter cette même quantité de chaleur pour le gaz naturel pour le porter à l'état gaz avant son entrée dans le poste de détente.

Le réservoir doit être muni d'un système de purge (figure IV.15) [11]. Ce dernier éliminera les impuretés et les eaux décantées au fond du réservoir.

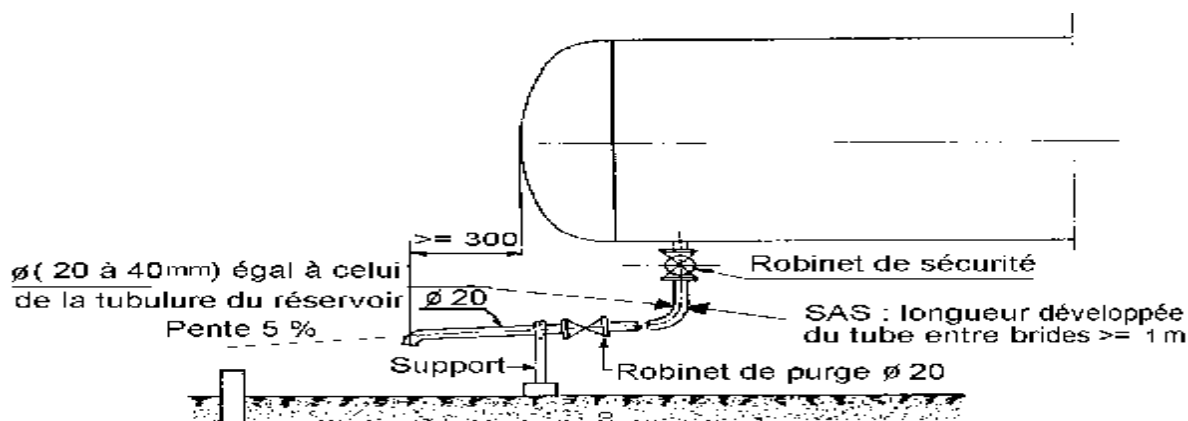


Figure IV.15 : Système de purge.

Deux clapets anti retour sont prévus et placés, respectivement entre le système de refroidissement et la conduite principale et entre le réservoir et le poste de détente [11].

IV.12. Système de sécurité :

Quelques règles de sécurité liées au réservoir doivent être respectées [11], afin d'éviter tous les risques liés au stockage du gaz naturel, tel que les explosions, les incendies...etc.

Ø Une clôture est à prévoir soit par un mur de béton ou bien par un grillage afin d'éviter tout contact des personnes (sauf les agents) avec les équipements du réservoir.

Ø Deux soupapes de sécurité (pression, dépression) sont à prévoir. Elles sont destinées à garantir la sécurité du réservoir contre les risques de surpression (Échauffement, incendie, sur emplissage), et de dépression.

Ø Un para foudre constitué d'un mât métallique avec piquet au sommet lié à la mise à la terre par un câble. Il est destiné à préserver le ballon contre les effets de la foudre.

Ø le réservoir doit être en liaisons équipotentielles et mis à la terre pour éliminer toutes charges électriques statiques pouvant provoquer des étincelles.

IV.12.1. Système d'isolation thermique :

La température de stockage du gaz naturel étant très basse et vu l'écart important entre celle-ci et la température ambiante, donc il existe un échange thermique entre le gaz et le milieu extérieur [11]. Afin d'éviter l'élévation de la température du gaz il faut concevoir un système d'isolation thermique en fonction du flux échangé.

Conclusion générale

Conclusion

Pour mener à bien notre travail, on a mené en premier lieu une étude bibliographique sur :

- les différents types de gaz naturel,
- les différentes techniques de stockage,
- les différents modes de transport du gaz naturel.

Etant donné que la composition chimique du gaz naturel diffère d'un site à un autre et vu l'indisponibilité des propriétés thermophysiques du gaz naturel de Hassi-R'Mel dans la littérature, on a considéré et étudié trois variantes à l'aide du logiciel Refprop.

Il ressort de cette étude que la variante 3 où on a considéré le gaz naturel comme un corps pur constitué seulement du méthane est la plus conservative. Les capacités des réservoirs obtenues en fonction du nombre de jours d'autonomie d'utilisation sont plus importantes avec la variante 3.

L'étude présentée dans ce mémoire a montré aussi que le stockage du gaz passe impérativement par un système cryogénique permettant son refroidissement à fin de le liquéfier.

Une esquisse du schéma de l'installation contenant le réservoir de stockage et les systèmes annexes a été présentée.

Les quantités de chaleur à extraire au gaz au niveau du système de refroidissement et à fournir au niveau du vaporisateur ont été évaluées.

Les systèmes de sécurité qui devront équiper le réservoir ont été présentés au paragraphe dimensionnement du chapitre 4.

En fin, nous dirons que les résultats présentés dans ce mémoire constitueront une base de travail pour l'étude de l'isolation thermique du réservoir et pour le calcul des fondations qui supporteront le réservoir.

Références bibliographiques

Bibliographie :

[1] : ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER (centre canadien pour l'environnement)

[2] : GENERALITES SUR LE TRANSPORT DU GAZ NATUREL

(Cours rédigé par Monsieur CAROUGE) TRAN.95.4.CARO.

[3] : Conférence des Nation Unies sur le Commerce et le Développement

Internet : www.unctad.org

[4] : ATG M .CHARRON traitement du gaz naturel 1999.

[5] : STOCKAGE DU PETROLE ET DU GAZ (wikipédia)

[6] : Guide Technique de la Distribution du Gaz (CODE 11PL2)

[7] : RESERVOIRS METHALLIQUES

(Par Régis CHAMAYOU Ex-Responsable des Études de la Société Entrepose-DB (EDB) et de la Société Nouvelle des Constructions Métalliques de Provence (SN-CMP) du groupe Chicago Bridge and Iron. Co (CBI)) (Technique de l'ingénieur).

[8] : Réservoirs cylindriques horizontaux en acier pour stockage des produits pétroliers

Internet: www.bieber.fr

[9]: UTP **Schweissmaterial GmbH**

Elsässer Strasse 10

D-79189 Bad Krozingen

Allemagne

Tél: +49 7633 409 01 (24-h-Serviceline)

Fax: +49 7633 409 222

E-mail: info@utp.de

Internet: www.utp.de

Member of the BÖHLER-UDDEHOLM Group

[10] : Formulaire de mécanique Saint MARTIN technique Vulgarisation (1962).

[11] : Guide Technique de la Distribution du Gaz (CODE GPL 1)