



جامعة وهران للعلوم والتكنولوجيا محمد بوضياف



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed BOUDIAF »
Faculté de Chimie – Département de Génie Chimique

Stockage et Transport des Hydrocarbures :

Cours et applications



Présenté par :

Dr. SEKRANE Fatima

« 2023 »

AVANT - PROPOS

Ce polycopié est destiné comme un cours de support pédagogique aux étudiants de deuxième année master génie pétrochimique. Il présente les éléments fondamentaux du stockage et transport des hydrocarbures aux étudiants non-initiés avec cette discipline.

L'ouvrage présente un aide mémoire couvrant les chapitres du programme officiel, et laissant à l'auditeur l'occasion de se concentrer sur les notions de base.

Le chapitre **I** porte essentiellement sur le stockage des hydrocarbures, la classification des réservoirs de stockage, ainsi que les équipements de la structure des bacs. Le chapitre **II** est consacré aux différents types d'isolation dans les réservoirs de stockage chauds et en cryogénie. En fin le chapitre **III** aborde les différents modes de transport des hydrocarbures (Pipeline, navires pétroliers, voie routière, voie ferroviaire).

A la fin de chaque chapitre, des exercices sont proposés avec des réponses permettant de tester les connaissances des étudiants et de se préparer aux examens.

L'enseignant se trouvera libéré de la nécessité d'écrire au tableau la majorité de ce qu'il prononce, il aura alors l'occasion de se concentrer sur l'aspect physique et conceptuel.

Les intérêts pédagogiques, scientifiques et relationnels seront parmi les retombées immédiates de cette approche. Notant que la disponibilité du document ne doit décourager l'étudiant à assister au cours orale.

Table des matières

Chapitre I : STOCKAGE DES HYDROCARBURES

I.1 INTRODUCTION	1
I.2 STOCKAGE DU PETROLE BRUT	1
I.2.1 Définition du Parc de stockage	2
I.3 STOCKAGE DE GAZ	2
I.3.1 Stockage de GNL	2
I.4 CLASSIFICATION DES RESERVOIRS	3
I.4.1 En fonction de la pression	3
I.4.2 En fonction de la température	4
<i>a) Réservoirs à température ambiante</i>	4
<i>b) Réservoirs à basse température</i>	4
<i>c) Réservoirs à température Cryogénique</i>	5
<i>d) Réservoirs à haute température</i>	5
I.4.3 Classification par configuration	5
<i>a) Réservoirs cylindriques verticaux</i>	6
<i>b) Réservoirs cylindriques horizontaux</i>	7
<i>c) Réservoirs sphériques</i>	7
I.5 CLASSIFICATION DES BACS CYLINDRIQUES VERTICAUX	8
I.5.1 Les réservoirs à toit fixe	8
I.5.2 Les réservoirs à toit flottant	9
I.6 EQUIPEMENTS DE LA STRUCTURE DES BACS	10
I.7 ACCESSOIRES DES BACS	11
I.7.1 Accessoires d'accès	11
I.7.2 Accessoires de contrôle	12
I.7.3 Accessoires de lutte contre la surpression	13
I.7.4 Accessoires de sécurité	14
I.7.5 Accessoires de protection contre la corrosion	16
I.8 EXERCICES D'APPLICATION	17

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RESERVOIRS DE STOCKAGE

D'HYDROCARBURES

II.1 INTRODUCTION	20
II.2 PERTE D'ÉNERGIE DES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE CHAUDS	21
II.3 AUTRES AVANTAGES D'ISOLATION DES BASES DE RÉSERVOIR	22
II.4 DÉLAI DE RENTABILISATION ET RENDEMENTS ANNUELS	24
II.5 ISOLATION EN CRYOGÉNIE	24
II.5.1 Critères physiques	24
<i>II.5.1.1 Le coefficient de conductivité thermique</i>	24
<i>II.5.1.2 La masse volumique</i>	25
<i>II.5.1.3 Imperméabilité à la vapeur d'eau</i>	25
<i>II.5.1.4 Vieillessement</i>	26
<i>II.5.1.5 La chaleur spécifique</i>	26
II.5.2 Critères mécaniques	26
<i>II.5.2.1 La contraction thermique</i>	26
<i>II.5.2.2 La résistance mécanique</i>	27
<i>II.5.2.3 Les essais de traction</i>	27
<i>II.5.2.4 La tenue aux chocs</i>	28
II.5.3 Critères de sécurité	28
II.5.4 Critères de mise en œuvre	28
II.5.5 Critères économiques	28
II.5.6 Les différents types d'isolations	28
<i>II.5.6.1 Les mousses</i>	28
<i>II.5.6.2 Les poudres</i>	29
<i>II.5.6.3 La perlite</i>	29
<i>II.5.6.4 Les fibres</i>	29
<i>II.5.6.5 La Superisolation</i>	30
<i>II.5.6.6 L'isolation par le vide</i>	30
II.5.7 Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolation	31
II.6 EXERCICES D'APPLICATION	33

Chapitre III : TRANSPORT DES HYDROCARBURES

III.1 INTRODUCTION	36
III.2 TRANSPORT PAR PIPELINE	36
III.2.1 Caractéristiques du transport par pipeline	38
<i>A. Le diamètre</i>	38
<i>B. Le type d'acier utilisé</i>	38
<i>C. Le mode de pose</i>	38
<i>D. Les installations de surface</i>	39
<i>E. La capacité maximale de transport</i>	39
<i>F. La pression de service</i>	40
III.3 TRANSPORT PAR NAVIRES PÉTROLIÈRS	40
III.3.1 Les risques associés au transport pétrolier maritime	41
III.4 TRANSPORT PAR VOIE ROUTIÈRE	42
III.4.1 Les codes de danger de la signalisation de transport par camion-citerne des hydrocarbures.	42
<i>III.4.1.1 La plaque de danger</i>	43
<i>III.4.1.2 Signalisation des camions</i>	45
III.5 TRANSPORT PAR VOIE FERROVIAIRE	46
III.5.1 Avantages du transport par train comparé au transport par camion	47
III.5.2 Inconvénients du transport par train comparé au transport par camion	48
III.6 EXERCICES D'APPLICATION	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51

I.1 INTRODUCTION

L'industrie pétrolière a pour principale caractéristique la mise en œuvre de tonnages très importants d'hydrocarbure sous forme liquide ou gazeuse, elle se trouve donc dans l'obligation de prévoir d'énormes capacités de stockage.

Le stockage des hydrocarbures consiste à immobiliser temporairement certains volumes de fluides (pétrole ou de gaz) dans des capacités de stockage appelées appareils à pression ou réservoirs ou bacs selon que le produit stocké, est ou n'est pas, sous pression. Il a pour but :

- La mise du produit au repos suivie d'une opération de décantation avant l'expédition (élimination de l'eau et résidus) et l'élimination naturelle des gaz indésirables ;
- Le contrôle de la qualité du produit à expédier ;
- Le traitement préalable du brut afin de minimiser les problèmes d'incendie ou de corrosions des bacs et des canalisations car ces installations sont très coûteuses ;
- La continuité de la production et de l'exploitation tout en assurant un stockage permanent.

Divers types et quantités de produits pétroliers sont entreposés dans des réservoirs de stockage hors-sol et souterrains. Ces réservoirs sont de différentes tailles et de différentes formes et peuvent être construits avec une ou deux parois à partir de différents matériaux tels que l'acier, le béton ou la fibre de verre.

Le type de réservoir de stockage utilisé pour le produit spécifié est principalement déterminé par les exigences de sécurité et d'environnement. Le coût de fonctionnement et la rentabilité sont les principaux facteurs dans la sélection du type de réservoir de stockage.

I.2 STOCKAGE DU PETROLE BRUT

Les réservoirs de stockage sont nécessaires à l'exploitation des champs pétroliers pour que la production ne soit pas interrompue suite à des arrêts du cheminement de pétrole brut vers les bacs de stockages des terminaux qui se trouvent sur les côtes ou près des unités de transformation de ces hydrocarbures.

Le parc de stockage est une zone généralement de grande surface où se situe un ensemble de bacs de stockage. Ils peuvent être de différentes ou de même capacité. Ils sont bien connectés à une canalisation d'entrée et une autre de sortie et éventuellement connectés entre eux.

Nous pouvons diviser le groupe des bacs en trois, en fonction de leurs états :

- Premier groupe en phase de remplissage.
- Deuxième groupe en phase de décantation.
- Troisième groupe en phase de vidange

Le choix de la capacité d'un parc de stockage est fait en fonction du débit véhicules et des capacités des moyens de transport.

I.3 STOCKAGE DE GAZ

Un gazomètre est un réservoir servant à stocker le gaz de ville, le gaz naturel ou bien le biogaz à température ambiante et à une pression proche de la pression atmosphérique. Le volume du réservoir varie selon la quantité de gaz qu'il contient, la pression étant assurée par une cloche mobile verticalement. Les plus grands gazomètres ont des capacités allant jusqu'à 350 000 m³, pour des structures atteignant plus de 60 mètres de diamètre.

I.3.1 Stockage du gaz naturel liquéfié (GNL)

Le but de l'unité de stockage et expédition est d'assurer le bon stockage de GNL produit par le train de liquéfaction dans les bacs de stockages. En moyenne, un GNL a une masse volumique de l'ordre de 480 kg/m³ et un pouvoir calorifique de 25 GJ.

La grande volatilité représente un danger potentiel très important. La conception des réservoirs et de leur environnement est donc dominée par le problème de la sécurité. Celui-ci s'analyse en plusieurs aspects :

- ❖ La sécurité passive : consiste à concevoir le réservoir de stockage de manière à minimiser la probabilité des incidents et leurs conséquences. Ces incidents peuvent être de nature interne ou externe.
 - **Interne** : risque de fuite, de choc thermique, de surpression, d'évaporation anormale et brutale, ...etc.. ;
 - **Externe** : incendie à l'extérieur du réservoir, séisme, chute d'objets volants, sabotage par arme à distance, sabotage par charge portative.

- ❖ La sécurité active : consiste à disposer de moyens de lutte contre les conséquences incidentes : cuvettes de rétention en cas de fuite, dispositifs de lutte contre l'incendie, etc...

I.4 CLASSIFICATION DES RESERVOIRS

I.4.1 En fonction de la pression

Tout réservoir supporte d'une part, la pression hydrostatique créée par le liquide contenu et d'autre part, la pression de la phase gazeuse surmontant le liquide.

Les produits pétroliers sont classés en quatre groupes suivant leur pression de vapeur. A chaque classe ou groupe correspond des types particuliers de réservoirs qui se différencient essentiellement par la pression de service.

La pression supportée par le réservoir est la somme de la pression hydrostatique créée par le liquide et la pression de vapeur.

Le tableau (I.1) représente les classifications des produits stockés en fonction de la pression et les types de réservoirs appropriés.

Tableau I.1 : Classifications des produits stockés en fonction de la pression et les types de réservoirs appropriés.

CLASSEMENT DES PRODUITS STOCKES			TYPE DE RESERVOIRS CORRESPONDANT
N°de classe	Tension de vapeur aux températures de stockage	Exemple de produits	
1	π toujours $> 1 \text{ kg/cm}^2$	Propane	Réservoirs cylindriques à fonds hémisphériques
2	π parfois légèrement $< 1 \text{ kg/cm}^2$	Butane	Sphères, cylindres
3	π toujours $< 1 \text{ kg/cm}^2$ mais non négligeable	Pétrole brut Carburant – auto, etc	a/Réservoirs à phase gazeuse nulle ou très réduite : à toit flottant. b/Réservoirs dits « à haute pression » nommés : G3 . c/Réservoirs dits « à moyenne pression » nommés : G2 .
4	π négligeable	Pétrole lampant Gasoil Huiles de graissage Fuels Asphaltes, etc.	Réservoirs dits « à basse pression » nommés : G1 .

I.4.2 En fonction de la température

a) Réservoirs à température ambiante

La température ambiante varie selon le lieu et la saison. Les réservoirs de stockage dont la température de calcul du métal est égale ou supérieure à 5°C mais ne dépasse pas 93°C sont considérés comme étant des réservoirs à température ambiante.

b) Réservoirs à basse température

Les réservoirs de stockage dont la température de calcul du métal est égale ou inférieure à $4,4^\circ\text{C}$ mais supérieures à (-51°C) sont classés comme réservoirs à basse température.

Les réservoirs de ces catégories sont utilisés pour le stockage de l'ammoniac réfrigéré, du propane réfrigéré, du butane réfrigéré, etc.

c) Réservoirs à température Cryogénique

Les réservoirs de cette catégorie dont la température de calcul se situe entre (-51°C) et (-168°C) sont utilisés pour le stockage de l'éthane, de l'éthylène ou de GNL.

Autres réservoirs de ce type dont la température de calcul est inférieure à (-168°C) sont employés pour le stockage de l'oxygène, de l'argon, de l'azote, de l'hydrogène ou de l'hélium liquéfiés.

d) Réservoirs à haute température

Les réservoirs dont la température de calcul dépasse 93°C sont placés dans la catégorie des réservoirs à haute température.

Les réservoirs de cette catégorie sont utilisés pour le stockage du bitume, du soufre fondu, etc.

I.4.3 Classification par configuration

Pour répondre à la grande variété des produits liquides industriels à stocker, les constructeurs ont recours à des réservoirs de formes diverses et de conceptions différentes, étudiés pour s'adapter le plus rationnellement et le plus économiquement possible aux caractéristiques du produit à traiter.

La configuration d'un réservoir dépend de deux impératifs essentiels qui sont :

- La conservation du produit en limitant ou en interdisant les évaporations ;
- La tenue de la structure à la pression interne développée par le produit ou maintenue à un certain niveau pour faciliter l'exploitation.

La forme cylindrique est la plus courante en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa bonne résistance à la pression interne. Lorsque la pression interne est importante, on a recours à des formes sphériques mieux adaptées que les cylindres et qui permettent de réduire les épaisseurs de paroi.

a) *Réservoirs cylindriques verticaux*

Appelés communément réservoirs, ils reposent directement sur le sol ou sur une fondation par l'intermédiaire d'un fond plat. Ils sont habituellement équipés soit d'un toit fixe conique ou sphérique, soit d'un toit flottant qui repose sur le liquide et coulisse dans le piston formé par la robe du réservoir (Figure I.1).

Lorsque ces réservoirs doivent supporter une légère pression, leur toit est généralement de forme sphérique et leur fond en périphérie peut être ancré sur une fondation circulaire en béton. Pour éviter ces ancrages et la fondation qu'ils impliquent, le fond plat peut être remplacé par un fond sphérique concave qui équilibre les effets de la pression sur le toit.



Figure I.1 : Bacs de stockage cylindriques verticaux

Les réservoirs cylindriques verticaux sont plus utilisés dans les cas où une consommation plus élevée et des stocks opérationnels plus importants sont utilisés. Ces derniers supportent des fluides de plus grande densité, et par conséquent, un poids spécifique plus important.

b) Réservoirs cylindriques horizontaux

Souvent, ils sont installés au-dessus du sol sur des berceaux supports. Leurs extrémités sont terminées par des fonds emboutis hémisphériques ou elliptiques. Ces récipients sont destinés aux stockages sous forte pression, mais leur emploi est limité en général à de faibles capacités (Figure I.2).



Figure I.2 : Bacs de stockage cylindriques horizontaux

Les réservoirs horizontaux sont principalement utilisés dans les cas où la consommation de fluide est faible et où le poids spécifique du fluide en question est faible.

c) Réservoirs sphériques

Appelés aussi sphère, ils sont généralement supportés par des poteaux disposés au niveau de l'équateur ou, quelquefois, par une jupe métallique ou un massif de béton placé sous l'hémisphère inférieur (Figure I.3).

Les réservoirs sphériques résistent à des pressions extrêmes et sont principalement utilisés pour le stockage de GPL ou de GN sous haute pression.



Figure I.3 : Bacs de stockage sphériques ou sphères

I.5 CLASSIFICATION DES BACS CYLINDRIQUES VERTICAUX

Ces bacs utilisés sont classés selon trois critères : la nature du toit du réservoir, la nature du produit stocké et les capacités des réservoirs.

I.5.1 Les réservoirs à toit fixe

Sont pourvus d'un toit fixe et permettent donc une meilleure conservation des produits peu volatils, dangereux ou polluants. Ce toit permet d'empêcher leur contamination par des agents extérieurs (pluie, poussières, ...).

On classe les réservoirs à toit fixe en deux catégories :

- **Réservoirs à toit supporté** : Ces toits sont constitués d'une charpente soutenue par un ou plusieurs poteaux (pour des diamètres supérieurs à 25 mètres) qui s'appuient sur le fond du réservoir (Figure I.4) ;
- **Réservoirs à toit autoportant** : sont soit coniques soit sphériques (Figure I.5).

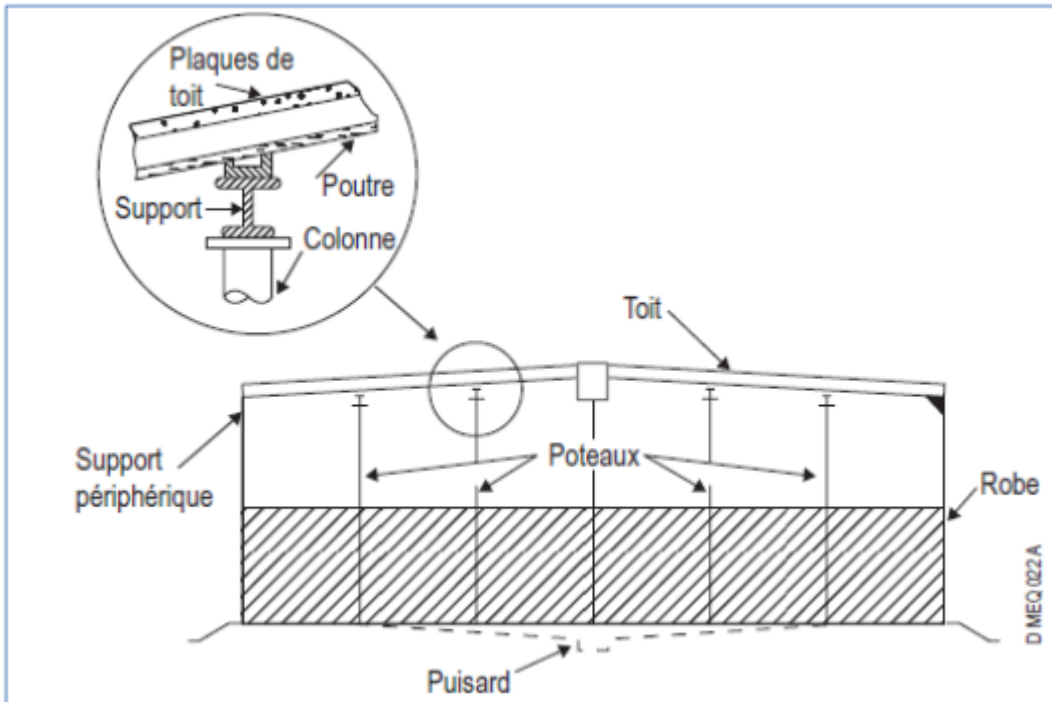


Figure I.4 : Réservoir à toit conique supporté.

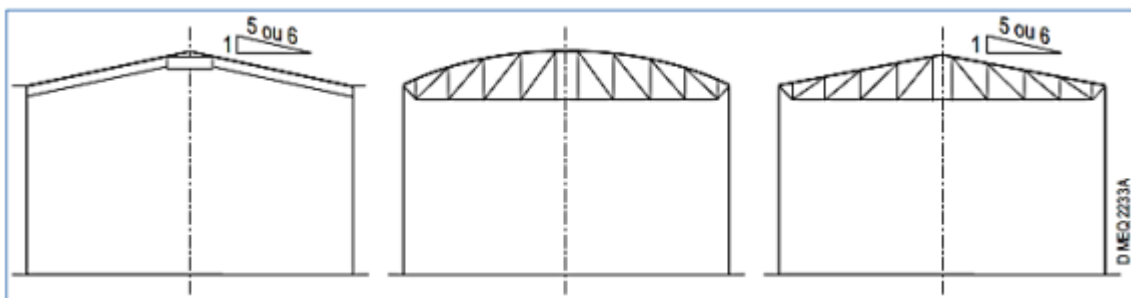


Figure I.5 : Réservoir à toits fixes autoportants

I.5.2 Les réservoirs à toit flottant

Comprennent une structure flottante qui se déplace suivant les mouvements de descente et de montée du produit soit dans un bac ouvert soit dans un bac à toit fixe. Ces réservoirs, en raison de leur remarquable capacité à réduire les pertes par évaporation sont réservés aux produits volatils (Figure I.6). La capacité de ces réservoirs peut être très importante (plus de 35 000 m³).

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant :

- **Bacs à toit flottant externe** : Dont le toit est installé à l'air libre dans des bacs ouverts. La face inférieure du toit est complètement mouillée par le liquide sur lequel le toit flotte. Pratiquement aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet de réduire considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie.
- **Bacs à toit flottant interne** : Ce sont des bacs à toit fixe dans lesquels est installé un toit flottant simplifié également appelé écran flottant.

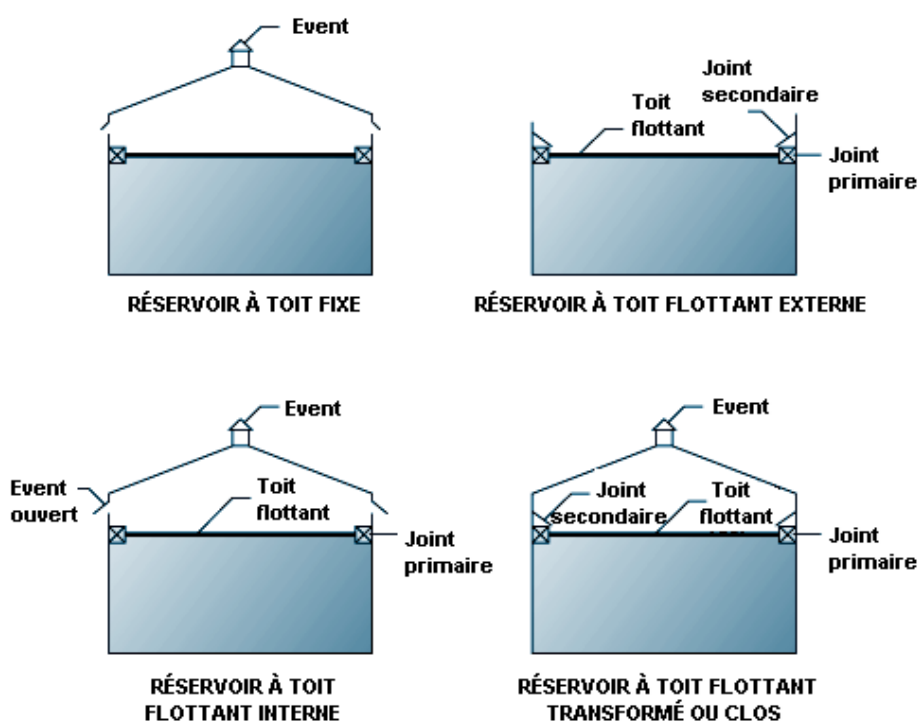


Figure I.6 : Réservoirs de stockage cylindriques verticaux (nature du toit)

I.6 EQUIPEMENTS DE LA STRUCTURE DES BACS

La robe : c'est une paroi verticale constituée de tôles cintrées au diamètre du réservoir.

La virole : c'est un anneau constitué de tôles dont la succession donne la robe.

La cuvette : c'est un compartiment construit autour d'un bac ou d'un ensemble de bacs destiné à recevoir le contenu du bac ou de l'ensemble de bacs en cas de fuite accidentelle.

Le fond : c'est la base du réservoir, il est fait également d'un ensemble de tôles.

L'assise : c'est la fondation sur laquelle repose le réservoir.

Le toit : c'est la partie supérieure du réservoir, il est fait d'un assemblage de tôles et peut être fixe ou flottant.

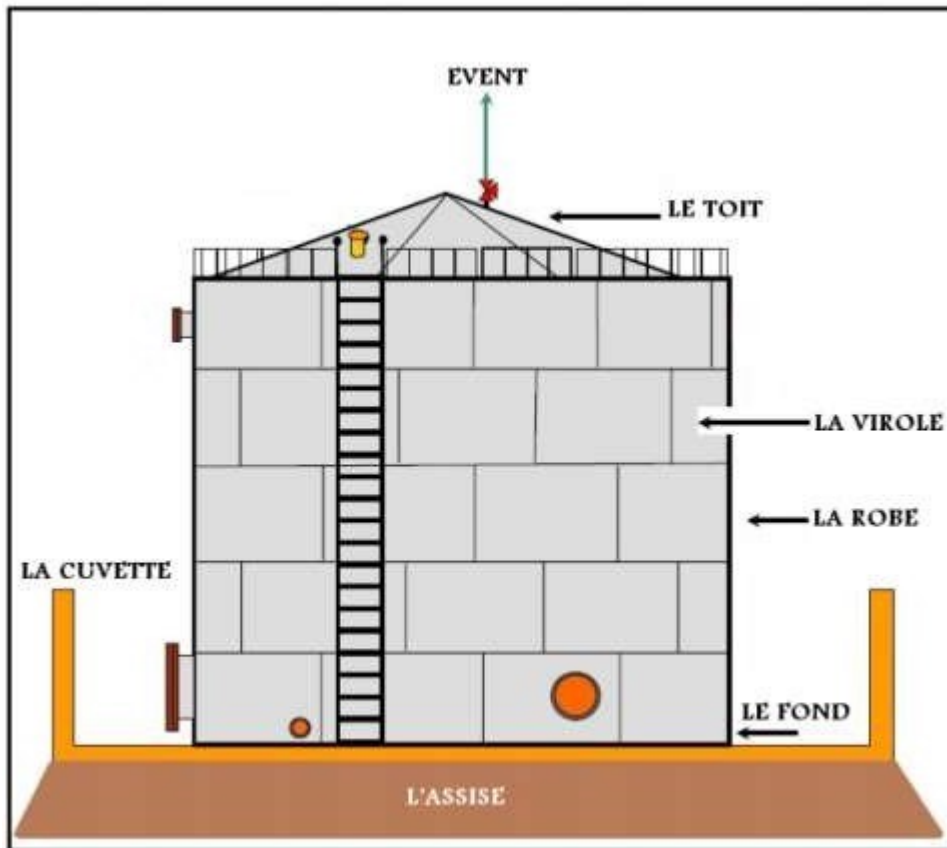


Figure I.7 : Equipements de la structure des bacs.

I.7 ACCESSOIRES DES BACS

I.7.1 Accessoires d'accès

- ❖ **Les escaliers** : de forme hélicoïdale ou verticale, destinés aux opérations de vérification, de contrôle, de réparation et de nettoyage.
- ❖ **L'échelle basculante** : celle-ci change de position lorsqu'un toit se déplace pour un toit flottant.
- ❖ **Les trous d'homme** : ceux-ci permettent l'accès à l'intérieur du réservoir des agents d'entretien, de nettoyage et de réparation. Il existe deux types d'accès :
 - Accès au réservoir à partir du toit ;
 - Accès à partir de la robe du réservoir.

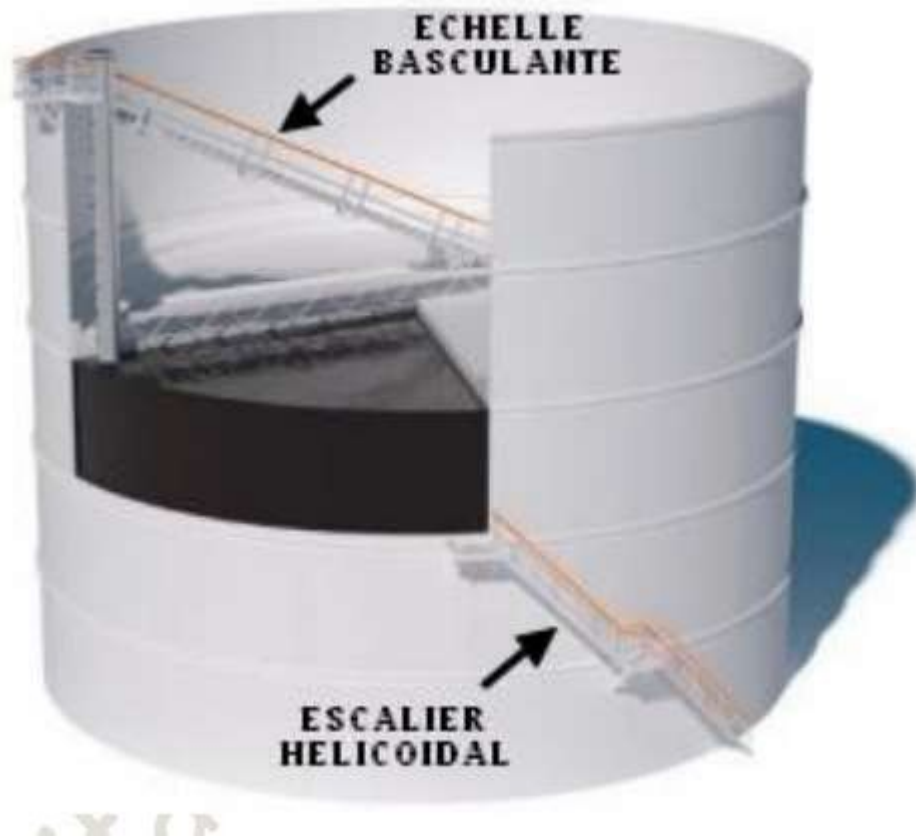


Figure I.8 : Accessoires d'accès des bacs.

I.7.2 Accessoires de contrôle

- ❖ **Le manomètre** : Le manomètre d'indication de pression permet de contrôler la pression à l'intérieur du bac pour maintenir la pression d'épreuve constante.
- ❖ **Le dispositif de prise d'échantillon** : Celui-ci sert à prendre des échantillons pour évaluer la qualité du produit et relever la température.
- ❖ **Le dispositif de purge** : Il sert à évacuer les impuretés qui se trouvent mélangées avec le produit au fond du réservoir. Le liquide drainé sera acheminé dans les réseaux d'huiles, puis vers un séparateur.
- ❖ **L'indicateur de niveau** : Celui-ci permet de relever le niveau du liquide dans le réservoir et au comptage du volume du produit au remplissage et ou à la vidange de celui-ci. La détermination du niveau du produit dans le réservoir se fait avec les indicateurs de niveau à flotteur qui suit le niveau du liquide. Dans le cas où il n'y aurait pas de flotteur, on détermine le niveau du produit à l'aide d'une jauge manuelle.

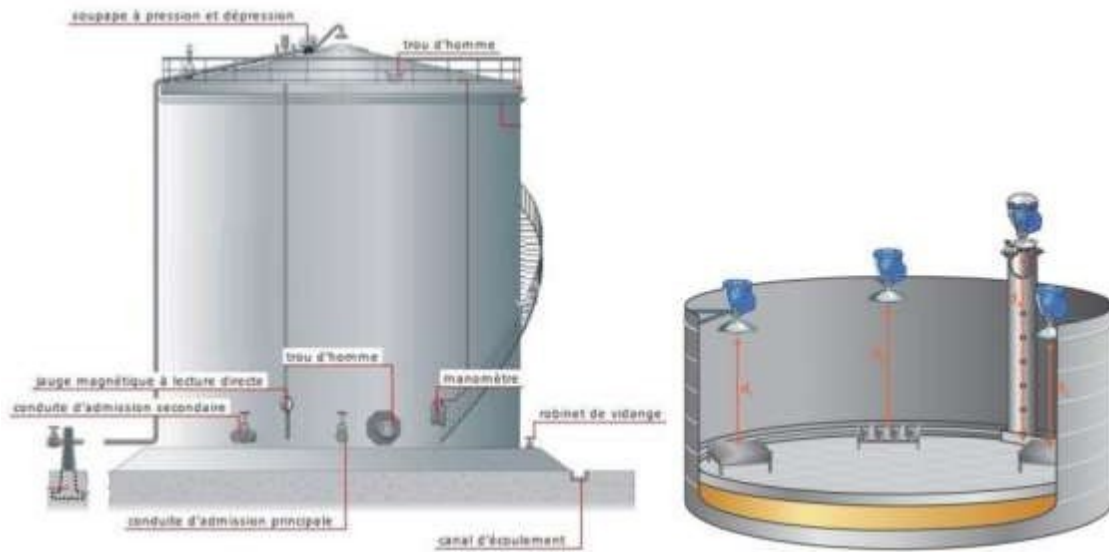


Figure I.9 : Accessoires de contrôle des bacs.

I.7.3 Accessoires de lutte contre la surpression

- ❖ **Les événements** : ce sont des ouvertures permanentes situées dans la partie supérieure des réservoirs destinés à évacuer l'excédent de vapeurs d'hydrocarbures par temps chauds.
- ❖ **Les soupapes** : ce sont des dispositifs automatiques qui laissent s'échapper l'excédent de vapeur une fois que la pression de la phase gazeuse à l'intérieur du réservoir atteint une valeur limite ou critique. Cette pression est appelée pression de tarage.



Figure I.10 : Les événements de bac

I.7.4 Accessoires de sécurité

- ❖ **Les vannes de sécurité** : Elles sont destinées à protéger le réservoir contre les surpressions et les dépressions. Elles sont au nombre de deux (02). La vanne de sécurité pour la zone annulaire se trouve entre le toit (flottant), la robe et la vanne de décharge automatique.
- ❖ **Les dispositifs d'alarme NH et NB** : Ceux-ci émettent un signal sonore dès que le produit atteint son niveau haut (NH) et son niveau bas (NB) .

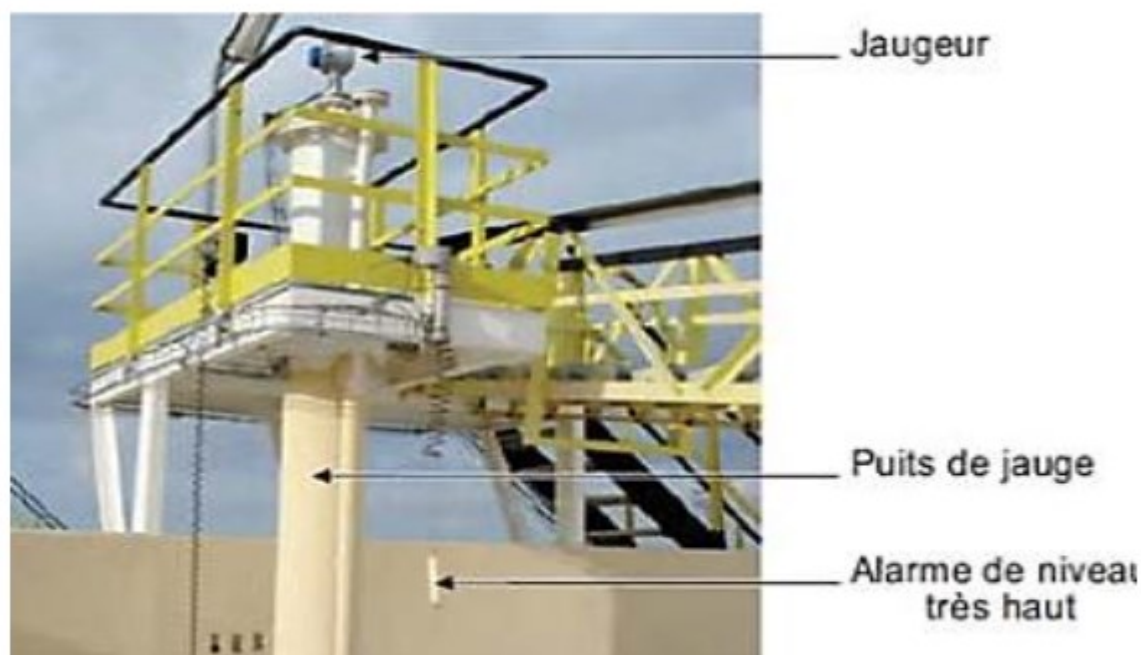


Figure I. 11 : Alarme indépendante de niveau très haut sur un bac à toit flottant

- ❖ **La cuvette de rétention** : Elle est destinée à recevoir le 75% du contenu réservoir en cas des fuites (Figure I.12). Les cuvettes qui contiennent plusieurs réservoirs, doivent être divisées en compartiments dont le nombre est déterminé en fonction de la capacité totale des réservoirs.



Figure I.12 : Cuvette de rétention

- ❖ *Le réseau d'incendie* : Celui-ci est équipé par des conduites d'eau et de mousse refoulée sous pression par un système de pompes.

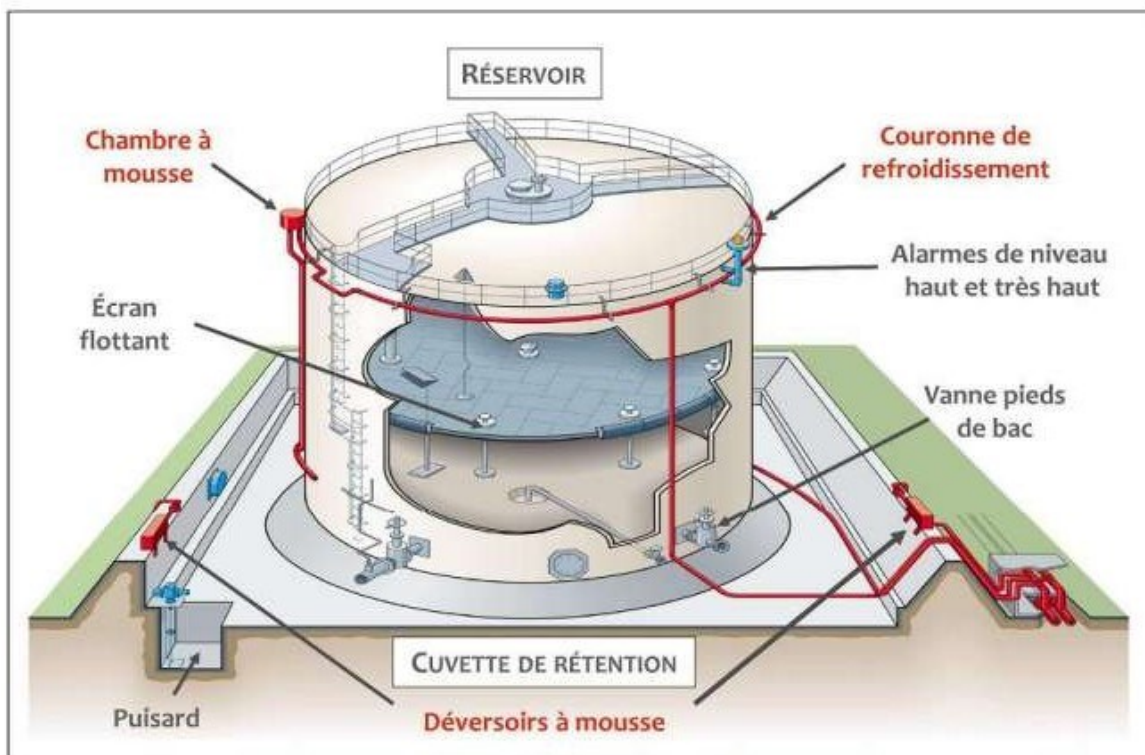


Figure I.13 : Accessoires de sécurité de lutte contre l'incendie.

- ❖ **La couronne de mousse** : extincteur de feux d'hydrocarbure, il existe des diffuseurs placés en haut de robe étalent sur la surface du liquide un tapis de mousse capable d'étouffer les flammes en cas d'incendie. Pour assurer une couverture rapide et uniforme repartir judicieusement plusieurs diffuseurs installés sur le tour de réservoir, et diffuseurs placés autour de la cuvette de rétention en cas d'incendie dans la cuvette de rétention (Figure I.14).



Figure I .14 : Les couronnes de mousse

I.7.5 Accessoires de protection contre la corrosion

La protection passive du réservoir se fait par application d'une couche de peinture accompagnée d'une protection cathodique par anode (Figure I.15). La protection extérieure du réservoir est obtenue par soutirage du courant.

La surface intérieure du fond du réservoir n'est pas protégée par cathode, mais on prévoit une couche de résine époxy contre la corrosion interne due à la composition chimique du produit stocké telle que la teneur en sels et sulfures.

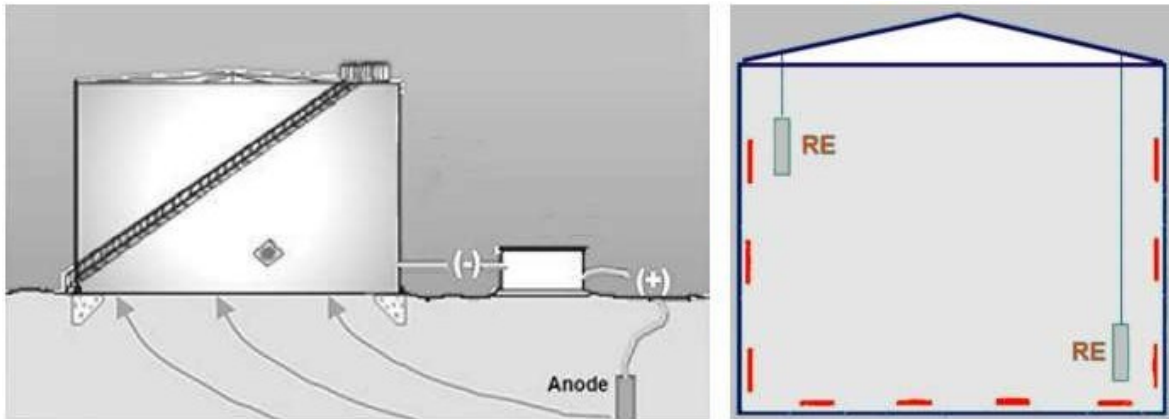


Figure I.15 : Protection des bacs contre la corrosion.

I.8 EXERCICES D'APPLICATION

Exercice 1 : Crocher la / ou / les bonnes réponses :

- 1. Les produits pétroliers sont classés selon leur pression de vapeur en :**
 - a) Deux groupes
 - b) Trois groupes
 - c) Quatre groupes.
- 2. Le stockage cryogénique se fait à température :**
 - a) Supérieure à (-51°C)
 - b) Entre (-51°C) et (-168°C)
 - c) Inférieure à (-168°C)
- 3. Les Bacs cylindriques verticaux sont classés selon :**
 - a) La nature du toit de réservoir
 - b) La nature du produit stocké
 - c) Les capacités des réservoirs

Réponses

1. (c)
2. (b) et (c)
3. (a), (b) et (c).

Chapitre I : STOCKAGE DES HYDROCARBURES

Exercice 2

Un produit pétrolier a une tension de vapeur $P^0 = 0.8$ bar. Il est stocké dans un réservoir métallique.

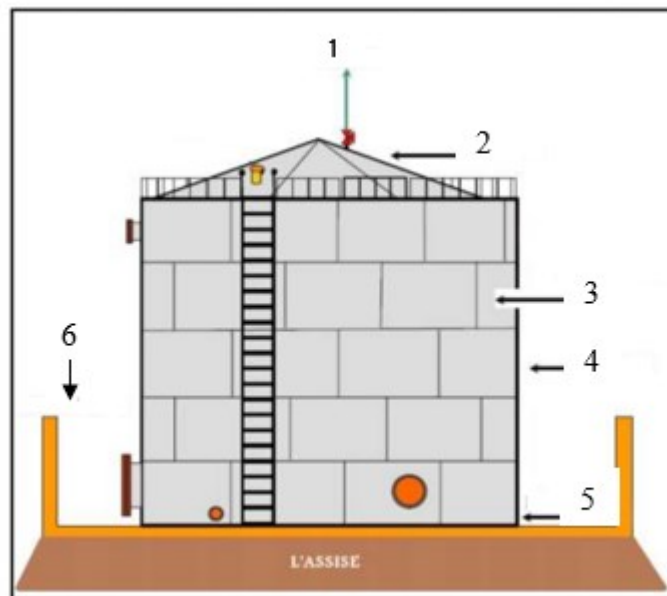
- 1) A quelle classe appartient ce produit pétrolier ?
- 2) Déduire le type de réservoir utilisé pour le stockage de ce produit.
- 3) Donner un exemple du produit stocké.

Réponses

- 1) Classe 2
- 2) Sphère, cylindre.
- 3) Butane.

Exercice 3

1. Designer les principaux éléments du bac de stockage ci-dessous :



2. Un réservoir de capacité 10^6 litres est utilisé pour le stockage 354 tonnes de butane
 - a) Quel est le type de ce réservoir ?
 - b) Quel est l'état physique du butane stocké à 25°C ?
 - c) Quel sera le volume du réservoir nécessaire pour le butane à l'état gazeux à 25°C et pression égale à sa pression de vapeur saturante.
 - d) Déduire le type de réservoir approprié.

Données : ρ (butane à 25°C) = 590 kg/cm^3 ; P^0 saturante (à 25°C) = 2.5 bars.

Réponses

1. Principaux éléments du bac de stockage :
 1. Event
 2. Le toit
 3. La virole
 4. La robe
 5. Le fond
 6. La cuvette

2. a) Sphère ou cigare.
b) l'état physique du butane : liquide
c) Volume du butane à l'état gazeux : $V = 60423.67 \text{ m}^3$
d) Réservoir cylindrique vertical.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.1 INTRODUCTION

Les réservoirs de stockage sont utilisés pour contenir un grand nombre de liquides organiques ou de gaz, y compris des matières premières, des produits intermédiaires, des produits finis ou des sous-produits utilisables.

Chaque année, une grande partie de l'énergie est perdue en raison de réservoirs de stockage chauds qui ne disposent pas d'une bonne isolation. Lorsque l'on cherche à minimiser les coûts, il est important de tenir compte de la sécurité des travailleurs, mais aussi d'être sûr de préserver les ressources et de les utiliser efficacement. Sans système d'isolation fiable, les réservoirs de stockage peuvent perdre de l'énergie, entraîner des pertes financières et mettre les employés en danger.

L'efficacité énergétique et la sécurité de ces réservoirs sont d'autant plus importantes que la demande mondiale en produits chimiques et en moyens de stockage et de manipulation appropriés est grandissante.

Les réservoirs peuvent différer en conception et en équipement, et le type de construction dépend de la température de stockage et des propriétés des produits à stocker. Il est essentiel de procéder à une évaluation détaillée pour veiller à ce que tous les aspects soient pris en considération afin de garantir que les produits puissent être stockés et manipulés de la manière la plus sûre et efficace.

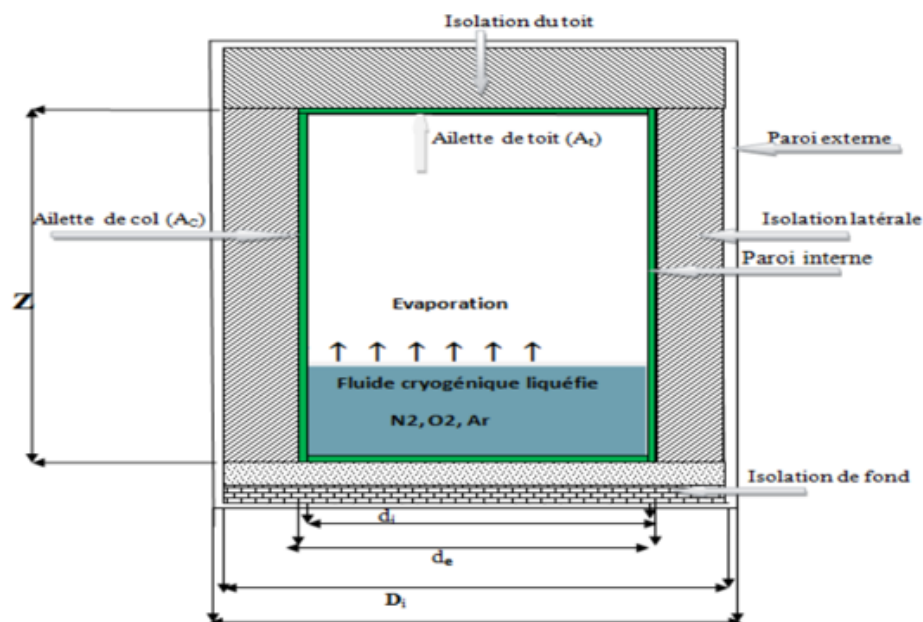


Figure II.1 : Schéma physique du réservoir cryogénique

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.2 PERTE D'ÉNERGIE DES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE CHAUDS

Les parois et les toits des réservoirs de stockage chauds sont principalement considérés comme les plus grandes sources de perte d'énergie. Cependant, à moins que le réservoir ne soit rempli, la plus grande source de perte d'énergie se trouve au fond du réservoir de stockage chaud.

Même si le réservoir de stockage n'est rempli qu'à 10 % de sa capacité, le fond du réservoir sera toujours en contact à 100 % avec le liquide chaud, ce qui en fait la zone la plus exposée au transfert de chaleur et à la perte d'énergie.

Pour cette raison, il est impératif d'installer un bon système d'isolation thermique à la base du réservoir afin de réduire les pertes d'énergie.



Figure II.2 : Réservoir de stockage chauds

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.3 AUTRES AVANTAGES D'ISOLATION DES BASES DE RÉSERVOIR

En plus de réduire les pertes d'énergie, un système d'isolation pour base de réservoir présente d'autres avantages.

Tout d'abord, le système d'isolation doit protéger le matériau de la base en béton de la structure contre les températures élevées. Cela signifie que les fondations en béton renforcées peuvent être installées pour plus de rentabilité.

Un système d'isolation pour base de réservoir permet également de protéger le contenu du réservoir contre les attaques chimiques en cas de fuite ou de déversement importants. Les vapeurs ou les fuites et les déversements de substances dangereuses peuvent mettre les travailleurs en danger. Par conséquent, l'installation d'une isolation de base de réservoir est conçue pour renforcer la sécurité des travailleurs.

Ensuite, le système d'isolation doit fournir une force de compression suffisante adaptée à la conception du réservoir. Une force de compression insuffisante en cas de charge importante peut entraîner un tassement et réduire les performances thermiques, ce qui peut provoquer une augmentation de la viscosité ou une solidification du produit.

Enfin, le système d'isolation doit être capable de résister à la corrosion et de limiter la détérioration de la cuve. Au cours de sa vie, un réservoir de stockage classique peut être utilisé à des fins différentes ou fonctionner à des températures cycliques, ce qui crée un environnement où la corrosion sous isolant (CSI) devient un problème si le réservoir est mal isolé.

Beaucoup de réservoirs actuellement en construction sont conçus pour être polyvalents. C'est pourquoi un système d'isolation pour base de réservoir est primordial et devrait être intégré dès la conception initiale.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES



Figure II.3 : Système d'isolation pour base de réservoir

Il est important d'envisager l'utilisation d'un matériau d'isolation à cellules fermées, imperméable et ininflammable pour les bases de réservoir. Cela lui permettra de résister à l'infiltration de l'humidité et à la CSI (corrosion sous isolant), ce qui, dans le cas contraire, aurait des conséquences désastreuses.

L'utilisation d'une isolation ininflammable permet de limiter les risques potentiels d'incendie et de fumée inhérents aux réservoirs de stockage.

De plus, il est essentiel que les matériaux d'isolation puissent s'utiliser pour différentes catégories à support de charges lourdes spécialement conçues pour les applications de base de réservoir et pouvant offrir une force de compression allant jusqu'à 240 t/m^2 sans aucune compression.

Dans le cas des réservoirs à température élevée, une force de compression insuffisante de l'isolation peut avoir plusieurs conséquences : tassement, perte de performance technique, perturbation de l'environnement de traitement, contrôle réduit de la viscosité et solidification possible du contenu.

En fonction de la température de stockage, de l'épaisseur d'isolation et des coûts énergétiques, le délai de rentabilisation pour isoler le fond d'un réservoir de stockage peut prendre quelques mois à quelques années.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

Owens Corning produit les systèmes d'isolation en verre cellulaire FOAMGLAS® actuellement utilisés pour les réservoirs chauds, froids et cryogéniques partout dans le monde.

Ainsi, le système d'isolation FOAMGLAS HLB (à support de charges lourdes) est un composant central de plus de 90 % des systèmes d'isolation pour base de réservoir de GNL au monde, une utilisation critique nécessitant des capacités HLB élevées et des propriétés d'isolation thermique cryogénique.

II.4 DÉLAI DE RENTABILISATION ET RENDEMENTS ANNUELS

Il est important de prendre en compte les facteurs tels que les températures et les prix énergétiques lors du calcul des délais de rentabilisation et des rendements annuels des systèmes d'isolation pour base de réservoir.

Pour chaque projet particulier, la chaleur perdue par la base sans système d'isolation se compare au coût d'investissement total. On obtient ainsi le délai de rentabilisation total de l'installation d'un système d'isolation pour base de réservoir qui peut se compter en mois ou en années en fonction de la température de stockage du liquide contenu.

De plus, le rendement futur total de l'investissement doit se calculer pour la vie active du réservoir avec une base isolée. Cela montre la quantité d'énergie économisée par mètre carré de la base isolée du réservoir, ainsi que le rendement total par année après le délai de rentabilisation.

II.5 ISOLATION EN CRYOGÉNIE

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 limitent l'application de certains matériaux, et conduit à l'utilisation de matériaux plus complexes.

II.5.1 Critères physiques

II.5.1.1 Le coefficient de conductivité thermique

Le coefficient de conductivité thermique caractérise la propriété d'un matériau à conduire la chaleur. Les isolants utilisés en cryogénie ont généralement un coefficient de conductivité thermique inférieur à 0,050 W/m K.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

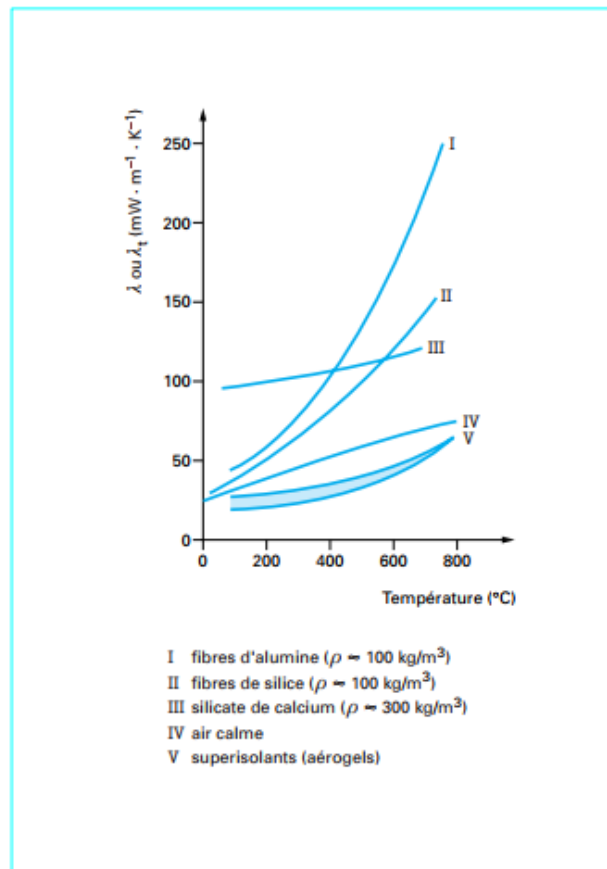


Figure II.4 : Conductivité thermique ou transmissivité thermique, en fonction de la température, de différents isolants.

II.5.1.2 La masse volumique

C'est le critère le plus facile pour reconnaître sans essais longs et coûteux à quelle classe appartient le produit. Un bon isolant doit être si possible léger afin de ne pas alourdir les structures sur lesquelles il est posé.

II.5.1.3 Imperméabilité à la vapeur d'eau

A la différence des canalisations vapeur, le froid dans le cas du GNL est à l'intérieur de la tuyauterie ; l'humidité atmosphérique a donc tendance à pénétrer dans le calorifuge pour former du givre ou de la glace. Ceci conduit forcément à l'utilisation d'un isolant imperméable.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.5.1.4 Vieillessement

En dehors de la pénétration d'humidité, certains isolants, par suite de modifications chimiques internes (réactions secondaires très lentes, migrations de constituants...) ou externes (modifications de structure sous l'effet des rayons ultraviolets du soleil par exemple) subissent des transformations qui altèrent (modifient) leurs caractéristiques initiales d'isolation.

II.5.1.5 La chaleur spécifique

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'une substance donnée (soit à pression constante, soit à volume constant).

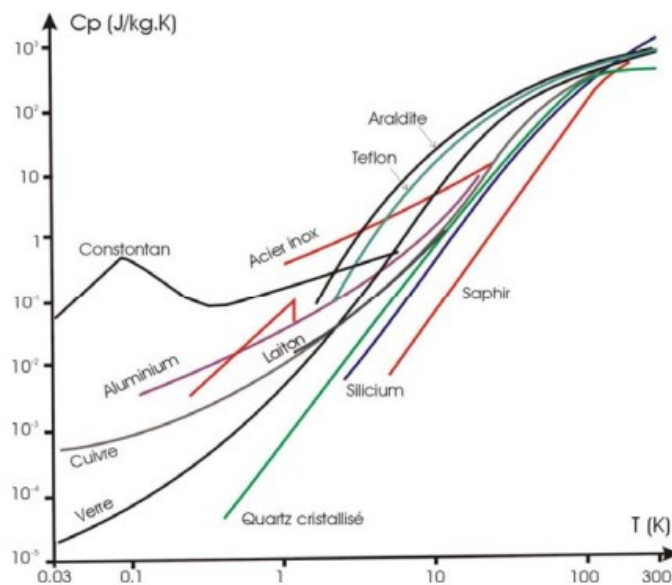


Figure II.5 : Capacité thermique massique de certains matériaux et isolants.

II.5.2 Critères mécaniques

II.5.2.1 La contraction thermique

Si le matériau isolant et la structure sur laquelle il est appliqué ont des caractéristiques de contraction thermique différentes, le calorifuge doit comporter des joints de dilatation, dont le rôle consiste à compenser cette différence.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.5.2.2 La résistance mécanique

La résistance à la compression est la caractéristique essentielle qui doit être prise en considération pour les matériaux destinés à des utilisations isolantes des sols.

II.5.2.3 Les essais de traction

Un matériau peut être classé selon la courbe brute de traction qui caractérise son comportement. Il est représenté par une droite lorsque le matériau est malléable (être déformé à chaud ou à froid, par choc ou pression, en conservant la nouvelle forme acquise) et par une courbe subdivisée en trois zones (une zone de déformation élastique ; une zone de déformation plastique et une zone de restriction et de rupture) lorsque le matériau est ductile (il présente une grande déformation plastique à rupture) .

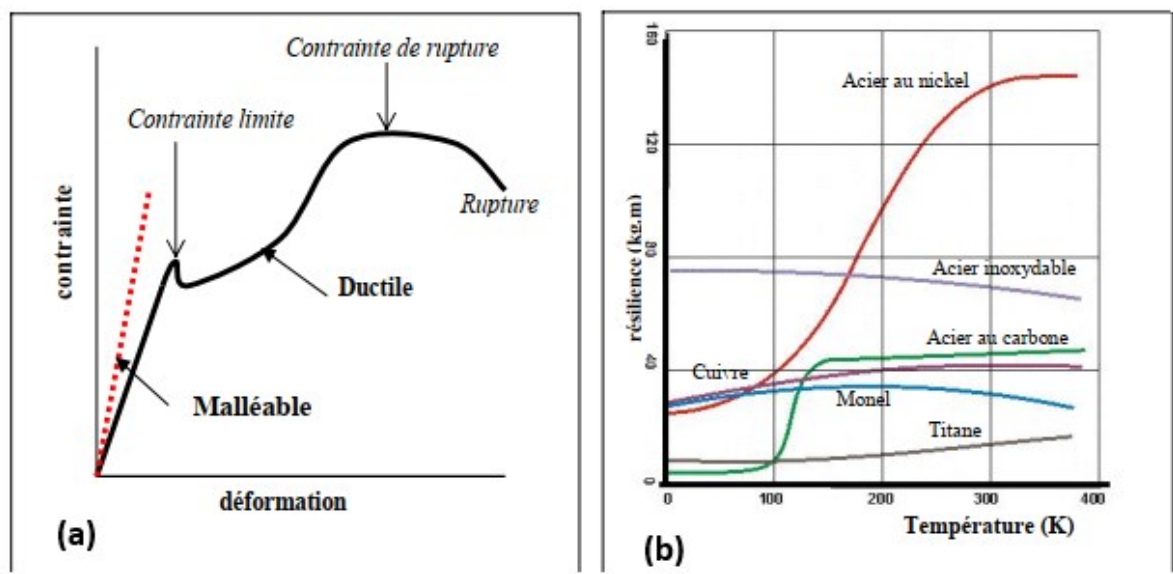


Figure II.6 : (a) Courbe brute de traction - (b) Courbes de résilience (capacité d'un matériau à absorber de l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc (déformation rapide), en fonction de la température de certains matériaux

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.5.2.4 La tenue aux chocs

Ce critère concerne surtout le calorifuge des tuyauteries. Les usines de liquéfaction, sont installées en bord de mer dans des endroits soumis aux intempéries, ce qui ne favorise pas les travaux délicats sur le site. Un bon isolant de tuyauterie ne saurait donc être fragile.

II.5.3 Critères de sécurité

Pour des raisons évidentes, s'agissant d'installations gazières, il est indispensable que les isolants résistent au feu. Les normes internationales distinguent les matériaux en différentes classes suivant leurs performances ; la littérature indique que les isolants d'origine minérale sont ceux qui résistent le mieux au feu.

II.5.4 Critères de mise en œuvre

La mise en œuvre d'un isolant doit être facile à réaliser, mais aussi, facile à contrôler. Les points particuliers d'une installation comme par exemple les compensateurs, les vannes et les supports de tuyauterie exigent une attention particulière.

II.5.5 Critères économiques

Ils sont en quelque sorte la synthèse de tous les autres. Il est clair qu'on ne peut pas trouver un calorifuge qui possède toutes les qualités et en plus être bon marché. Il y a donc un choix économique à faire qui peut varier d'une installation à une autre.

II.5.6 Les différents types d'isolations

Dans ce paragraphe nous nous limiterons aux isolants les plus utilisés dans les installations cryogéniques et plus particulièrement dans le domaine du gaz naturel liquéfié.

II.5.6.1 Les mousses

Les mousses sont régulièrement utilisées pour les gros stockages cryogéniques (azote, méthane, etc.) malgré une conductivité thermique relativement élevée.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

Les principales mousses utilisées sont à base de résines polystyréniques, de résines polyvinyliques (les thermoplastiques), de polyuréthane (les thermodurcissables) et les mousses de verre.

Tableau II.1 : Propriétés de certaines mousses

Caractéristique	Klégécel		Mousse de polyuréthane		Mousse de verre
Masse volumique (kg/m^3)	33	75	30	60	150 à 200
Conductivité thermique (mW/m.K)	28	30	21	20	50 à 60
Résistance à la compression (bar)	2.5	8	2	6	7 à 10
Perméabilité à la vapeur	0.0 18	0.014	-	-	-
Température max d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$)	70	70	-	-	430

II.5.6.2 Les poudres

Les poudres entrent fréquemment dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques, tout particulièrement pour le réservoir de taille moyenne type basse pression.

L'isolation par les poudres consiste à placer de fines particules de matériaux entre les parois aux températures différentes. Ces particules peuvent être des micro sphères (la taille des particules varie de 100 à 200 microns) de plastiques, de carbone, de silicate de calcium, d'oxyde de fer....

II.5.6.3 La perlite

Il s'agit de minuscules sphères provenant d'une roche volcanique du type silicate d'alumine. Elle est finement broyée et expansée, donc totalement incombustible. La perlite est peu coûteuse et elle peut être aisément mise en place.

II.5.6.4 Les fibres

Les corps fibreux les plus couramment utilisés par les industries du bâtiment et du froid sont les laines de verre et les laines de roche. Ces deux types d'isolants ont comme principal défaut d'absorber facilement l'humidité. L'espace d'isolation est donc soit pressurisé à l'aide d'un gaz sec soit rendu étanche et maintenu sous faible pression absolue.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.5.6.5 La Superisolation

Ce sont des matériaux relativement récents, dont l'utilisation s'est généralisée surtout dans l'isolation des bacs de stockage des cryogènes tels que l'Hélium et l'Hydrogène à très basses températures.

La superisolation peut être constituée de feuilles réfléchissantes (aluminium, cuivre), séparées par des feuilles isolantes (type Linde tel que le nylon), ou bien par des feuilles, présentant les caractéristiques d'être isolantes sur une face et réfléchissantes sur l'autre (mylar aluminisé).

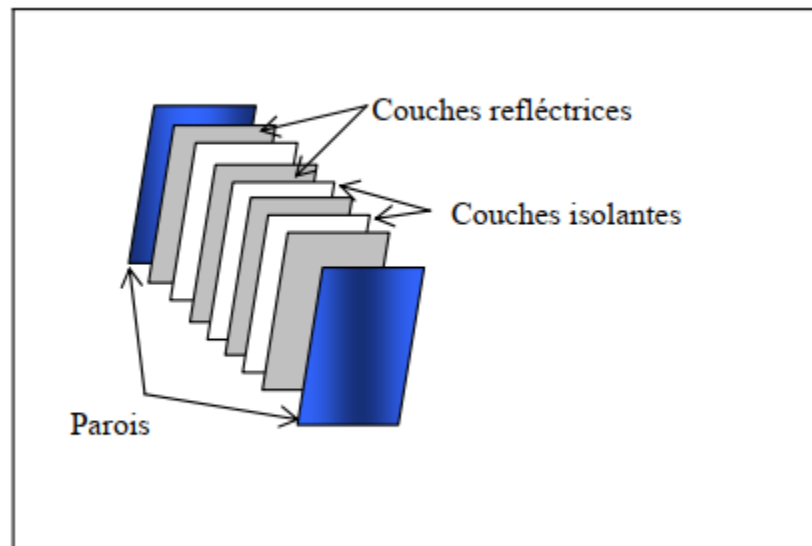


Figure II.7 : Détails d'un superisolant

II.5.6.6 L'isolation par le vide

Le vide est généralement utilisé pour des petits cryostats de laboratoire, ainsi que pour les formes complexes. Le vide a pour rôle d'éliminer deux modes de transfert de chaleur (conduction dans les solides et convection).

Pour la réduction du transfert de chaleur par rayonnement, le vide est souvent combiné avec des feuilles d'aluminium. L'application la plus répandue pour ce type d'isolant est le cryopompage.

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

Ce procédé consiste en une application qui permet d'obtenir des vides très poussés (de l'ordre de 10-12 torr). Le cryopompage est réalisé par condensation (cryocondensation) et par adsorption (cryosorption) des molécules de gaz à pomper sur plusieurs surfaces portées aux basses températures.



Figure II.8 : Isolation sous vide

II.5.7 Comparaison de l'efficacité des différents types d'isolation

Les principaux 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 dimensions sera plus facilement isolé avec des poudres, que par tout autre moyen. Par contre, les cryostats de laboratoire ainsi que les conteneurs de

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

transport de faibles capacités seront, soit super-isolés, soient isolés par l'utilisation d'une garde d'azote.

Tableau II.2 : Comparaison de différents isolants.

Isolants	Avantages	Inconvénients
Les mousses	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible masse volumique ▪ Coût relativement bas ▪ Fabrication aisée ▪ Bonne résistance mécanique ▪ Mise en œuvre facile ▪ Bonne perméabilité à l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conductivité thermique élevée ▪ Contraction thermique élevée ▪ Vieillessement important ▪ Inflammable ▪ Pertes des caractéristiques isolantes au cours du temps ▪ Limite supérieure de température 80 °C
Les poudres	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peu coûteuse ▪ Incombustible ▪ Non toxique ▪ Récupérable ▪ Utilisation aisée 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se tasse facilement sous contrainte ▪ hydrophile ▪ Nécessite des filtres de vide ▪ Non élastique
Superisolant	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très stable ▪ Bonnes performances ▪ Faible poids ▪ Conductivité thermique faible 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite un travail sous vide ▪ Prix élevé par unité de volume ▪ Continuité de l'isolant ▪ Dégradation des performances sous l'effet d'une contrainte de compression
Le vide	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conductivité thermique faible ▪ Il s'adapte aux formes les plus complexes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Maintien de la faible pression ▪ Exige des surfaces de faible émissivités

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

II.6 EXERCICES D'APPLICATION

Exercice 1 : (Réservoirs de stockage chauds) Vrai/Faux

1. La plus grande source de perte d'énergie se trouve au fond du réservoir de stockage chaud.
2. Un système d'isolation pour base de réservoir ne permet pas de protéger le contenu du réservoir contre les attaques chimiques.
3. Le système d'isolation doit fournir une force de compression suffisante adaptée à la conception du réservoir.
4. L'utilisation d'une isolation ininflammable ne permet pas de limiter les risques potentiels d'incendie et de fumée inhérents aux réservoirs de stockage.
5. Le système d'isolation FOAMGLAS HLB (à support de charges lourdes) est un composant central de plus de 50 % des systèmes d'isolation pour base de réservoir de GNL au monde.

Réponses

1. Juste.
2. Faux
3. Juste.
4. Faux.
5. Faux.

Exercice 2 : (Isolation cryogénique) Vrai/ Faux

1. Pour isoler les réservoirs cryogéniques, on dispose d'un nombre important de matériaux plus complexes.
2. Les isolants utilisés en cryogénie ont généralement un coefficient de conductivité thermique supérieur à 0,050 W/m K.
3. Les isolants d'origine minérale sont ceux qui résistent le mieux au feu.
4. Les mousses sont utilisées pour les gros stockage cryogénique.
5. Les poudres entrent dans l'isolation thermique des fluides cryogéniques pour le réservoir de taille moyenne type haute pression.

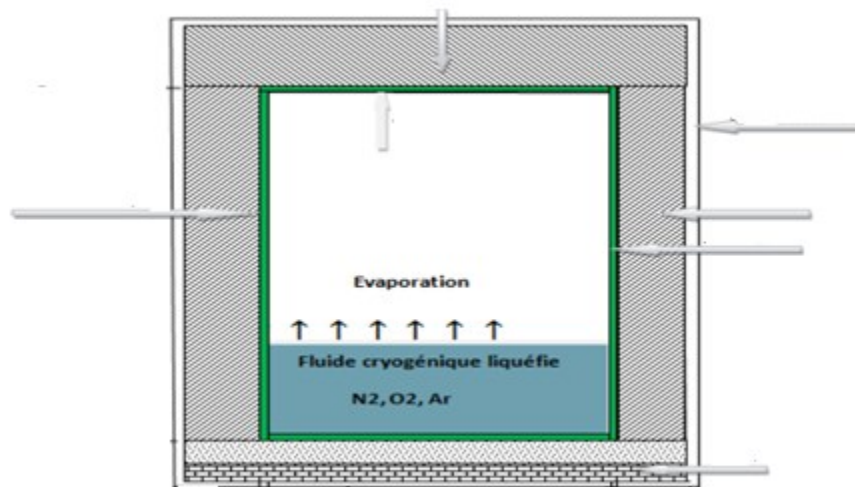
Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

Réponses

1. Juste.
2. Faux.
3. Juste.
4. Juste.
5. Faux.

Exercice 3

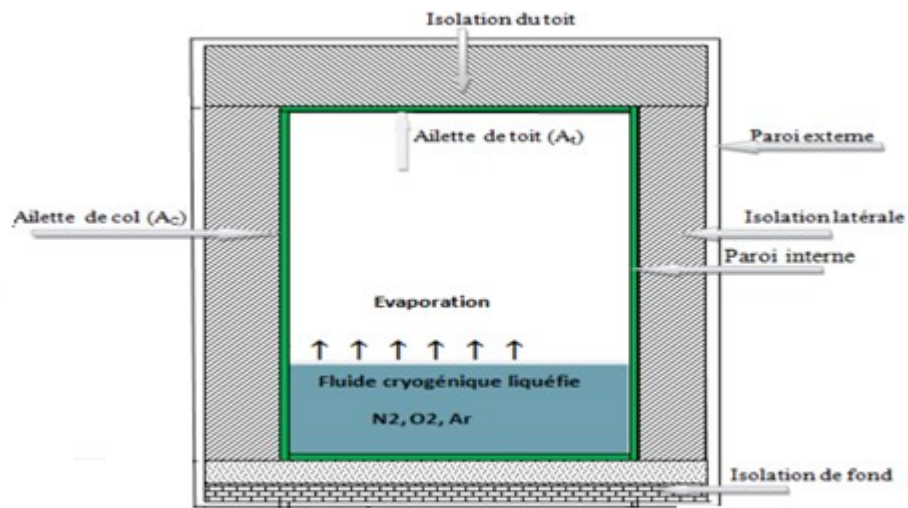
1. Quels sont les principaux critères pour le choix d'un bon mode d'isolation ?
2. Citer quelques types d'isolants.
3. Designer les principaux éléments d'un réservoir cryogénique.



Réponses

1. Critères de choix : Efficacité recherchée et le prix de revient.
2. Différents types d'isolants : Les mousses, les poudres, Superisolants, le vide.
3. Principaux éléments d'un réservoir cryogénique :

Chapitre II : L'ISOLATION DANS LES RÉSERVOIRS DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES



III.1 INTRODUCTION

Dans l'industrie de pétrole, les problèmes de transport se posent dès que le pétrole brut est extrait du gisement et, à partir de cet instant, à tous les stades successifs de son traitement et de son acheminement jusqu'au point de consommation, tous les modes de transport sont utilisés.

Les navires pétroliers et les pipelines sont les moyens les mieux adaptés au transport du pétrole brut depuis les champs de production jusqu'aux raffineries. Ils sont également utilisés pour le transport massif des produits pétroliers ou produits finis à partir des raffineries jusqu'au centre de consommation.

Les chemins de fer sont les mieux adaptés au transport des fuels lourds (produits pétroliers utilisés comme combustibles, dont la viscosité rend difficile le transport par pipelines) ainsi qu'au transport de moindre importance dans le cas de la distribution des produits finis.

Enfin, le transport par la route est adapté aux transports des produits finis depuis les dépôts de stockage jusqu'au point de distribution (station-service). L'industrie de pétrole fait appel à un éventail complet de moyens de transport.

III.2 TRANSPORT PAR PIPELINE

Un pipeline est un mode de transport des matières fluides réalisé au moyen de conduites (transport par canalisation) constituant généralement un réseau.

Selon le produit transporté, les pipelines portent des noms spécifiques : gazoduc, oléoduc, etc..... Les principaux systèmes de transport par canalisation concernent :

- ✓ Le gaz naturel, transporté par gazoduc (figure III.1) ;
- ✓ Les hydrocarbures liquides, dont surtout le pétrole, transportés par oléoduc (figure III.2).



Figure III.1 : Les gazoducs



Figure III.2 : Les Oléoducs

III.2.1 Caractéristiques du transport par pipeline

Les pipelines ont des caractéristiques différentes selon les produits qui se déplacent en leur sein.

Les pipelines sont des canalisations de diamètre pouvant aller de 6'' (6 pouces) à 42'' (42 pouces). Dans ces canalisations, transitent à des pressions relativement élevées, des produits pétroliers, du pétrole brut ou du gaz.

Les produits transportés sont propulsés par des installations de pompage ou de compression réparties le long des canalisations à des distances qui peuvent varier de quelques dizaines de kilomètres à cent ou deux cents kilomètres selon la charge du pipeline.

Les distances entre les installations de pompage sont liées à la nature du produit pétrolier. Les caractéristiques principales d'un pipeline sont :

A. Le diamètre

Le diamètre de la canalisation est déterminé en fonction du débit des produits acheminés, $\emptyset = f(\text{volume de produit à transporter, viscosité})$.

B. Le type d'acier utilisé

Les qualités d'acier les plus couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans la spécification API (American Petroleum Institute).

C. Le mode de pose

Dans le mode de pose, on distingue deux types de pipelines :

❖ *Les pipelines aériens (en surfaces)*

L'avantage de ce mode est que les fuites sont facilement détectables et les travaux de réparation des fuites sont moins coûteux et plus faciles. L'inconvénient est que l'installation n'est pas à l'abri des actes de sabotage.

❖ *Les pipelines souterrains*

Les inconvénients sont : Les fuites ne sont pas détectables facilement. Les travaux de réparation sont fastidieux et nécessitent une mise à nu du réseau.

La pose des pipelines se fait selon des techniques qui font intervenir un matériel important :

- Des tracteurs à grue qui transportent et posent des tubes sur les tracés ;
- Bulldozers : ouverture de la voie ;
- Trancheuses, pelles ou explosifs : le creusement de la tranchée ;
- Machines à revêtir.

D. Les installations de surface

Ce sont les témoins de l'ouvrage en surface lorsqu'il est enterré, ce sont des relais qui augmentent le débit du produit pétrolier ou du gaz transporté chaque fois que cela est nécessaire (lutte contre les pertes de charges). Elles sont classées en deux groupes : Les stations de pompage ou de compression et les installations terminales.

E. La capacité maximale de transport

C'est la quantité de produit que l'on peut transporter à travers le pipeline sur une période donnée.

Le coefficient de sécurité « C_s » est le rapport autorisé de la pression maximale de service (P_{max} en N/m^2) sur la résistance à la rupture de l'acier (R_p en N/m^2) :

$$C_s = \frac{P_{max}}{R_p}$$

Les coefficients de sécurité autorisés figurent dans les règlements élaborés par les autorités administratives. Il varie en fonction de la densité des populations des zones traversées. Les coefficients de sécurité sont d'autant plus sévères que la densité correspondante est grande.

On distingue trois catégories dans le tracé des pipelines :

Catégorie 1 : $C_s = 0.675$; on a deux cas : Les zones situées à moins de quarante (**40 m**) mètres d'un établissement public et les zones situées à moins de quinze (**15 m**) mètres d'un immeuble.

Catégorie 2 : $C_s = 0.82$ pour les zones désertiques

Catégorie 3 : $C_s = 0.75$ autres types de terrain.

F. La pression de service

La pression maximale de service ou la pression de service de la canalisation est la pression développée par le produit qui circule dans la canalisation dans les conditions normales d'exploitation.

Dans le cas des oléoducs, un des principaux risques est une fuite due à la corrosion des canalisations (le CO₂ et l'hydrogène sulfuré contenus dans le pétrole attaquent les parois métalliques), notamment dans des conditions extrêmes comme en Sibérie.

III.3 TRANSPORT PAR NAVIRES PETROLIERS

Le pétrole peut être transporté par des navires pétroliers, aussi appelés « tankers » ou « supertankers » pour les plus grands d'entre eux (figure III.3).

Les navires pétroliers ont des appellations différentes selon le type de produits qu'ils transportent (pétrole brut ou produits raffinés) et selon leur capacité embarquée.

La capacité de transport des navires pétroliers est exprimée en « tonnes de port en lourd (tpl) ou DWT pour « deadweight tons » en anglais. Cela correspond à leur chargement maximum. La vitesse moyenne d'un navire transportant 250 000 tonnes de pétrole est d'environ 15 nœuds, soit près de 28 km/h.



Figure III.3 : Tankers

Dans la terminologie des transports maritimes, on distingue différents types de navires (figure (III.4)) selon la classification retenue par l'Agence internationale de l'énergie.

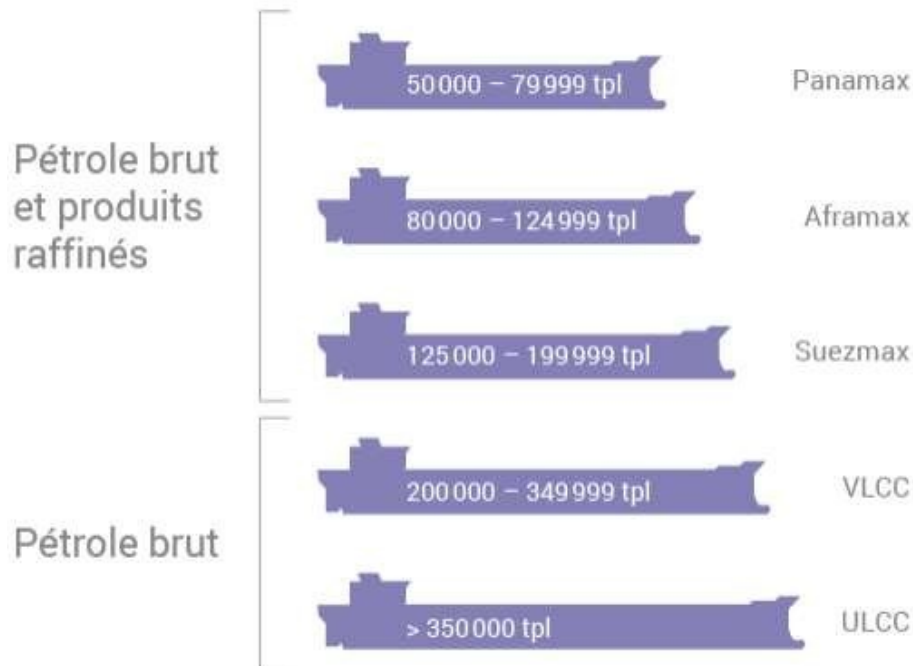


Figure III.4 : Différents types de navires

III.3.1 Les risques associés au transport pétrolier maritime

Six risques principaux peuvent affecter les navires pétroliers :

- Les conditions maritimes (chavirage, accident d'équipage, etc.) ;
- La collision ou l'échouement ;
- Le feu ou l'explosion ;
- Les fissures de coque ou les déformations des citernes ;
- Le risque de pollution en opérations de chargement ou de déchargement ;
- La piraterie.

III.4 TRANSPORT PAR VOIE ROUTIERE

Le transport du pétrole par camion (figure III.5) est essentiellement réservé aux produits déjà raffinés, il sert par exemple à approvisionner les stations-service. Les camions ont plusieurs compartiments dans leur citerne afin de séparer les différents types de carburant et de ne pas multiplier les trajets. Le camion demeure aussi l'unique moyen de transport pouvant atteindre n'importe quel endroit du territoire grâce aux nombreuses routes.



Figure III.5 : Le transport du pétrole par camion

III.4.1 Les codes de danger de la signalisation de transport par camion-citerne des hydrocarbures.

Un camion-citerne est utilisé pour le transport de liquides, de gaz ou encore de pulvérulents stockés en vrac. Les camions citernes sont généralement caractérisés par une longue cuve (ou citerne) d'acier inoxydable placée à l'arrière de la cabine.

La variation de la capacité typique d'un transporteur d'essence se situe entre 15 et 35 m³ par cuve, bien que l'on trouve de petits camions de 10 m³ ou parfois moins utilisés pour la vidange de fosses septiques, et d'autres de moins de 4 m³ pour le transport du GPL sous pression.

III.4.1.1 La plaque de danger

Les véhicules routiers transportant des matières dangereuses sont identifiés à l'aide de panneaux de signalisation de couleur orange, disposés l'un à l'avant et l'autre à l'arrière d'une unité de transport (Figure III.6, III.7).

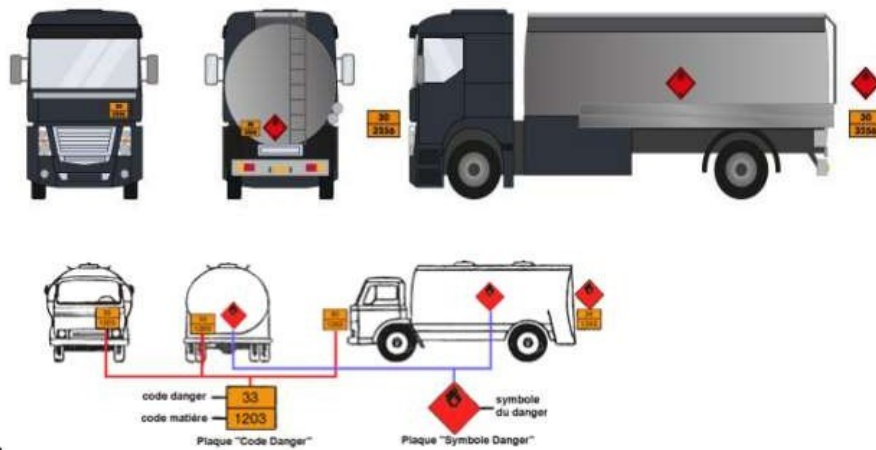


Figure III.6 : Camion mono cuve



Figure III.7 : Camion multicuves

Chapitre III : TRANSPORT DES HYDROCARBURES

Dans le cas de transports en citernes, par voies routière ou ferrée, ces panneaux contiennent les informations suivantes :

En partie supérieure, le numéro d'identification du danger : Ce code numérique composé de deux ou trois chiffres identifie les dangers présentés par la matière (Figure III.8).

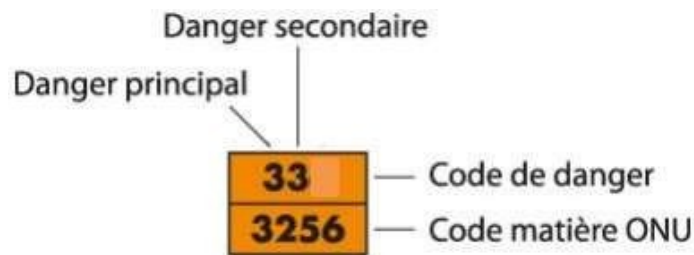


Figure III.8 : Plaque de danger

Le tableau (III.1) représente une description des codes de danger ADR (Accord for dangerous goods by road).

Tableau III.1 : Description des codes de danger ADR.

Numéro	1 ^{er} chiffre Danger principal	2 ^{ème} ou 3 ^{ème} chiffre Danger	subsidiaries
0	-	Absence de danger	secondaire
1	Matières et objets explosibles	Risque	d'explosion
2	Gaz comprimé	Risque d'Emanation	de gaz
3	Liquide inflammable	Inflammable	
4	Solide inflammable	Inflammable	
5	Comburent ou peroxyde	Comburent	
6	Matière toxique	Toxique	
7	Matière radioactive	-	
8	Matière corrosive	Corrosif	
9	Danger divers	Danger de réaction	ou violente spontanée

Le doublement d'un chiffre indique une intensification du danger afférent. Lorsque le danger présenté par une matière peut être indiqué suffisamment par un seul chiffre, ce chiffre est complété par « 0 ». Exemples : Le numéro d'identification du danger « 30 » correspond aux matières liquides inflammables.

Dans la seconde partie de la plaque (Figure III.8), on trouve le code matière qui est le numéro ONU sous lequel est référencé le type de produit transporté (près de 3000 numéros existants). C'est un numéro d'ordre chronologique des matières évaluées par l'ONU. C'est toujours un numéro composé de 4 chiffres, un seul numéro est attribué à chaque matière. Il permet d'identifier la matière concernée. En voici quelques exemples :

- ✓ 1017 = chlore
- ✓ 1114 = benzène
- ✓ 1202 = gasoil - 1203 = essence
- ✓ 1428 = sodium
- ✓ 1789 = Acide chlorhydrique en solution
- ✓ 1830 = Acide sulfurique
- ✓ 2809 = mercure
- ✓ 2820 = acide butyrique
- ✓ 3374 = acétylène sans solvant

III.4.1.2 Signalisation des camions

Parallèlement à cette signalisation orange, les véhicules-citernes, les wagons-citernes, les véhicules ou wagons destinés au transport en vrac, ainsi que les colis contenant des matières dangereuses doivent porter des plaques-étiquettes indiquant les risques présentés par la matière (Figure III.9).

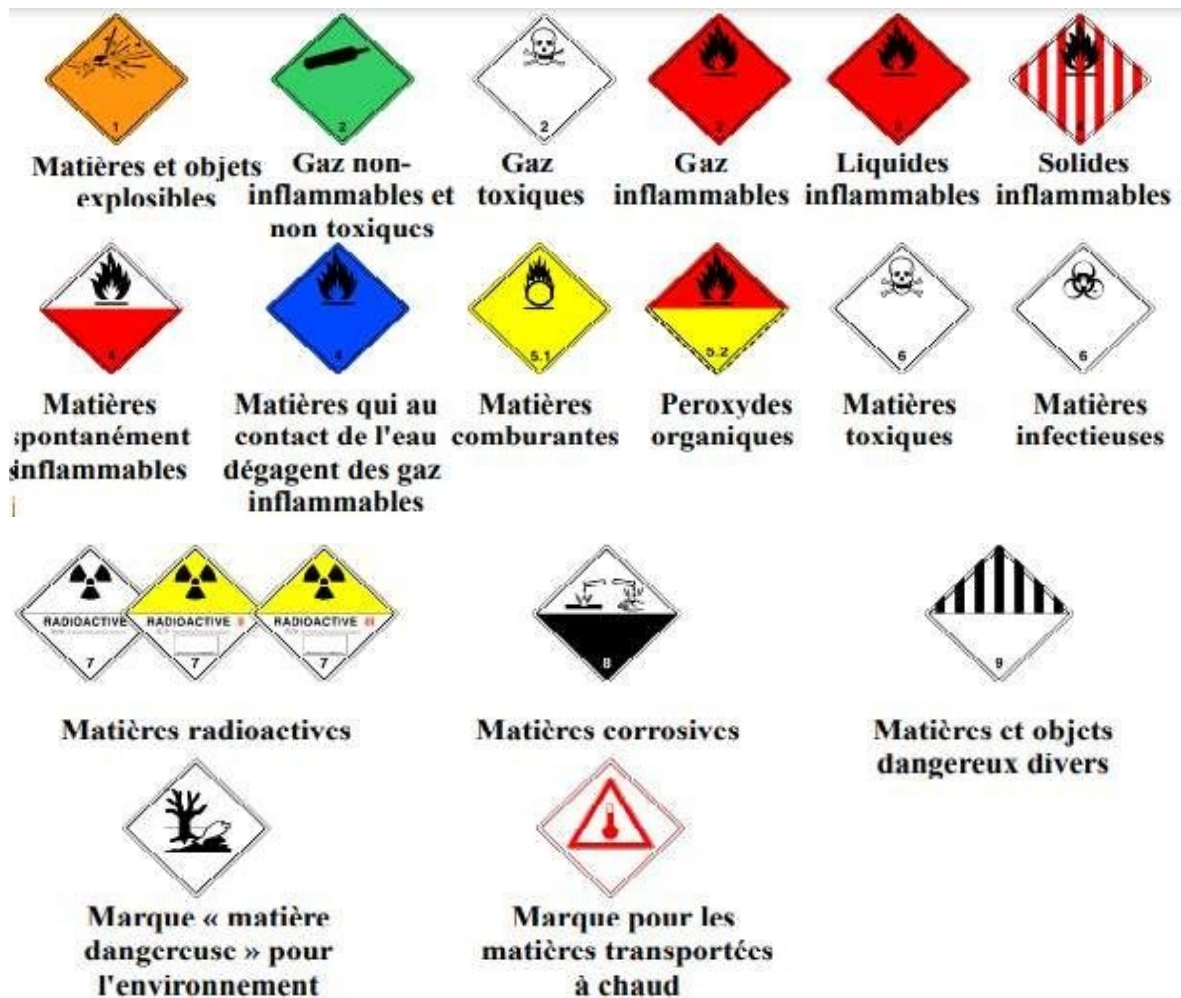


Figure III.9 : Modèles d'étiquettes indiquant les risques de la matière transportée.

III.5 TRANSPORT PAR VOIE FERROVIAIRE

Le chemin de fer présente l'avantage de pouvoir toucher une clientèle très importante et de transporter des quantités importantes de produits pétroliers en un seul trajet. Le transport des produits pétroliers peut se faire par wagons-citernes isolés ou par train complet (Figure III.10). On distingue trois types de wagon-citerne : Les wagons-citernes ordinaires qui sont destinés au transport des produits pétroliers ne nécessitant pas de grandes mesures à prendre.

Les wagons-citernes munis de réchauffeurs qui sont destinés au transport des fiouls lourds. Les wagons-citernes munis de réchauffeurs et de calorifuge qui sont destinés pour le transport des bitumes et des lubrifiants.

Le transport ferroviaire reste le seul moyen d'alimenter massivement des dépôts qui ne sont reliés à la ressource ni par un réseau de pipeline, ni par voie maritime. Bien que les compagnies de chemin de fer aient adapté leur tarification, cela reste un mode de transport coûteux

L'avantage du train est d'être plus mobile, de pouvoir emprunter toutes les voies ferrées existantes et de s'adapter à la demande en ajoutant si besoin des wagons supplémentaires. Cette solution reste considérée comme dangereuse, car les accidents, bien que très rares, sont spectaculaires.



Figures III. 10 : Transport ferroviaire

III.5.1 Avantages du transport par train comparé au transport par camion

- ❖ Economie de consommation de carburant (diminution de la dépendance aux produits Pétroliers) ;
- ❖ Diminution de la pollution (GES gaz à effets de serre) ;
- ❖ Réduction de la congestion des réseaux routiers ;
- ❖ Sécurité routière accrue avec la diminution des camions sur les routes ;
- ❖ Sécurité des marchandises transportées ;
- ❖ Idéal pour les gros volumes et longues distances ;
- ❖ Économique pour les longues distances

III.5.2 Inconvénients du transport par train comparé au transport par camion

- ❖ Manutention et rupture de charge ;
- ❖ Dépendance au transport routier pour pré acheminement et livraison finale ;
- ❖ Manque de flexibilité ;
- ❖ Avaries et incidents sur les voies (neige, etc.) ;
- ❖ Pas adapté aux faibles distances ;
- ❖ Incertitude quant aux dates de départ et d'arrivée ;
- ❖ Problèmes de sécurité des populations pour le transport des marchandises dangereuses.

III.6 EXERCICES D'APPLICATION

Exercice 1 : Vrai/faux

- a) Un pipeline est un mode de transport des produits liquides.
- b) Les produits transportés sont propulsés par des installations de pompage ou de compression le long des canalisations.
- c) Les pipelines aériens ont beaucoup plus d'inconvénients que les pipelines souterrains.
- d) Le coefficient de sécurité varie en fonction de la densité des populations des zones traversées.
- e) La capacité de transport des navires pétroliers est exprimée en tonnes par litre.
- f) Le gaz naturel GN est transporté par oléoduc.
- g) Le diamètre de pipeline doit être inférieur à 6''
- h) Le diamètre d'une canalisation est déterminé en fonction du débit des produits acheminés.
- i) Les pipelines sont généralement en acier inoxydable.
- j) Les navires pétroliers ont une appellation différente selon le débit du produit transporté.

Réponses

(b), (d), (h) et (j) sont justes ;

(a), (c) (e), (f), (g) et (i) sont *fausses*

Exercice 2

Le gaz naturel est transporté par canalisation en acier supportant une pression de 70 bars. Ces tubes sont enterrés à environ 1m de profondeur.

- a) Quel est le tube de cette voie de transport ?
- b) Calculer le coefficient de sécurité de cette canalisation sachant que $R_p = 8.5 \text{ MPa}$.
- c) A quelle catégorie appartient le tracé de cette canalisation ?

Chapitre III : TRANSPORT DES HYDROCARBURES

Réponses

- a) Pipelines souterrains appelés gazoduc.
- b) Cs = 0.823
- c) Catégorie 2 : zone désertique.

Exercice 3

- 1) Comment signaler le transport de matières dangereuses ?
- 2) Que signifie le code ADR ?
- 3) Que représente les codes de la plaque de danger suivante :

23
1017
- 4) Parmi les plaques de danger suivantes, indiquer ceux qui ne sont pas présentés selon les normes en justifiant votre réponse :

368
3360

3256
33

2
1202

03
1830

Réponses

- 1) Plaques orange avec code de danger et plaques avec symboles de danger.
- 2) ADR : Accord for dangerous goods by road c'est-à-dire : Accord pour le transport des marchandises dangereuses par la route.
- 3) Représentation des codes de la plaque de danger :
23 : gaz comprimé inflammable ;
1017 : chlore.
- 4) La première plaque est juste par contre les autres plaques sont fausses.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. AFPS Guide technique, Réservoirs de stockage partie B, (2014).
2. ANTONINI, G., PAIN, J.P., « Les isolants thermiques aux basses températures ». Revue de Physique Appliquée, Société française de physique / EDP, 23 (11), pp.1755-1760, (1988).
3. AYATI, F., RACHID REBIAI, Z. HAMIANE, L. BOUDJEMIA, « Les modes de stockage de l'hydrogène et élaboration d'un programme informatique pour la conception d'un réservoir d'hydrogène sous forme liquide ». IWH 2007, 27-29. Ghardaïa – Algeria, (2007).
4. ANOH KOUASSI, P., DR ECHUI AKA, D., AYENON SEKA, F., « Transport et approvisionnement de la CÔTE D'IVOIR en hydrocarbures ». Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement, n° 2, (2014).
5. BARRON, R.F., « Cryogenic systems ». Second edition, Oxford University Press, New York, (1985).
6. BARRON, R.F., « Cryogenic Heat Transfer ». Taylor & Francis, New York, (1999).
7. CONTE, R.R., « Elément de cryogénie ». Masson & Cie, Paris, (1970).
8. Dr. AKE. « Cours de stockage, distribution et transport des hydrocarbures (STDH) ». Licence 2, Service Leroini, COTE D'IVOIRE. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <http://fr.slideshare.net/leroiani/cours-de-stockage-distribution-et-transport-des-hydrocarbures>.
9. DE PONTE, F., KLARSFELD, S., « Conductivité thermique des isolants ». Techniques de l'Ingénieur, Réf : R2930 V2 (2002).
10. HEBRAL, B., « Technique de l'ingénieur, traité mécanique et chaleur », (1993).
11. IBRAHIMA, S., N., « Modélisation et simulation numérique du comportement de chargement de gaz naturel liquéfié dans une cuve de méthanier ». Doctorat en Génie des Procédés, des Produits et des molécules. Université de LORRAINE, France, (2018).
12. LARBI, S., BENKOUSSAS, B., BELHANECHÉ, H., « Analyse et Dimensionnement de Quelques Organes d'un Banc d'Essai de Combustion ». Rev. Energ. Ren. : 11èmes Journées Internationales de Thermique, 95-102, (2003).
13. MAJID, F., LAHLOU., M, EL GHORBA, M., HACHIM, A., « 22ème Congrès Français de Mécanique ». Lyon, (24 au 28 Août 2015).
14. ROJEY A., « Gaz naturel : Production, traitement et transport », Technip, France (1994).