

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département Transport et Équipements des Hydrocarbures



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention de diplôme de MASTER

Spécialité : Génie mécanique

Option : Transport et Distribution des Hydrocarbures

Thème :

***Évaluation des émissions des COV
durant le stockage de l'essence dans les
réservoirs du dépôt de « Caroubier »***

Réalisé par :

GALLEZE SABRINA

Encadré par :

Mr.TIKOBAINI

Année universitaire
2015/2016

Remerciements

Louange tout d'abord à Dieu qui m'a donné la force pour terminer ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur Mr.TIKOBAINI d'avoir accepté de diriger ce travail et pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger ce mémoire de fin d'étude.

Mes remerciements vont également à tous le personnel du dépôt de Caroubier.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, trouvant aussi l'expression de mes profondes gratitude et respects.

SABRINA

DEDICACES



C'est avec une très grande joie que je décide ce travail à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon frère YACINE qui m'a toujours soutenue et encouragé.

Mon oncle AZZEDINE qui a mis à ma disposition tous ce dans j'avais besoin.

Je décide également ce mémoire à ma grand-mère,

A ma tante et mes oncles,

Aux personnes qui m'ont toujours aidées et encouragées, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin des études supérieures, mes aimables amies Hadjer, Soumia, Sarah, Meriem, Asma.

A tous mes amis du groupe MATH11

SABRINA

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Présentation de l'entreprise NAFTAL

I.1. Description de l'entreprise NAFTAL	3
I.1.1. Historique	3
I.1.2. Missions	3
I.1.3. Organisation de l'entreprise	4
I.1.4. Infrastructures.....	5
I.1.5. Produits commercialisés.....	6
I.1.6. Activités de l'entreprise	7
I.2. Description de la branche carburant	7
I.3. Centre carburants '1169 Caroubier'	9

Chapitre II : Stockages des hydrocarbures

II.1. Introduction	10
II.2. Stockages des hydrocarbures liquides	10
II.2.1. Equipement de bac	10
II.2.2. Accessoires de bac.....	20
II.2.2.1. Accessoires de lutte contre les surpressions.....	20
II.2.2.2. Accessoires de lutte contre l'incendie	21
II.2.2.3. Accessoires de mesure de produit	22
II.2.2.4. Accessoires de visite et de nettoyage	23
II.2.2.5. Accessoires d'accès	24
II.2.2.6. Accessoires de réchauffage	24

II.3.Stockage de gaz liquéfiés	24
II.3.1.Stockage cryogénique	24
II.3.2.Stockage aérien sous pression.....	24
II.3.3.Stockage souterrains et sous talus sous pression	26
II.3.4.Protection contre les risques d’incendie des réservoirs	30
II.4.Conclusion.....	31

Chapitre III : Les COV et les pertes par évaporation

III.1.Introduction.....	32
III.2.Définition de l’évaporation.....	32
III.3.Paramètres qui influe sur l’évaporation.....	33
III.4.Les COV et les pertes par évaporation	33
III.5.Impacts des COV et les pertes par évaporation	33
III.5.1.Impact sanitaire.....	33
III.5.2.Impact sur l’environnement	34
III.5.3.Impact économique.....	35
III.5.4.Impact sécuritaire	35
III.6.Les types de pertes par évaporation dans les réservoirs de stockage	35
III.6.1.Réservoirs à toit fixe	35
III.6.2. Réservoirs à toit flottant	37
III.7. Techniques de réduction des COV	38
III.7.1. Techniques de destruction des COV	38
III.7.2. Techniques de récupération des COV	40
III.8. Moyens de réduction des pertes des produits pétroliers par évaporation	42
III.8.1. Augmentation de la pression de tarage.....	42
III.8.2. Interconnexions des phases gazeuses de plusieurs réservoirs	42
III.8.3. Connexions des phases gazeuses de plusieurs réservoirs	43
III.8.4. Utilisation d’écran flottant.....	43
III.8.5. Utilisation des microsphères	43
III.8.6. Utilisation de bac à toit flottant	44
III.8.7. Arrosage des réservoirs.....	44

III.8.8. Utilisation des hydrocarbures fluorés	44
III.8.9. Utilisation des réservoirs spéciaux	44
III.8.10. Utilisation des disques réflecteurs_	45
III.9. Conclusion	42

Chapitre IV : Les risques liés au stockage des hydrocarbures

IV.1.Introduction	46
IV.2.Incendie	46
IV.3.Feu de nappe	47
IV.4.Explosion de bac	48
IV.5.BLEVE	48
IV.6.UVCE	51
IV.7.Boil over	53
IV.8.Slop over_	58
IV.9.Froth over	59
IV.10.Explosion confinée vapeur ou poussière	59
IV.11.Conclusion	59

Chapitre V : Calcul des pertes par évaporation de l'essence super

V.1.Méthode de l'AM86 Modernisé	60
V.1.1.Limitation d'emploi	60
V.1.2.Evaluations des émissions totales	61
V.1.2.1.Réservoir à toit fixe_	61
V.1.2.2.Réservoir à écran flottant	63
V.2.Méthode de l'AP42	64
V.2.1.Domaine d'application.....	64
V.2.2.Evaluations des émissions totales.....	64
V.2.2.1.Réservoir à toit fixe	67
V.2.2.2.Réservoir à écran flottant	72

V.3.Les émissions totales de l'essence super dans le dépôt de caroubier	76
V.4.Comparaison des pertes par évaporation entres les bacs à toit fixe et à toit flottant.....	77
V.5.Influences des paramètres sur les pertes par évaporation_	78
V.6.Le cout lié aux pertes par évaporation chaque année	84

Conclusion générale	85
Bibliographie	86
Annexes.....	87

LISTE DES FIGURES & DES TABLEAUX

Figure I.1 : Organigramme de l'entreprise NAFTAL.....	5
Figure I.2 : Infrastructure de NAFTAL.....	6
Figure I.3 : Produits commercialisés par NAFTAL.....	6
Figure I.4 : Organigramme de la branche carburant.....	8
Figure II.1 : Schéma d'une robe d'un bac de stockage.....	10
Figure II.2 : Exemple de fondation d'un bac.....	11
Figure II.3 : Réservoirs à toit fixe supportée.....	12
Figure II.4 : Réservoir à toit fixe avec charpente autoportantes.....	12
Figure II.5 : Les différents accessoires de réservoirs à toit flottant.....	13
Figure II.6 : Réservoirs à toit flottant.....	14
Figure II.7 : Toit flottant à simple pont.....	15
Figure II.8 : Toit flottant à double pont avec double pente	15
Figure II.9 : Joint métallique	17
Figure II.10 : Joint élastique.....	18
Figure II.11 : Joint flexibles à lèvre.....	18
Figure II.12 : Joint flexible métallique.....	18
Figure II.13 : Béquille à réglage fixe.....	19
Figure II.14 : Béquille casse vide.....	18
Figure II.15 : Event.....	20
Figure II.16 : Exemple de soupape à double tarage.....	21
Figure II.17 : Exemple de protection contre l'incendie.....	22
Figure II.18 : Trou d'homme.....	23
Figure II.19 : Les serpentins de réchauffage.....	24
Figure II.20 : Bac de stockage cryogénique.....	26
Figure II.21 : Exemple de cigares.....	27
Figure II.22 : Exemple de sphère.....	28
Figure II.23 : Réservoir cylindrique sur lit de sable.....	30
Figure III.1 : Cycle de Chapman.....	34
Figure III.2 : Perte par respiration.....	36
Figure III.3 : Perte par mouvement.....	37

Figure III.4 : Perte par positionnement	38
Figure III.5 : Perte au mouillage au soutirage.....	38
Figure III. 6 : Bio-laveurs.....	40
Figure III.7 : Principe de fonctionnement par membrane.....	41
Figure III.8 : Schéma d'adsorption.....	42
Figure III.9 : schéma d'interconnexions des phases gazeuses à plusieurs réservoirs.....	43
Figure IV.1 : Triangle de feu.....	48
Figure IV.2 : Réservoir rempli d'un gaz liquéfié avec un ciel gazeux sous pression	50
Figure IV.3 : Mécanisme de surchauffage et de la rupture du réservoir.....	51
Figure IV.4 : Schéma de l'étape 1 de boil over classique	55
Figure IV.5 : Schéma de l'étape 2 de boil over classique	55
Figure IV.6 : Schéma de l'étape 3 de boil over classique.....	56
Figure IV.7 : Schéma de l'étape 4 de boil over classique.....	56
Figure IV.8 : Schéma de l'étape 5 de boil over classique	56
Figure IV.9 : Schéma de l'étape 1 de boil over classique.....	58
Figure IV.10 : Schéma de l'étape 2 de boil over classique.....	58
Figure IV.11 : Schéma de l'étape 3 de boil over classique.....	58
Figure IV.12 : Schéma de l'étape 4 de boil over classique.....	59
Figure IV.13 : Schéma de l'étape 5 de boil over classique.....	60
Figure V.1 : Variation des pertes par évaporation en fonction de diamètre.....	79
Figure V.2 : Variation des pertes par évaporation en fonction de diamètre.....	81
Figure V.3 : Variation des pertes par évaporation en fonction.....	82
Figure V.4 : Variation des pertes par évaporation en fonction.....	84
Figure V.5 : Variation des pertes par évaporation en fonction.....	85
Tableau I.1 : Détails techniques des bacs et produits stockés à l'entrepôt 1169 « Caroubier ».	9
Tableau III.1 : Les VME et VLE pondérée pour une durée de travail de 8 heures/jour et de 40 h/semaine.....	34
Tableau V.1 : Les différents types de BLEVE à différents natures de réservoir.....	51

Introduction générale

Depuis la découverte, l'utilisation de pétrole et ses dérivées ne cessent pas d'augmenter et sa valeur influe sur tout le système du marché de l'économie mondiale. Ces produits pétroliers sont considérés comme la première source d'énergie utilisée dans les différents domaines de la vie, c'est pour cela qu'il faut à tout prix préserver contre tous les risques.

Le premier moyen de stockage des hydrocarbures était le baril mais l'augmentation de la demande de ces produits a engendré une nécessité majeure d'améliorer les capacités de stockage et d'utiliser des réservoirs de grandes dimensions. Les réservoirs de stockage sont non seulement nécessaire pour le stockage des produit pétroliers mais aussi nécessaire pour la décantation de pétrole, pour contrôler la qualité de produit expédié, pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dues à toutes sortes d'aléas lors de la production, du transport et du raffinage...etc.

Les réservoirs de stockage construit couramment ont un volume pouvant atteindre 50 000m³. Le modèle des réservoirs de stockages à employer dépend de la nature de produit à stocker. Certains produit doivent être conservé sous pression et nécessitent des réservoirs de stockage très résistants, d'autres se conservent sous moyen pression ou sous pression atmosphérique.

Les produits pétroliers sont soumis à de nombreuses opérations de transport, de stockage et de distribution qui sont accompagnés par des pertes s'élevant à environ 9% de la production annuelle de pétrole. Ces pertes sont dues aux fuites, déversement, évaporation de ces produits et qui peuvent engendrer des conséquences graves sur l'environnement et l'homme.

Ce présent mémoire s'intéresse aux différents phénomènes qui contribuent aux pertes par évaporation de l'essence super, le calcul de ces pertes en reposant sur les méthodes de l'API, les conséquences qui peuvent engendrées à plusieurs échelles et les différents moyens de les réduire.

Dans la première partie je représente les différents types de stockages des hydrocarbures.

Dans la deuxième partie je représente les COV et les pertes par évaporation, leurs impacts sur les différents domaines et les moyens de réduire les COV et les pertes par évaporation durant le stockage.

Dans la troisième partie je représente les différents risques liés au stockage des hydrocarbures.

Dans la dernière partie je représente un calcul des émissions des COV durant le stockage en utilisant et les différents paramètres qui influent sur ces émissions ainsi le coût liés à ces pertes.

I.1.Description générale de l'entreprise

I.1.1.Historique

Les opérations de distribution et de commercialisation des produits pétroliers en Algérie, dépendaient entièrement des grandes sociétés multinationales, mais après l'indépendance, l'Algérie a commencé à mettre une stratégie économique basée essentiellement sur les hydrocarbures. La société a été créée par le décret n°80.101 du 06 avril 1980, l'entreprise ERDP(entreprise de raffinage et de distribution des pétrole) a été constituée par le transfert des structures moyens, biens, activités et personnels détenus, gérés et administrés par SONATRACH dans le cadre de ses activités de raffinage et de distribution des produits pétroliers sur le territoire national.

L'ERDP est entrée en activité le 01 janvier 1982, mais elle a été restructurée et modifiée par le décret 87.189 du 27 Août 1987 en 2 entreprises :

NAFTEC : chargé de raffinage.

NAFTAL : chargé de distribution et commercialisation des produits.

La société NAFTAL est issue donc, de la restructuration de SONATRACH en séparant l'amont, l'aval et les services puis la restructuration de l'aval en séparant le raffinage de la distribution. La rupture de la chaîne raffinage- distribution a fragilisé la société dans la mesure où toutes les contraintes du marché et de la production des produits pétroliers convergent vers ce maillon où se sont avérées des difficultés majeures liées, essentiellement à une mauvaise coordination avec le principal fournisseur : NAFTEC.

En 18 avril 1998, elle change de statut avec la transformation de NAFTAL en société par actions au capital social de 6 650 000 000 DA, filiale à 100 % du holding SONATRACH Valorisation des Hydrocarbures (SVH). Le 29 Juillet 2002 : augmentation du capital social de 6,65 milliards de DA à 15,65 milliards de DA conformément à la résolution de l'AGEX.

I.1.2.Missions

Dans le cadre du plan national de développement économique et social, NAFTAL est chargée :

- D'organiser et développer l'activité de commercialisation et de distribution des produits pétroliers.
- De stocker et transporter tout produit pétrolier commercialisé sur le territoire national.

- De veiller à l'application et au respect des mesures relatives à la sécurité industrielle, la sauvegarde et la protection de l'environnement.
- De procéder à toute étude de marché de consommation des produits pétroliers.
- De définir et développer une politique en matière d'audit ; recevoir et mettre en œuvre des systèmes intégrés d'information.
- De développer et mettre en œuvre les actions visant une utilisation optimale et rationnelle des infrastructures et moyens.
- De veiller à l'application et au respect des mesures liées à la sûreté interne de l'entreprise, conformément à la réglementation.

I.1.3.Organisation de l'entreprise

L'organisation de NAFTAL est articulée autour de structures centrales chargées de la définition de la politique de suivi et du contrôle des activités de l'entreprise et de structures opérationnelles (districts) bénéficiant de produit pétroliers. Ces districts bénéficient d'un soutien logistique et de maintenance assurée par des unités régionales spécialisées alors que les centres opérationnelles ont pour mission la distribution de l'ensemble des produits commercialisés par NAFTAL.

Le schéma de la macrostructure de la société NAFTAL/SPA s'articule autour de trois pôles :

- La direction générale.
- Les structures fonctionnelles (directions exécutives, directions centrales, direction de soutien).
- Les structures opérationnelles (Branches).

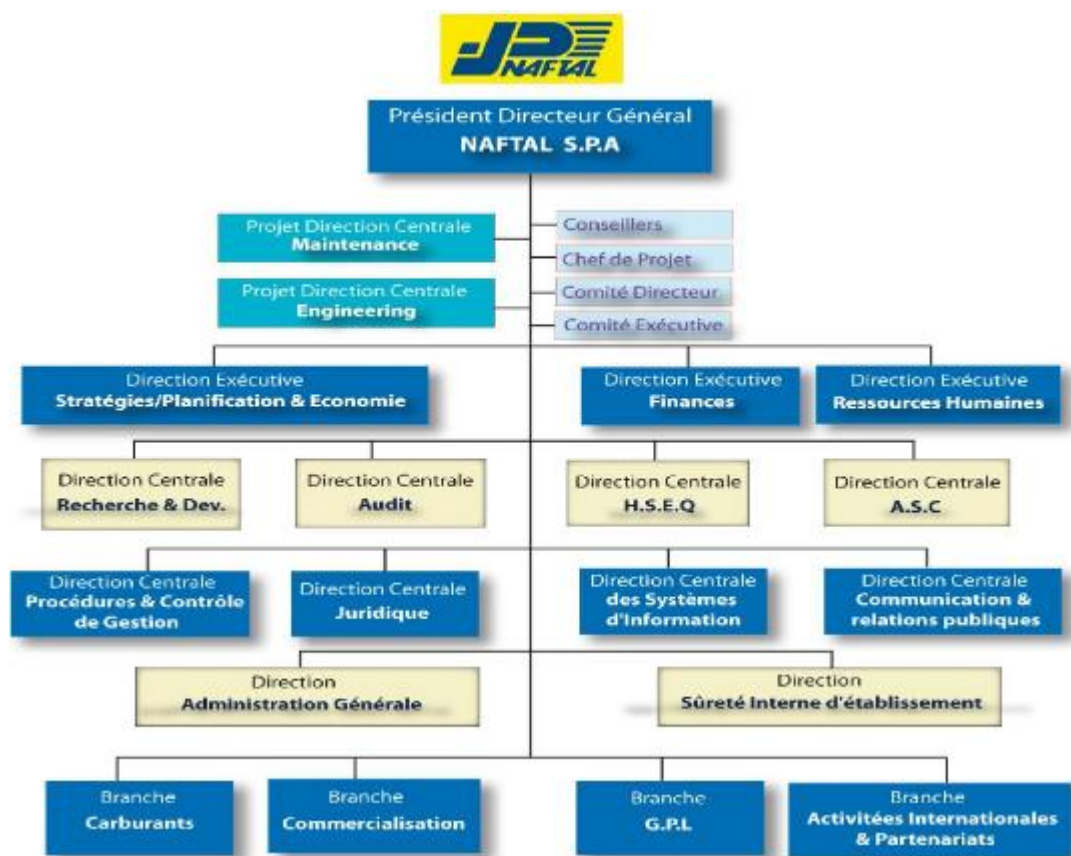


Figure I.1 : Organigramme de l'entreprise NAFTAL

I.1.4. Infrastructures

Infrastructures opérationnelles :

- 47 dépôts carburants terre.
- 42 Centres et mini-centres GPL.
- 09 Centres vrac GPL.
- 47 Dépôts relais.
- 30 dépôts aviation.
- 06 Centres marine.
- 15 Centres bitumes.
- 24 Centres lubrifiants et pneumatiques.
- Un Réseau de Transport pipelines d'une longueur de (2 720 km).
- Un Parc roulant de 3 300 unités.
- Un Réseau de stations-service de 674 dont 338 stations-service en gestion directe.

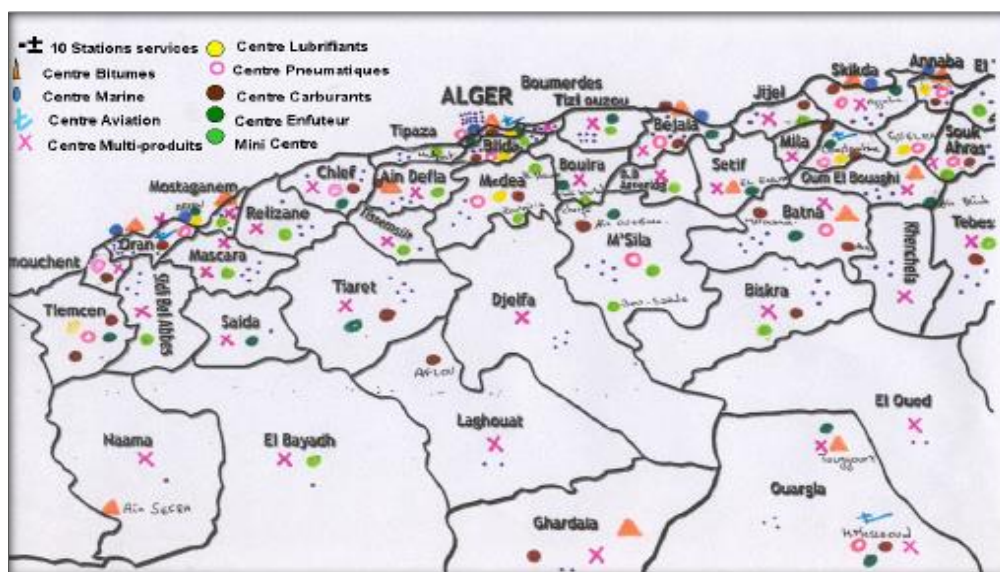


Figure I.2 : infrastructures de NAFTAL

I.1.5.Produits commercialisés

Les produits commercialisés par la société NAFTAL sont schématisé ci-dessous :

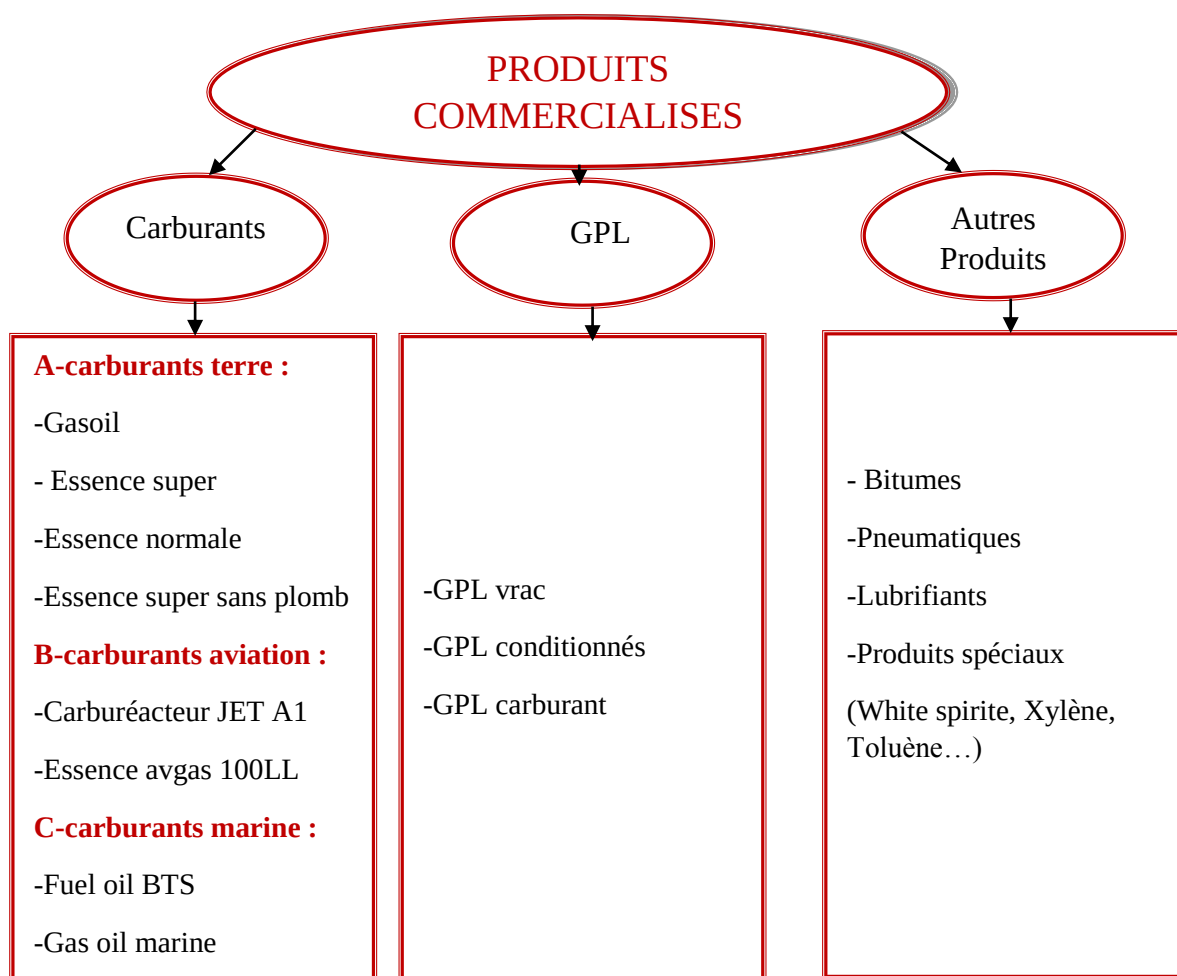


Figure I.3 : Produits commercialisés par NAFTAL

1.1.6. Activités de l'entreprise

NAFTAL étant une entreprise de distribution des produits pétroliers, sa tâche principale est de prélever les produits finis de leur points de fabrication ou d'importation et de les acheminer jusqu'aux centres de consommation avec les moyens de transport appropriés (pipe, navire, rail, camions et wagons citernes) tout en conservant sa qualité et autant que possible sa quantité. Les étapes de ce circuit de distribution sont :

-L'approvisionnement : C'est la réception de produits finis aux entrepôts (stockage primaire) à partir des raffineries (raffinerie d'Alger, Skikda, Arzew, Hassi Messaoud, Adrar) ou de l'importation. La réception se fait soit par pipeline soit par tankers.

-Le ravitaillement : C'est le transfert de stock entre les entrepôts et les centres de stockage secondaire (dépôts). Ces derniers n'ont aucune liaison avec les raffineries et chaque entrepôt couvre une zone d'influence (un ensemble de dépôts).

-la livraison : C'est la relation entre les centres de stockage (dépôts, entrepôts) et le consommateur final. Les unités de distributions sont chargées de mettre en place les produits à ses différents clients (station-service, société, ...) et satisfaire toutes les commandes. Le réseau de livraison est plus dense surtout en nord, comportant près de 1641 points de vente.

I.2.Description générale de la branche carburant

La branche carburant est organisée comme le montre la figure (I.4) :

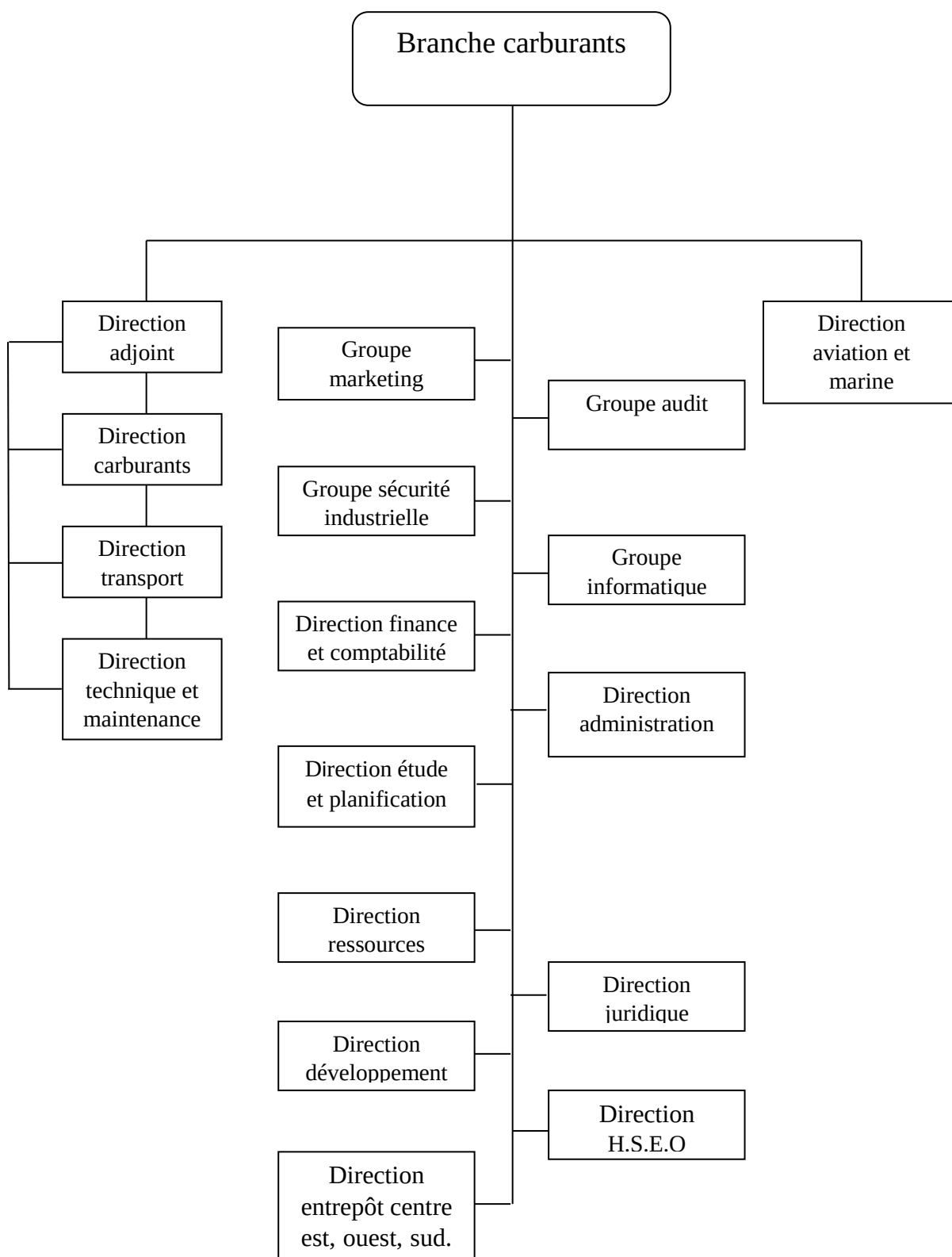


Figure I.4 : Organigramme de la branche carburant

I.3.Centre carburant 1169 'Caroubier '

La branche Carburant se divise en plusieurs districts répartis sur le territoire national, ces derniers sont classifiées selon la capacité de stockage de ces centres de stockage et distribution, le district Alger inclut trois centres : El Harrach 116A, Tizi Ouzou 115C et Caroubier 1169.

La capacité totale de l'entrepôt 1169 est de 82 000 m³, cette quantité est répartie sur dix-huit bacs de stockages cylindriques horizontaux à toit fixe ou à écran flottant. Le tableau (I.1) donne les capacités de ces bacs ainsi leur type de toit.

Produit stocké	N° Bac	Capacité en m ³		Hauteur en (mm)	Diamètre en (mm)	Toit
		Théorique	Pratique			
Contaminât	3	540	500	10810	8000	Fixe à écran
	4	540	500	10810	8000	Fixe à écran
White spirit	5	1500	1300	10820	16000	Fixe à écran
	6	1500	1300	10820	16000	Fixe à écran
Essence super	7	5477	5000	14560	22000	Fixe
	15	2173	2000	10980	16 000	Fixe à écran
	16	2173	2000	10980	16 000	Fixe à écran
Gasoil	8	5477	5000	14560	22 000	Fixe
	9	5477	5000	14560	22 000	Fixe
	10	5477	5000	14560	22 000	Fixe
	11	6525	6000	14560	24 000	Fixe
	12	6525	6000	14560	24 000	Fixe
	13	6525	6000	14560	24 000	Fixe
	14	6525	6000	14560	24 000	Fixe
	19	8620	8000	14000	28 000	Fixe à écran
	20	8620	8000	14000	28 000	Fixe à écran
Essence sans plomb	17	8620	8000	14000	28 000	Fixe à écran
	18	8620	8000	14000	28 000	Fixe à écran

Tableau I.1 : Détails techniques des bacs et produits stockés à l'entrepôt 1169 « Caroubier »

II.1.Introduction

Les réservoirs de stockages sont nécessaires à l'exploitation des champs pétroliers. Ils permettent d'assurer une continuité de la production ainsi que pour répondre à la grande variété des produits industriels à stocker. Les constructeurs ont recours à des réservoirs de formes diverses et de conception différentes étudier pour s'adapter le plus rationnellement et le plus économiquement possible aux caractéristiques du produit à stocker (hydrocarbures liquides , gaz liquéfiées).Selon la nature de produit stocké , les réservoirs peuvent être classé en 2 catégorie :

- Réservoirs pour le stockage des hydrocarbures liquides.
- Réservoirs pour le stockage des Gaz Liquéfiées.

II.2.Stockage des hydrocarbures liquides

II.2.1.Equipements de bac

II.2.1.1.La robe

Elle doit résister aux contraintes développées par la pression hydraulique du liquide stocké. Elle est constituée de rangées de tôles rectangulaires superposées, appelées viroles, qui sont soudées bout à bout. L'épaisseur minimale de chaque virole est calculée à partir de formules simples définies par les codes de construction. Sa valeur dépend des dimensions de la cuve, de la masse volumique du produit stocké, des caractéristiques mécaniques des aciers employés, des coefficients de sécurité imposés par le code, de la température d'étude et de la surépaisseur de corrosion retenue.

L'épaisseur maximale autorisée par la plupart des codes de construction est limitée à 45 mm alors que l'épaisseur minimale est comprise entre 5 et 10 mm.

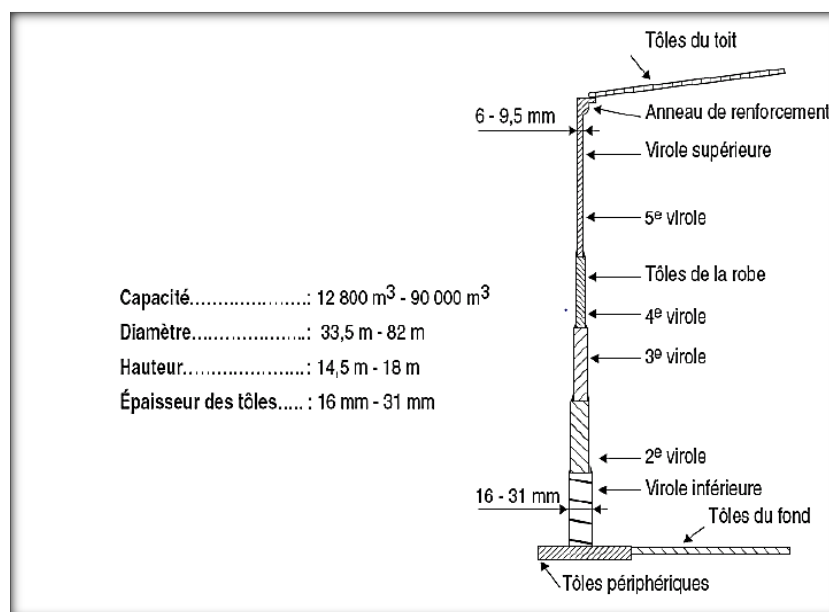


Figure II.1 : Schéma d'une robe d'un bac de stockage

II.2.1.2.Le fond

Le fond est réalisé à partir de tôles rectangulaires de 6 à 6,5 mm d'épaisseur minimale, soudées par recouvrement sur leur face supérieure. Le fond peut être plat ou légèrement conique avec une pente au moins égale à 0,2 % orientée vers le haut ou vers le bas, cette pente facilite l'élimination des dépôts en fond de bac. Les bacs de petit diamètre (inférieur à 10 m) possèdent un fond concave alors que les bacs de grand diamètre sont munis de fond convexe.

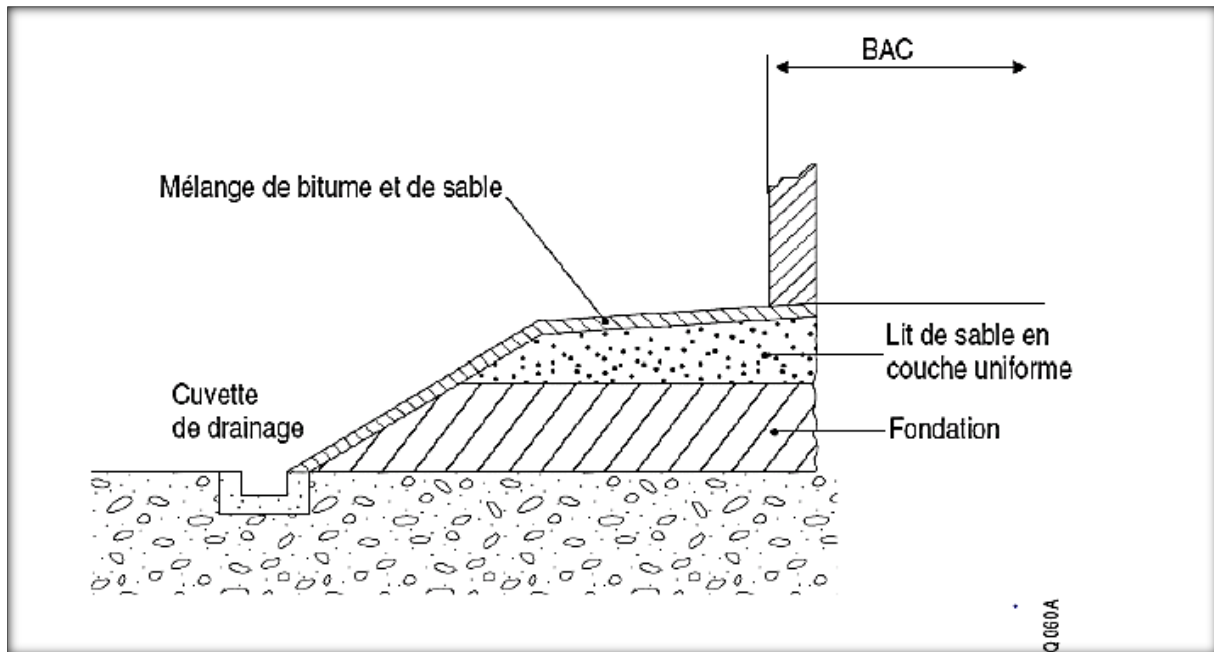


Figure II.2 : Exemple de fondation d'un bac

II.2.1.3.Le toit

II.2.1.3.1.Le toit fixe

A-Toit fixe supportée

Les toits fixes supportés ont un profil conique assez plat avec une pente recommandée de 1/16 ou 1/12. Ces toits sont constitués d'une charpente supportée par un ou plusieurs poteaux, en tubes ou en profilés, qui s'appuient sur le fond de l'ouvrage. Les tôles du toit reposent sur des chevrons rayonnants qui prennent appui au centre du réservoir sur le poteau central, en périphérie sur la robe, et pour les réservoirs de diamètre supérieur à 25 m, sur des poteaux intermédiaires. Ces derniers sont disposés sur des cercles concentriques et sont reliés en tête par des pannes droites sur lesquelles viennent se poser les chevrons. Les charpentes à poteaux sont reconnues comme des structures économiques car leur conception permet un montage simple sur le site.

Les réservoirs avec toit sur charpente à poteaux sont étudiés pour une surpression et une dépression internes n'excédant pas respectivement + 5 et -2,5 mbar.

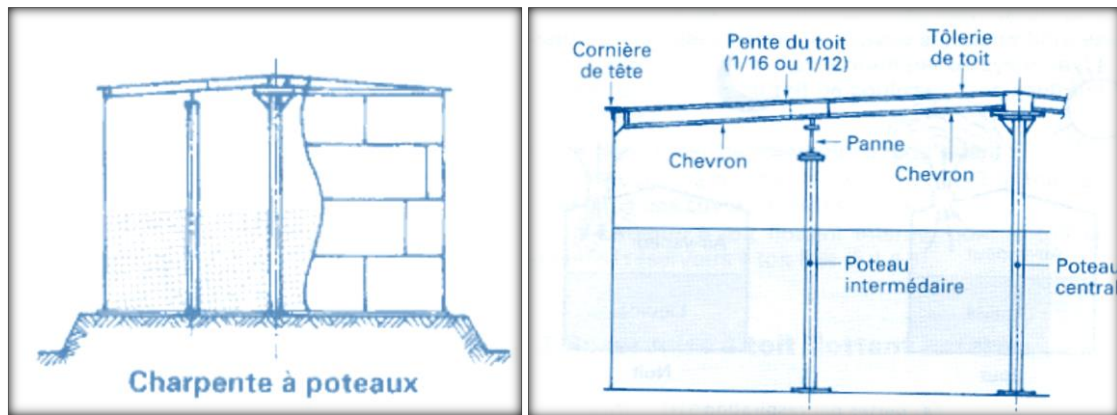


Figure II.3 : Réservoirs à toit fixe supportée

B-Toit fixe autoportant

Les toits fixes autoportants sont soit coniques avec une pente de $1/5$ ou $1/6$, soit sphériques avec rayon de courbure compris entre 0,8 et 1,5 fois le diamètre du réservoir. La charpente de ces toits est constituée d'éléments porteurs rayonnants, réalisés par de simples chevrons ou par des fermes métalliques. Ces éléments sont fixés en leur centre sur un anneau formant clef de voûte et prennent appui en périphérie sur le sommet de la robe, sans l'intermédiaire de poteau. On limite, en général, l'utilisation des charpentes à chevrons à des réservoirs de 25 m de diamètre pour les toits coniques et de 60 m pour les toits sphériques, tandis que les charpentes à fermes sont employées jusqu'à 60 m de diamètre quel que soit le profil du toit. Les réservoirs de diamètre inférieur à 20 m sont souvent construits avec des toits autoportants sans charpente

La surpression et dépression internes d'étude retenues pour les réservoirs à toits autoportants sont respectivement fixées à + 25 et - 5 mbar.

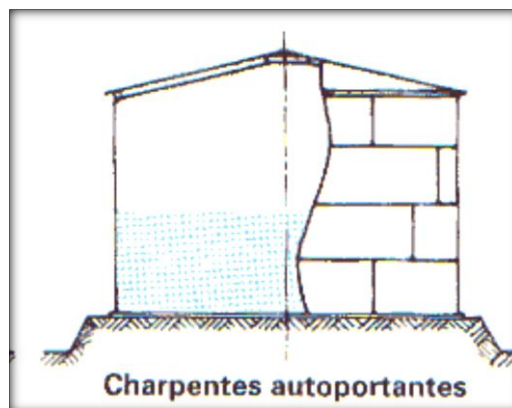


Figure II.4 : Réservoirs à toit fixe avec charpente autoportantes

II.2.1.3.2. Toit flottant

Le toit flottant est un disque mobile qui flotte sur le liquide en suivant les mouvements de descente et de montée du produit. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit de coulisser sans contrainte à l'intérieur de la robe.

Les réservoirs à toit flottant sont principalement utilisés pour le stockage de liquides volatils dont la tension de vapeur absolue à température ambiante est comprise entre 0,1 et 0,75 bar ou dont le point éclair est inférieur ou égal à 55 °C.

Aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet d'éliminer les problèmes de limiter les risques d'incendie et de pratiquement supprimer les pertes par évaporation.

Ils sont dimensionnés pour rester en flottaison sur un liquide de masse volumique au moins égale à 700 kg/m³.

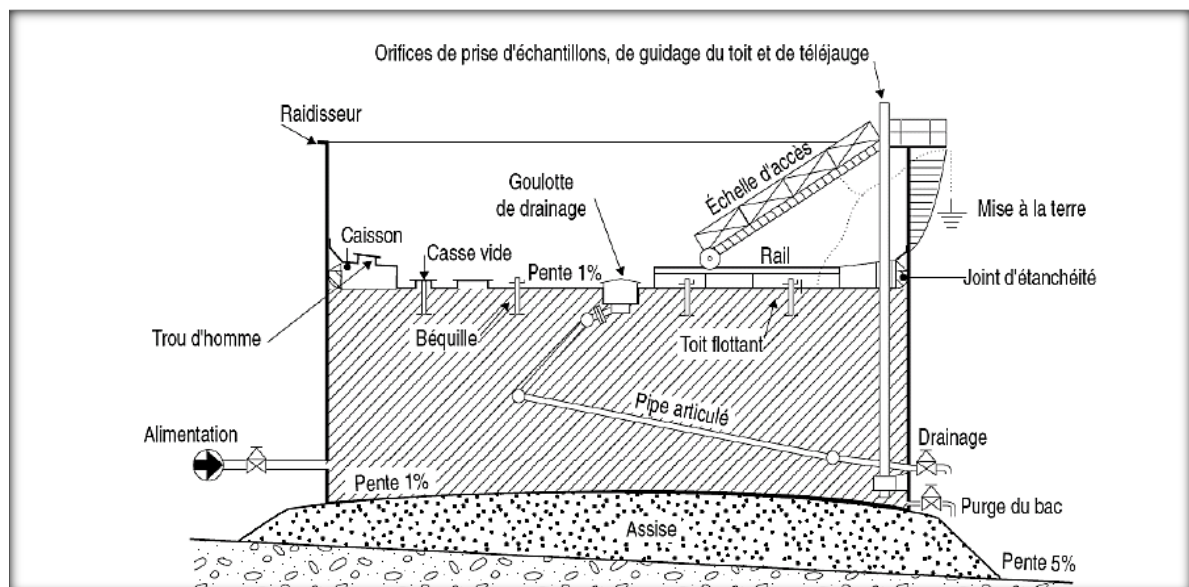


Figure II.5 : Les différents accessoires de réservoirs à toit flottant

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant :

- les réservoirs à toit flottant externe.
- les réservoirs à toit flottant interne.

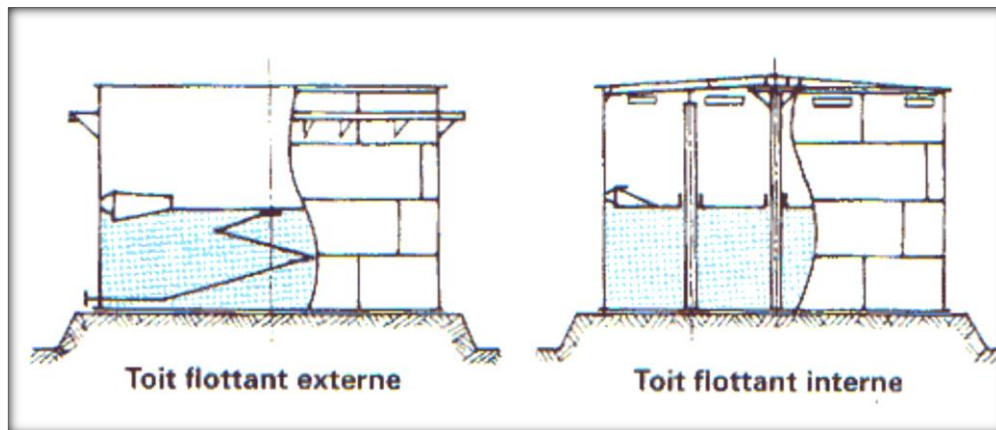


Figure II.6 : Réservoirs à toit flottant

A-Réservoirs à toit flottant externe

Le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes. Ces toits sont exposés aux intempéries et doivent donc être conçus pour résister aux effets du vent, de la pluie et de la neige. Il existe différents types de toit flottant externe :

- **Toit flottant simple pont**

Il est constitué par une membrane circulaire centrale, appelée pont, qui repose directement sur le liquide stocké et qui est bordée sur sa périphérie par un caisson annulaire. Le but de ces compartiments est d'assurer la flottabilité de la structure, en service normal, en cas d'accumulation d'eau de pluie sur le pont, ou lors d'une éventuelle crevaison de ce pont.

Ils sont plus légers et plus économiques que les toits flottants double pont mais ils sont plus sensibles aux effets du vent.

Des variantes de toit flottant simple pont ont été développées, il s'agit principalement :

- du toit flottant simple pont avec caisson central sur lequel un caisson de flottabilité cylindrique a été ajouté au centre du pont.
- du toit flottant simple pont avec bouées multiples qui comporte un ensemble de petits caissons fermés, cylindriques ou cubiques, disposés au-dessus du pont et sur toute sa surface suivant une maille régulière.

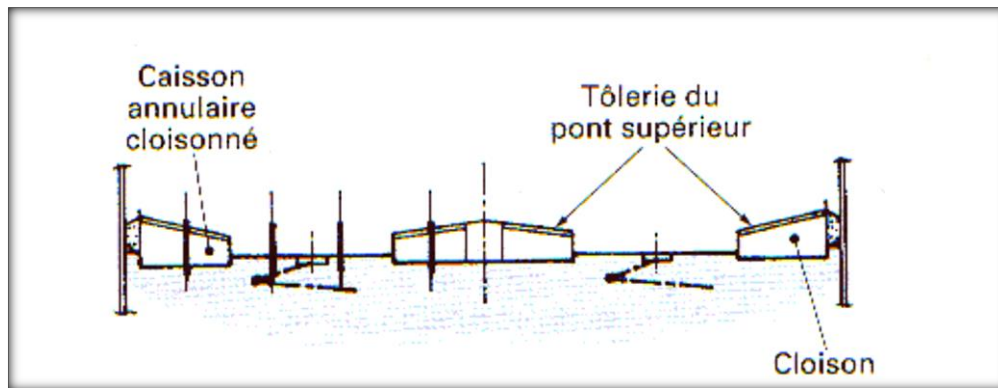


Figure II.7 : Toit flottant à simple pont

• **Toit flottant double pont**

Le toit à double pont est constitué par 2 couches de tôle d'acier, séparées par un espace vide d'environ 40 cm compartimenté en caissons indépendants renforçant la structure de toit.

Ce type de toit est préféré pour les bacs de grand diamètre pour les raisons suivantes :

- Meilleure flottabilité en cas de surcharge (neige, pluie,).
- Meilleur drainage des eaux de pluie.
- Vulnérabilité moindre aux vents violents.
- Meilleure isolation thermique durant la saison chaude limitant la vaporisation de produit.

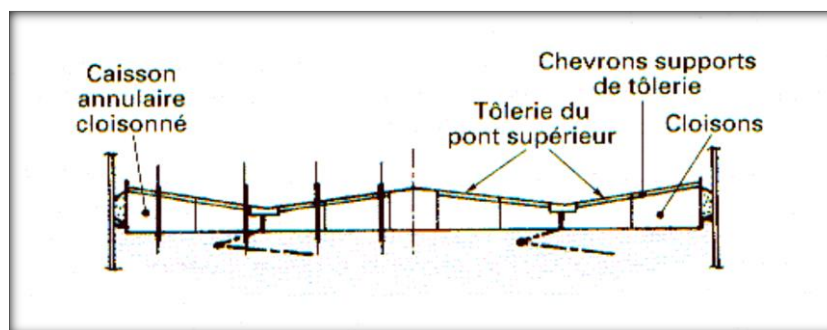


Figure II.8 : Toit flottant à double pont avec double pente

B. Les réservoirs à toit flottant interne

Les réservoirs à toit flottant interne sont des réservoirs à toit fixe dans lesquels est installé un toit flottant simplifié, également désigné sous l'appellation d'écran flottant.

Le toit peut être soit de type supporté avec poteaux verticaux à l'intérieur de réservoir, soit de type autoportant sans poteaux, il est recommandé que ces poteaux soient de section tubulaire pour faciliter le déplacement du toit et la réalisation de l'étanchéité des puits.

La présence de toit fixe élimine les problèmes d'exploitations rencontrées sur les toits flottants externes dans les régions soumises à d'importantes chutes de neiges, à forte pluviométrie ou exposés au vent.

C- Les joints d'étanchéité

Le composant le plus important d'un toit flottant est le joint d'étanchéité installé sur son périmètre contre la robe du réservoir, ce joint doit :

- Fermer le plus efficacement possible l'espace annulaire compris entre la robe et le toit flottant pour empêcher les évaporations.
- Permettre au toit de coulisser librement dans la cuve pour suivre les fluctuations du liquide.
- posséder une capacité de déformation radiale suffisante pour s'accommoder des défauts de rotondité et de verticalité de la robe et des mouvements du toit sous l'action d'une force latérale (vent, turbulences du produit, etc.).

L'espace annulaire est en principe :

- 200 mm pour les toits flottants externes, valeur généralement portée à 300 mm pour les diamètres supérieurs à 80 m.
- internes 150 mm pour les toits flottants internes et lorsque le diamètre est supérieur à 50 m, on adopte 200 mm.

Les joints sont conçus pour permettre, en cas de nécessité, leur compression jusqu'à une largeur minimale de 75 mm en un point de la périphérie, tout en restant, bien entendu, au contact de la robe sur le reste de leur longueur.

Le système d'étanchéité d'un toit flottant est le plus souvent constitué d'un joint unique appelé joint primaire. Cette étanchéité principale peut être complétée, pour réduire encore les pertes de produit, par un autre joint de conception plus simple, placé au-dessus, et appelé joint secondaire. Trois types principaux de joints sont employés :

- joint métallique avec patins en tôle.
- joint élastique en mousse ou avec liquide.
- joint flexible à lèvre ou métallique.

C.1. Joint métallique

Il est constitué de patins flexibles en tôle d'acier galvanisé ou inoxydable formant une ceinture dont la partie basse trempe dans le liquide. Cette ceinture est maintenue au contact de la robe par un système de contrepoids.

L'étanchéité du volume, compris entre ces patins et le toit flottant, est assurée par une bande de caoutchouc synthétique placée en principe au-dessus de l'espace vapeur.

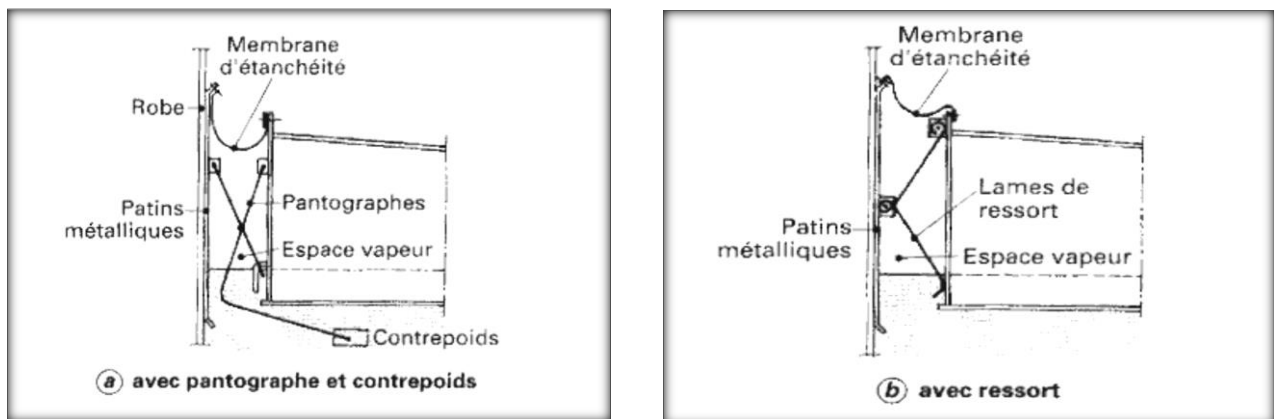


Figure II.9 : Joints métalliques

C.2. Joints élastiques

Ils comprennent deux versions : le joint mousse et le joint liquide. Ces deux joints comportent une enveloppe en tissu caoutchouté, fixée au toit flottant et remplie d'un matériau qui, par élasticité ou expansion, assure le contact entre la robe et le toit. Il s'agit :

- soit d'élément en mousse de polyuréthane élastique comprimée.
- soit d'un liquide qui, selon le régime des températures ambiantes, peut être un hydrocarbure (kérosène, fuel, huile, etc.) ou de l'eau.

Lorsqu'un joint secondaire n'est pas prévu, une protection atmosphérique doit être installée au-dessus des joints élastiques. Elle a pour but :

- d'empêcher la pénétration d'eau, de sable ou de débris dans le produit stocké et de protéger les enveloppes des effets atmosphériques.

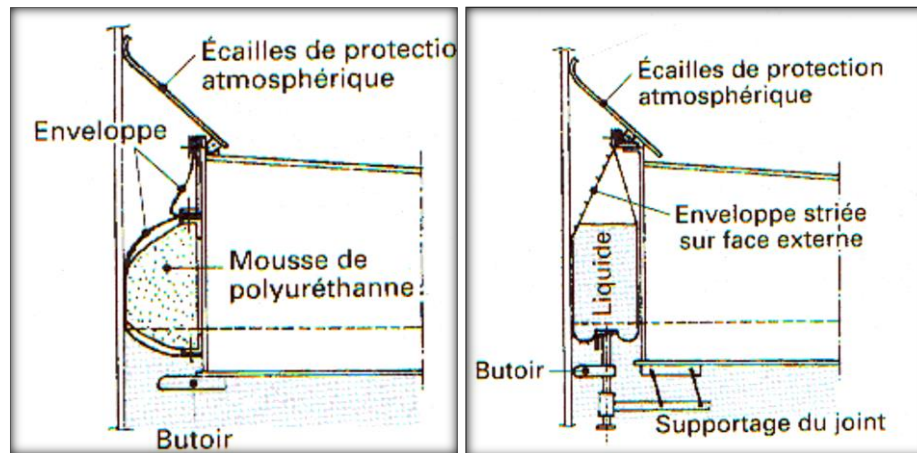


Figure II.10 : Joints élastiques

C.3. Joints flexibles

Ils existent en deux modèles : à lèvres ou métallique.

Le **joint flexible à lèvres** est réalisé par une simple bavette en caoutchouc synthétique comportant ou non une armature métallique interne. Ce joint est placé au-dessus de l'espace annulaire. Il est maintenu plaqué contre la robe par flexion.

L'armature interne, lorsqu'elle existe, a pour objet de conserver le joint à lèvres tourné vers le haut, y compris lorsque le toit flottant s'élève dans la cuve, au cours du remplissage du réservoir. Lorsque la bavette n'est pas armée, le joint, qui a une bonne position quand le toit descend, se retourne vers le bas dès que le toit monte et forme ainsi une gouttière qui favorise le passage dans le produit des eaux de pluie, du sable et des débris.

Le **joint flexible métallique** est constitué par un ensemble d'écailles, en tôles minces pliées, en acier galvanisé ou inoxydable, fixées sur le toit flottant. Par juxtaposition, elles forment une surface approximativement conique qui, par effet ressort, maintient contre la robe du réservoir.

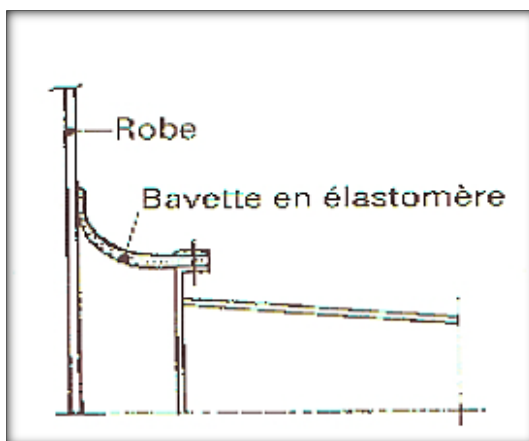


Figure II.11 : Joint flexible à lèvres

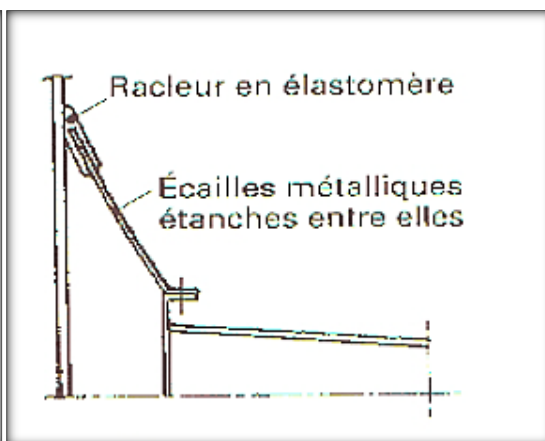


Figure II.12 : Joint flexible métallique

D. Béquille

D.1. Béquille à réglage fixe

Lorsque la hauteur du liquide ne permet plus de maintenir le toit en flottaison, son supportage est assuré par des béquilles.

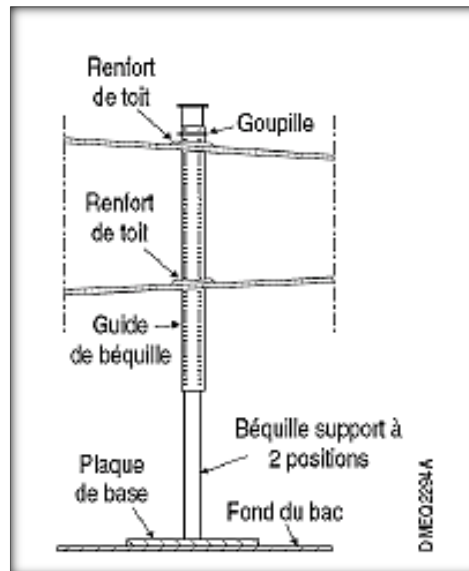


Figure II.13 : Béquille à réglage fixe

D.2. Béquille casse vide

Lorsque le toit repose sur les béquilles le bac se comporte comme un bac à toit fixe. Les évènements automatiques permettent au bac de respirer lorsque le toit est en position basse.

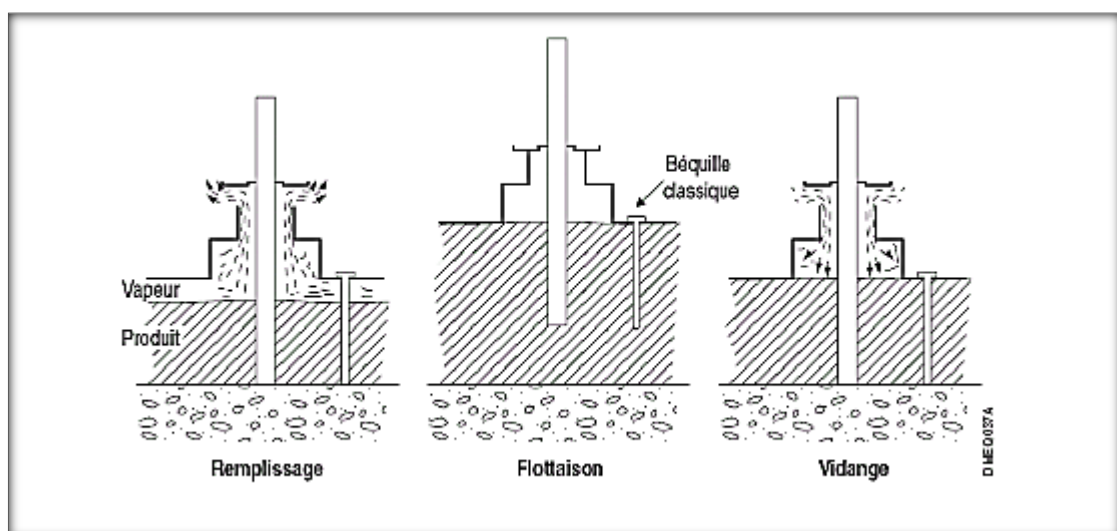


Figure II.14 : Béquille casse vide

II.2.2. Accessoires de bac

II.2.2.1. Accessoires de lutte contre la surpression

- **Event**

Chaque réservoir doit être posséder un évent ou soupape afin d'éviter toute surpression (ou de dépression) lors de remplissage (ou du la vidange) du réservoir. Ce système doit être installé au point le plus haut du réservoir et son débouché doit être situé dans une zone exempte de présence humaine. Son extrémité sera courbée ou charpentée afin d'éviter toute entrée d'eau dans le réservoir.

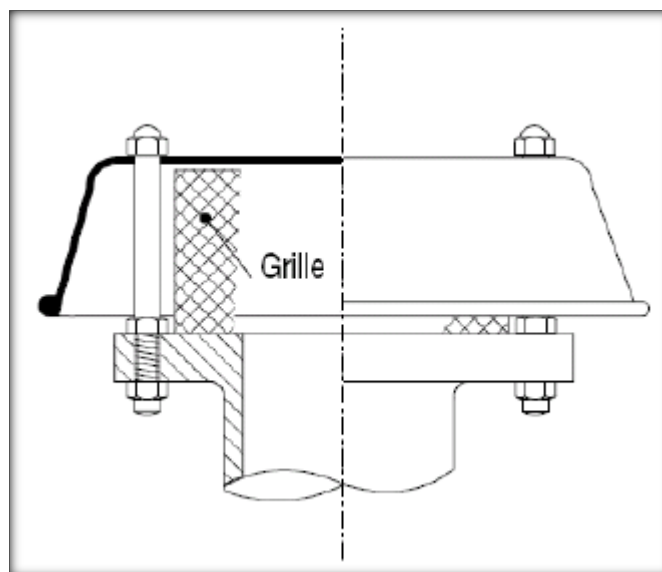


Figure II.15 : évent

- **Les soupapes**

Les soupapes jouent un rôle de sécurité particulière important dans les réservoirs à toit fixe. Elles ont pour rôle d'éviter les risques de surpression et de dépression incompatibles en permettant de maintenir la pression à l'intérieur de réservoir à des valeurs compatibles.

Elles sont le plus souvent à double valeurs de tarage ou double effet (protection contre la surpression et dépression).

Le choix d'une soupape s'effectue en fonction de débit de passage admissible et de la pression ou de la dépression que peut supporter le réservoir.

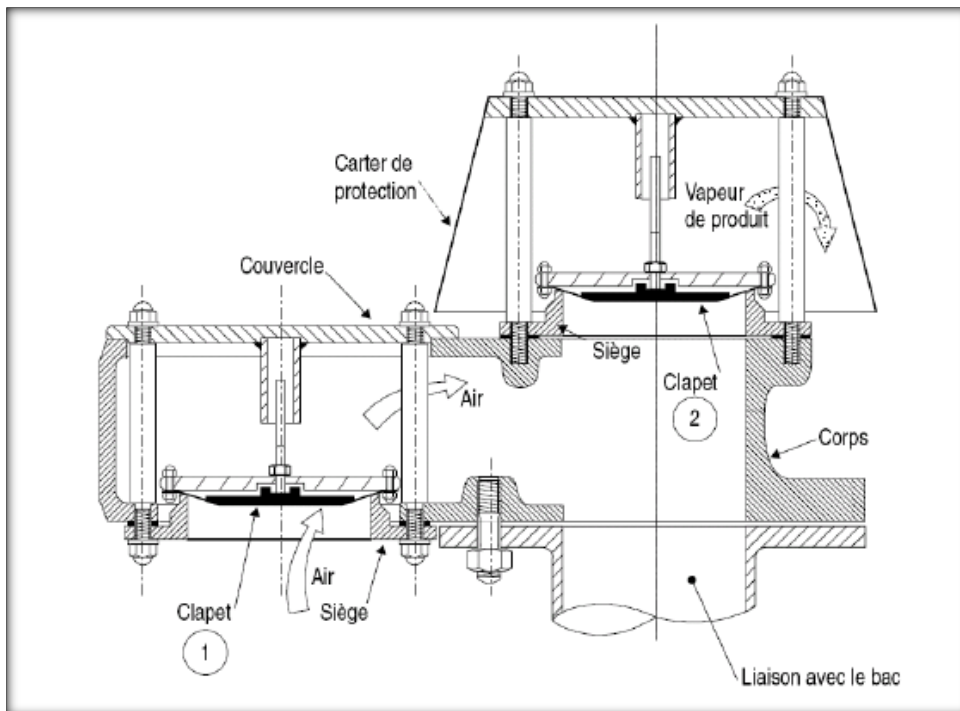


Figure II.16 : Exemple de soupape à double tarage

• **Protection contre les surpressions accidentelles**

Dans des circonstances exceptionnelles, telles qu'une explosion ou une défaillance de la soupape de sûreté ou une fausse manœuvre mettant en communication le réservoir avec une la destruction du réservoir. Les règlements imposent l'un des systèmes suivants :

- membrane de sécurité, constituée par un disque mince qui se déchire.
- clapet d'explosion, analogue à un opercule mobile de trou d'homme qui se soulève pour assurer l'échappement et se referme automatiquement dès que la pression est redevenue normale.
- tôle de déchirure qui est une tôle du toit dont l'assemblage aux tôles voisines est réalisé par un cordon de soudure très faible de sorte qu'en cas de surpression, c'est cette tôle qui se déchire préférentiellement.

II.2.2.2. Accessoires de lutte contre l'incendie

En cas d'incendie différents dispositifs peuvent être mis en action ; si le réservoir brûle, des rampes permettent de déverser de la mousse sur la surface en flamme et l'on doit procéder à l'arrosage du réservoir et des réservoirs voisins pour éviter une trop forte élévation de température, en même temps que l'on procède à la vidange le plus rapidement possible. Une autre technique consiste à souffler l'air dans le liquide pour refroidir la zone située immédiatement au- dessous de la

surface libre en feu ; la diminution de la température réduit la violence de l'incendie et permet une action plus rapide de la mousse.

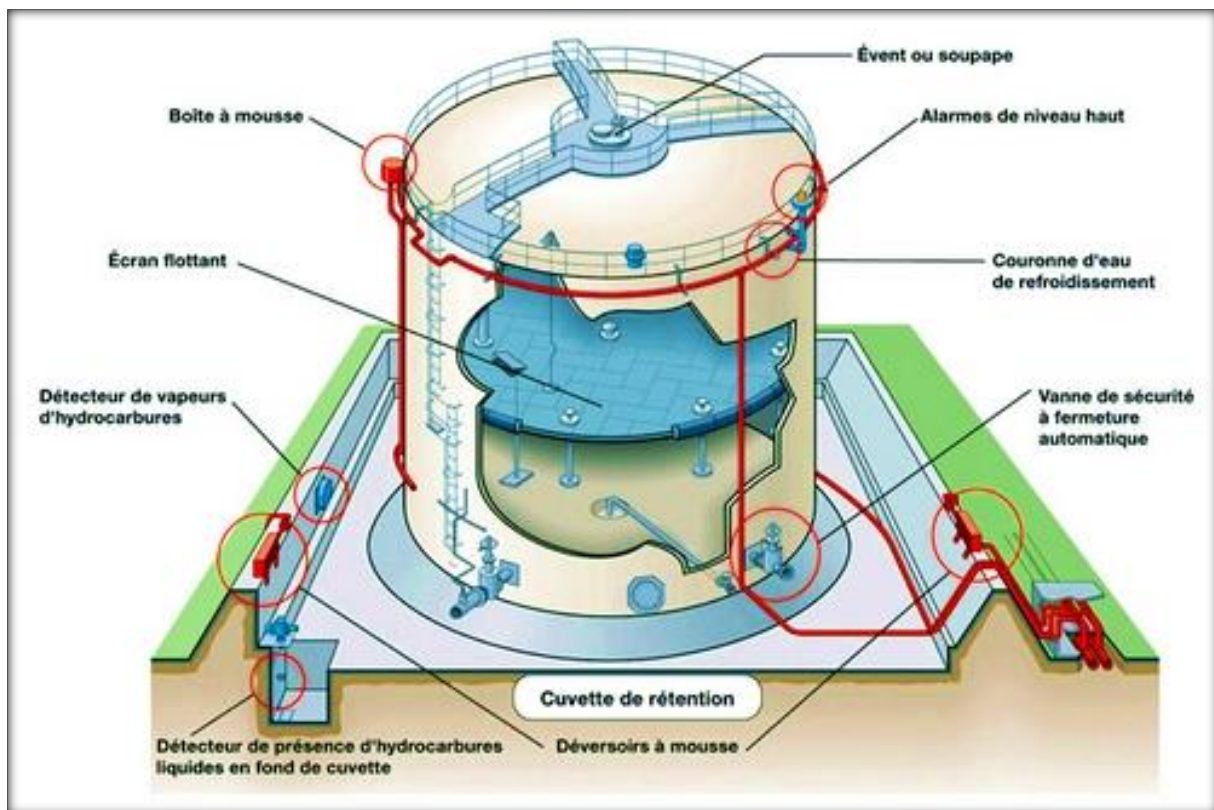


Figure II.17 : Exemple de protection contre l'incendie

• Cuvette de rétention

Les réservoirs sont implantés dans des cuvettes de rétention pour éviter que le contenu ne se répande n'importe où, en risquant l'incendie si le produit venait à s'approcher d'une flamme ; ces doivent être conformes aux règles d'aménagement des dépôts d'hydrocarbures.

II.2.2.3. Accessoires de mesure de niveau de produit

Pour répondre aux nécessités d'exploitation et aux exigences de la douane. Des accessoires sont prévus pour :

• Prélèvement d'échantillons

Pour des réservoirs sous pression ou à toit flottant, une trappe disposée sur le toit permet l'introduction de la bouteille spéciale de prise d'échantillons. Si le réservoir est sous pression. Il faut prévoir un sas.

- **Mesure du niveau**

Pour les mesures courantes et très approximatives, le règlement impose un niveau à flotteur dont le câble traverse le toit et par des poulies de renvoi et raccordé à un index se déplaçant devant une règle graduée fixée à la robe.

Pour les mesures de précision, on procède au jaugeage par descente d'une sonde fixée à l'extrémité d'un ruban étalonné. La hauteur du liquide est mesurée en plusieurs points et on fait la moyenne pour tenir compte des déformations possibles du fond. Dans le cas des réservoirs sous pression, la sonde doit nécessairement être introduite au moyen d'un sas analogue à celui des prises d'échantillons. Le jaugeage par sonde est toujours utilisé pour le calibrage des réservoirs en fonction de la hauteur d'emplissage ainsi que pour faire les relevés de débit lorsque l'on pratique un test sur une unité. Enfin, les indications des jauges permanentes par flotteur peuvent être retransmise jusqu'aux salles de contrôle.

II.2.2.4. Accessoires de visite et de nettoyage

La visite se fait par des trous d'homme dont la construction est également normalisée. Ces accessoires permettent le nettoyage et l'élimination des boues, sédiments, de la rouille et de l'eau qui peuvent s'accumuler au fond.

Les opérations de nettoyage sont délicates et nécessitent un dégazage soigné du réservoir.

Cette opération peut se faire, par exemple, par l'adaptation sur un trou d'homme du toit d'un ventilateur aspirant à l'intérieur du réservoir, après ouverture des trous d'homme de la basse de la robe. Plus simplement. On opère le dégazage à la vapeur d'eau.

Il existe des dispositifs automatiques de projection de produit de nettoyage sur les parois et également des procédés d'extraction automatique des boues.



Figure II.18 : Trou d'homme

II.2.2.5. Accessoires d'accès

Ils comportent : escaliers, garde-corps, passerelles. Ils ont été standardisés par le bureau de normalisation du pétrole (BNP).

II.2.2.6. Accessoires de réchauffage

Dans le cas des produits lourds et visqueux, il faut prévoir soit le maintien en température, soit la possibilité de réchauffer, ainsi que bien entendu le calorifugeage complet du réservoir on utilisera à cet effet soit une nappe de tube disposés sur le fond et alimentés en vapeur d'eau, soit des réchauffeurs locaux sur la sortie du produit.

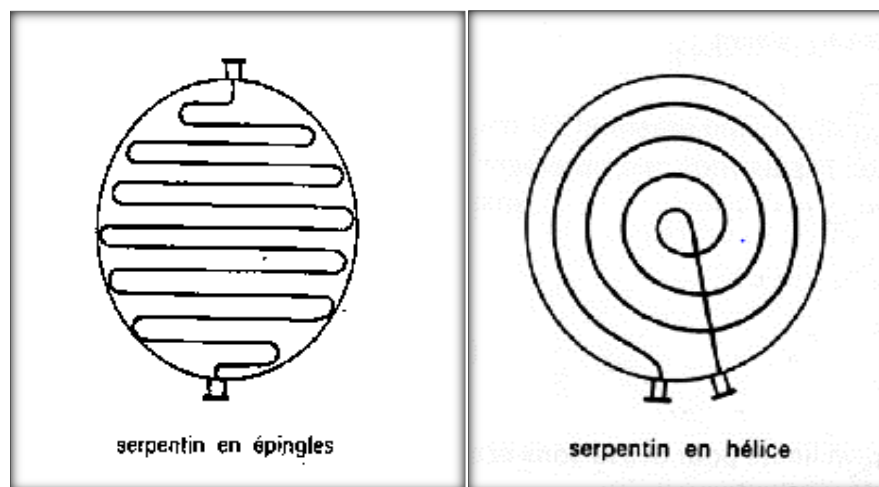


Figure II.19 : Les serpentins de réchauffage

II.3. Stockage des gaz liquéfiés

II.3.1. Stockage cryogénique

II.3.1.1. stockage aérien

Un bac de stockage cryogénique est composé de 2 enveloppes :

- **une enveloppe intérieure** souple en matériau résistant aux basses températures (Aluminium, Acier à 9% de nickel), Acier inoxydable)

Dans le système Technigaz une membrane gaufrée confère la souplesse nécessaire pour absorber les contractions lors de la mise en froid.

- **une enveloppe extérieure**, en acier de qualité courante ou quelquefois en béton armé précontraint, qui assure la résistance mécanique.

Le toit intérieur est généralement plat et suspendu au toit bombé de la cuve externe. Entre les enveloppes un matériau isolant diminue l'échange thermique entre le liquide stocké et l'atmosphère qui a tendance à être très fort en raison de la grande différence de température.

Les efforts mécaniques sont reportés par l'intermédiaire de l'isolant sur l'enveloppe externe.

L'isolant latéral est de la perlite, du chlorure de polyvinyle expansé à cellules fermées ou plus rarement de la laine de verre.

L'isolation du fond peut être constituée de blocs de 'Foam Glass'. Celui-ci repose soit sur des pieux soit à même le sol ce qui nécessite un réchauffage électrique afin d'éviter les déformations dues au gel.

S'il y a rupture de la paroi interne, l'enveloppe externe permet de contenir le gaz liquéfié.

Pour accroître la sécurité, généralement cette enveloppe ne comporte aucune ouverture dans ses parois latérales ou son fond.

Toutes les canalisations (conduites de remplissage, du gaz d'évaporation, de fluide auxiliaire) pénètrent dans le réservoir par le dôme.

Les pompes de vidanges sont donc immergées.

Afin d'éviter des stratifications dans le contenu du réservoir, le remplissage peut être fait à la fois par le haut 'en pluie' ou par le bas 'en source' par une conduite descendant jusqu'au fond du réservoir.

L'espace entre les 2 enveloppes peut être balayé par de l'azote pour éviter l'accumulation du gaz en cas de fuite.

Ces réservoirs sont équipés de tous les appareils instruments et accessoires permettant leur exploitation en sécurité :

- mesure de niveau et de température.
- mesure et régulation de la pression dans le bac (50 mbar).
- mesure et régulation de la pression d'azote inter barrière (20 mbar) et système de détection des fuites.
- soupapes de surpression (50 mbar) et de dépression (-5 mbar) sur le bac en cas de défaillance.
- soupapes de surpression inter barrière.
- circuit d'arrosage au sommet de coupole.

Le stockage à basse température du produit provoque en continu une légère évaporation qui permet de maintenir la température constante. IL est nécessaire de recondenser ces vapeurs pour limiter les pertes au stockage ce qui nécessite :

- un compresseur dans le cas de propylène-propane.
- un cycle frigorifique dans le cas de produits plus volatils tels que l'éthylène.

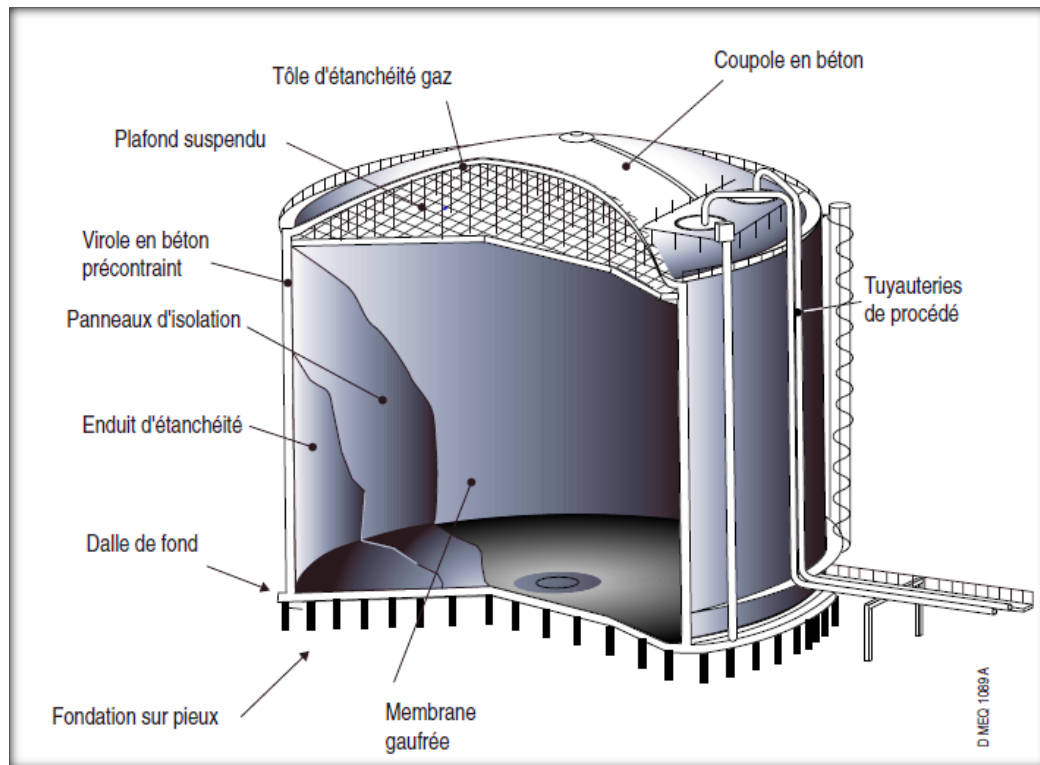


Figure II.20 : Bac de stockage cryogénique

II.3.1.2. Stockage en cavités réfrigérées

Creusées à la surface du sol, elles ont leurs parois réfrigérées à la température de liquéfaction du gaz stocké.

Elles exigent la mise en place et le fonctionnement permanent d'appareils de réfrigération qui compensent les pertes calorifiques.

II.3.2. Stockage aérien sous pression

La pression de stockage est la tension de vapeur à la température ambiante et dépend uniquement :

- de la mesure du produit.
- des conditions atmosphériques.

II.3.2.1. Réservoirs cylindriques (les cigares)

Ils peuvent être installés verticalement ou horizontalement. Ils ont une capacité limitée (jusqu'à 500 m) et sont très sensibles à la mise sous vide.

Les équipements rencontrés sur ces capacités sont identiques à ceux équipant les sphères.

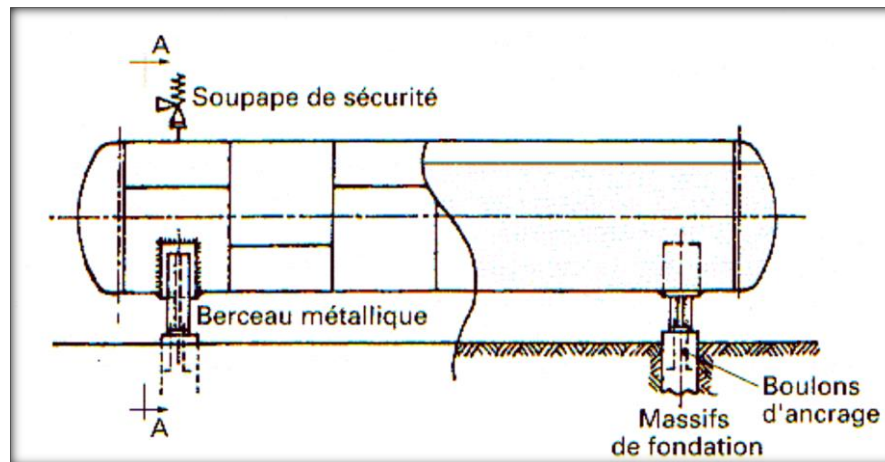


Figure II.21 : Exemple de cigare

II.3.2.2. Les sphères

C'est la forme idéale pour résister à la pression car c'est sur ce type de coque que le niveau des contraintes de membrane reste le plus faible ; c'est ainsi que l'épaisseur d'une enveloppe sphérique est, par exemple, moitié moindre que celle d'une enveloppe cylindrique de même diamètre soumise à la même pression et réalisée avec le même matériau. C'est aussi la forme géométrique qui présente la plus petite surface de paroi pour un volume donné. Par ailleurs, l'implantation de ces ouvrages nécessite moins de place au sol que les réservoirs cylindriques horizontaux. Toutes ces propriétés contribuent à rendre ces réservoirs très économiques et bien adaptés aux stockages sous pression de grandes capacités.

Les sphères supportent également très bien d'importantes dépressions internes pouvant aller jusqu'au vide total. Comme pour les cigares, les pertes de produit dues à la variation de la température ambiante ou aux mouvements de produit sont nulles.

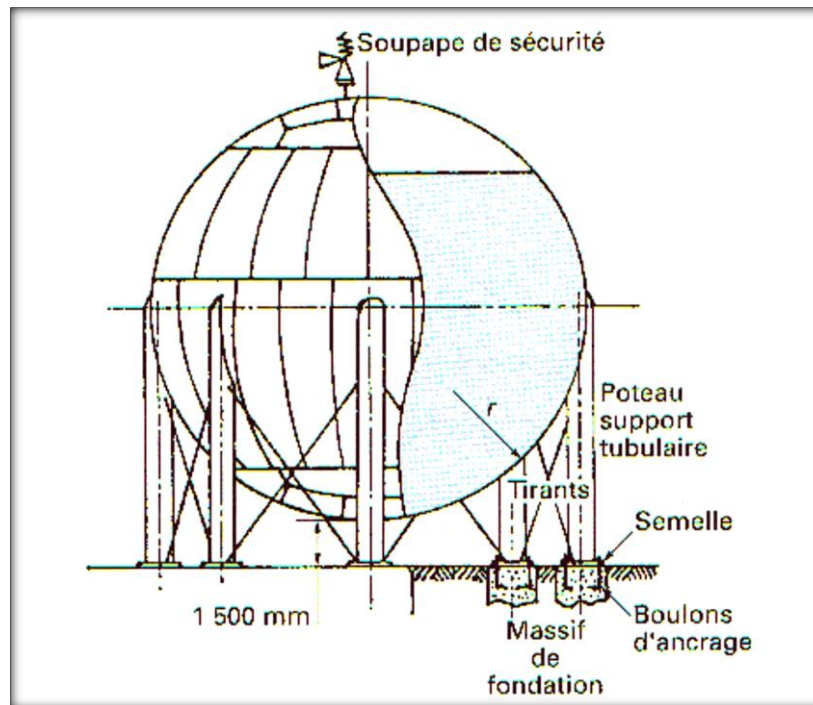


Figure II.22 : Exemple de sphère

II.3.2.3. Stockage réfrigérés sous pression

Dans le cas actuel des techniques, les stockages réfrigérés sont essentiellement aériens et concernent les sphères et les cigares. Il est bien entendu calorifugés.

Le stockage à basse température du produit provoque en continu une légère évaporation qui permet de maintenir la température constante. Comme pour les stockages cryogéniques, les vapeurs émises doivent être recondensées pour minimiser les pertes.

II.3.3. Stockage souterrains et sous talus sous pression

II.3.3.1. Stockage sous terrain

Les gaz liquéfiés sont stockés dans des cavités creusées dans la roche (calcaire, craie, ...) à partir d'un puits central ou à partir d'une rampe d'accès.

Généralement les cavités sont constituées d'un réseau de galeries.

La profondeur de stockage est telle que la pression hydrostatique créée par l'eau assurant l'étanchéité est toujours supérieure à la tension de vapeur du gaz liquéfié. Les mouvements de produits sont assurés par des pompes et canalisations descendues dans les cavités par les puits d'exploitation. Des pompes d'exhaure de grande quantité de gaz liquéfiées en toute sécurité. En sortie l'élimination de l'eau est nécessaire :

- coalesceur jusqu'à une teneur de 0.04%.
- sécheur à chlorure de calcium pour atteindre les spécifications.

II.3.3.2.Stockage sous talus (réservoirs sous talus : RST)

Il s'agit de réservoirs dont les parois sont recouvertes avec une couche protectrice à l'égard des effets thermiques et mécaniques. Cette couche protectrice à une épaisseur minimale de 1 m de matériau dense et inerte (terre, sable, matériau composite).

Généralement tous les piquages et canalisations débouchent de la paroi en partie haute ce qui nécessite des pompes des soutirages immergés.

Dans le cas où le pompage est de type « soutirage en point bas » sans pompe immergée. La présence d'un clapet hydraulique de fond est exigée. De plus sur la ligne de soutirage une vanne à boisseau sphérique, à sécurité positive, est installée en casemate et asservie à un détecteur de haut débit. Une autre vanne à sécurité positive est installée à 3 m plus loin sur la ligne.

II.3.3.2.1.Sphère sous talus

La sphère est abritée sous un cocon autoporteur ou talus en « Texsol » : mélange de sable et de fils polyester de masse volumique $=1.9 \text{ t/m}^3$.

Cette technique, mise au point par TOTALGAZ, s'applique aussi bien à des sphères neuves qu'à des sphères existantes.

La sphère repose sur un « coquetier » en béton .Cette dalle repose sur 84 pieux forés à 30m de profondeur.

L'ensemble des équipements est positionné sur trois trous d'homme de 30 '' de diamètre situés au sommet de la sphère. Le transfert vers les autres sphères du dépôt s'effectue par 2 tuyauteries de 8 '' en phase liquide et une tuyauteries de 4 '' en phase gazeuse.

II.3.3.2.2.Réservoirs cylindriques sous talus

Après construction, ils sont protégés par un revêtement spécial puis recouvert (à l'exception des trous d'homme des tuyauteries ou de visite) de sable ou de terre compacté (2 t/m^3 à 2.3 t/m^3).

A.Réservoirs sur lit de sable

Pour éviter des fondations profondes (comme par exemple, celles des pieds des sphères), une partie de l'enveloppe cylindrique est utilisée pour répartir, largement et uniformément les charges sur un berceau de sable compacté, formant fondation. Cela permet de limiter la pression de sol (0.5 à 2 bar).

Les diamètres couramment utilisés pour ce type de réservoir cylindrique varient de 6 m à 8.5 m selon les capacités demandées et les longueurs disponibles.

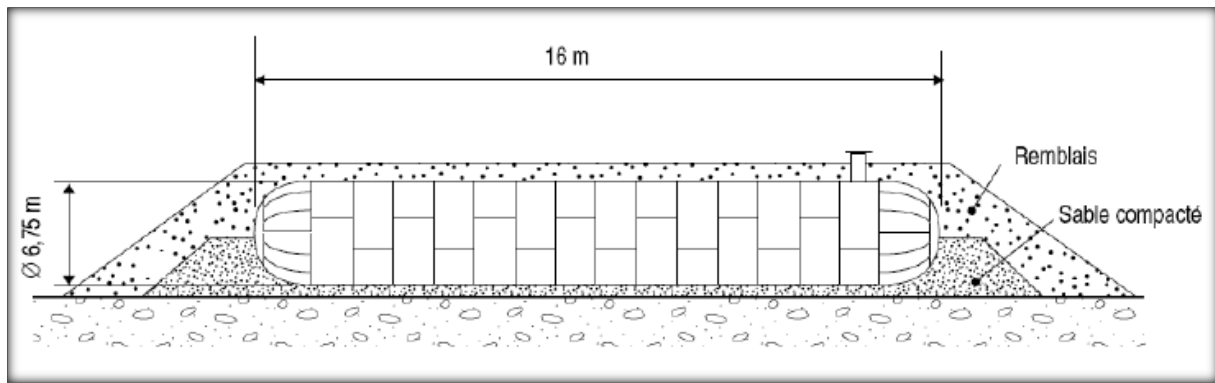


Figure II.23 : Réservoirs cylindrique sur lit de sable

B. Réservoir sur supports

Ces réservoirs reposent sur deux massifs en béton armé. On rencontre également une technique de supportage constituée de poteaux métalliques soudés à leur partie supérieure sur les flancs du réservoir, leur partie inférieure (pieds) reposant sur une dalle de répartition en béton armé construite au niveau du sol.

II.3.4. Protection contre les risques d'incendie des réservoirs

II.3.4.1. Rampes de pulvérisation

La protection incendie des réservoirs aériens est assurée par des rampes de pulvérisation d'eau permettant le refroidissement des parois (en particulier de celles situées au-dessous du niveau liquide).

II.3.4.2. Système déluge

Dans certaines installations, des systèmes « déluge » zénithaux permettent d'arroser les réservoirs avec une grande quantité d'eau. L'eau ruisselle du sommet du réservoir (sphère en particulier) puis le long des zones d'attaches des supports.

II.3.4.3. Cuvette de rétention

Destinée à confiner une fuite de gaz liquéfiés, la cuvette de rétention est déportée pour éviter l'accumulation sous la capacité de stockage. De plus le sol est en pente pour permettre l'écoulement de la fuite vers un lieu 'sans risque'.

Isolation anti-incendie :

La protection d'un réservoir par un isolant thermique (calorifuge) ou un matériau anti-feu permet de limiter les risques en cas d'incendie.

II.3.4.4. Protection par enceinte en béton armé ou enfouissement

Certains sphères sont protégées contre les « missiles » (débris dus à l'explosion d'un équipement voisin) .Cette technique assure aussi une protection contre les radiations d'un incendie voisin mais n'a aucun effet positif en cas d'incendie sous la sphère.

Le stockage sous talus, mis à part les problèmes de corrosion, est une excellence solution car l'exposition aux flux thermiques est moindre.

II.4. Conclusion

Malgré les différents avantages qui représente les bacs de stockage mais leur exploitation représente toujours des inconvénients et pose beaucoup de problème tel que la corrosion, les incendie, les pertes par évaporationetc.

Dans le chapitre suivant, on va s'intéressé au phénomène des pertes par évaporation durant le stockage des produits pétroliers, leurs conséquences ainsi les moyens de les réduire.

III.1.Introduction

L'exploitation des réservoirs pose de nombreux problèmes d'ordre économique, environnemental et sécuritaire. Parmi elles les pertes des produits pétroliers par évaporation, on les appelle également les COV (composés organiques volatiles). Ces pertes sont dues au remplissage, soutirage, respiration...etc et peuvent engendrer des conséquences graves à plusieurs échelles.

Dans ce chapitre, on présentera les types de ces pertes, leurs impacts, les paramètres qui influent sur l'évaporation de ces pertes et les moyens de les réduire.

III.2.Définition de l'évaporation

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène est donc une vaporisation progressive qui a pour effet d'absorber des calories et donc de réduire la température de l'environnement.

III.3.Paramètres qui influent sur l'évaporation

Certaines conditions ou paramètres peuvent favoriser ou accélérer le processus d'évaporation, ces paramètres sont :

III.3.1.Température

Un temps chaud permettra à la masse de produit de se réchauffer et d'augmenter l'énergie cinétique de ces molécules. Un plus grand nombre de molécules auront alors l'énergie suffisante pour s'arracher à la surface de pétrole brut pour s'évaporer.

III.3.2.Pression atmosphérique

Quand la pression atmosphérique de l'air est faible, l'air pousse moins fort sur la surface de pétrole. Les molécules de pétrole auront alors plus de facilité à s'arracher de la surface de produit pour se retrouver à l'état de vapeur.

III.3.3.Humidité

Lorsque l'humidité relative est faible, l'air est loin d'être saturé en vapeur d'eau. Dans ce cas, il est possible d'ajouter beaucoup plus de vapeur d'eau par évaporation que lorsque l'humidité relative est forte.

III.3.4.Vent

L'évaporation des produits volatiles dans les bacs de stockages dépendent aussi de vent, à noter que pour les vitesses de vent plus importantes les émissions du bac à toit flottant seraient plus importantes.

III.3.5.Grand surface

Une grande surface de liquide facilite l'évaporation car dans ce cas, un plus grand nombre de molécules de liquide ont la possibilité de se détacher de la masse de liquide plus facilement.

III.3.6.La nature de liquide stocké

L'évaporation dépend de la nature de liquide stocké, elle augmente quand le liquide stocké est plus volatil.

III.3.7.Tension de vapeur

Quand la tension de vapeur augmente, l'évaporation augmente.

III.3.8.La quantité transféré annuellement

L'évaporation augmente proportionnellement avec l'augmentation de la quantité transférée.

III.4.Les COV et les pertes par évaporation

Les COV sont des substances organiques formées essentiellement de carbone (C) et d'hydrogène (H) et accessoirement des éléments O, S, P, N, Cl. Ils passent facilement à l'état de gaz. Ces composés peuvent avoir une toxicité directe aigue ou chronique sur la santé. De plus, ils forment une classe de polluants atmosphériques très importante à cause de leur pouvoir de destruction de la couche d'ozone, par exemple : les solvants (heptane, hexane, benzène), mercaptans, alcools...etc.

Les pertes par évaporation des produits pétroliers durant le stockage tel que l'essence sont considéré somme des COV car ces vapeurs contiennent des produit toxique tel que le benzène, toluène, qui peuvent causées beaucoup de problèmes sur la santé et l'environnement.

III.5.L'impact des COV et les pertes par évaporation

III.5.1.Les impacts sanitaires

Les impacts directs des COV sur la santé font principalement suite à leur inhalation. Les COV sont à l'origine de divers troubles dont la fréquence, le délai d'apparition varie selon le temps d'exposition, le type de polluants, la dose inhalée, mais aussi selon des caractéristiques de l'individu.

Les COV peuvent provoquer des irritations cutanées, oculaires, respiratoires, des maux de tête, des troubles cardiaques, digestifs, rénaux, hépatiques et du système nerveux central comme des troubles de la vision et de la parole, des problèmes de concentration ou de mémoire. Certains COV ont également des propriétés cancérogènes (benzène, formaldéhyde).

Ainsi, vu les risques sanitaires encourus, l'INERIS (Institut National d'Etudes des Risques Industriels et Sanitaires) fixe pour certains composés, une valeur limite de seuil d'exposition pour protéger les utilisateurs de solvants à des expositions chroniques (VME) ou aigues (VLE). La VME (Valeur Moyenne d'Exposition) est la concentration moyenne maximale admissible pondérée pour une durée de travail de 8 heures/jour et de 40 h/semaine ; la VLE (Valeur Limite d'Exposition) est la concentration maximale ne pouvant être dépassée pour une exposition supérieure à 15 minutes. Le tableau (III.1) présente ces valeurs pour un certain nombre de COV.

Composés	VLE (mg/m ³)	VME (mg/m ³)
Benzène	25	5
Acétone	ND	750
Dichlorométhane	100	50
Formaldéhyde	1	0.5
Hexane	ND	50
Méthanol	1000	200
Trichloréthylène	200	7.5
Toluène	150	100
Xylène	150	100

Tableau III.1 : Les VME et VLE pondérée pour une durée de travail de 8 heures/jour et de 40 h/semaine

III.5.2.Les impacts sur l'environnement

III.5.2.1.Pollution photochimique

L'azote (O_3) est naturellement présent dans l'atmosphère. Ses concentrations dans l'atmosphère ne sont pas constantes. En effet, la quantité d'ozone est plus importante dans la stratosphère (10 à 50 Km) que dans la troposphère (0 à 10 km).

Naturellement, l'ozone troposphérique provient de l'oxygène présent dans l'air et d'un atome d'oxygène issu de la dissociation du dioxyde d'azote (NO_2) sous l'effet du rayonnement solaire. Cet ozone réagit ensuite avec le monoxyde d'azote formé pour reformer le dioxyde d'azote complétant ainsi le cycle de Chapman (Figure III.1) en éliminant l'ozone.

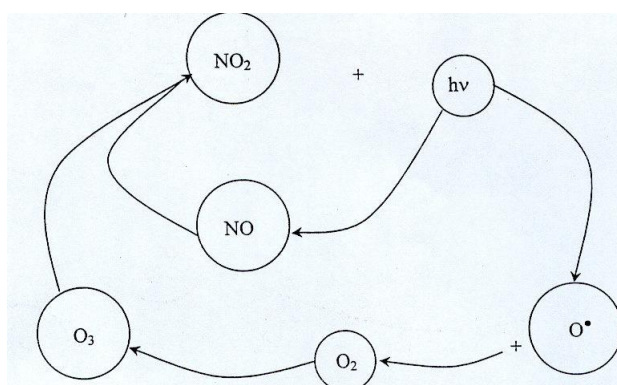


Figure III.1 : Cycle de Chapman

Sous l'effet du rayonnement solaire, les COV peuvent libérer des espèces oxydantes influant sur notre climat. En revanche, les radicaux générés par la présence de COV induisent un déséquilibre dans le cycle de Chapman.

Effectivement, le monoxyde d'azote réagit alors avec les radicaux pour former du dioxyde d'azote et bloquent ainsi la capacité du monoxyde d'azote à détruire l'ozone, ce qui provoque indéniablement l'augmentation d'ozone dans la troposphère.

L'ozone troposphérique a un effet sur la santé et l'environnement puisqu'il endommage les arbres et les cultures, irrite les yeux et engendre des maladies respiratoires.

III.5.2.2.Effet de serre

La température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement IR renvoyé dans l'espace. L'effet de serre est le phénomène naturel lié à l'absorption du rayonnement IR renvoyé par la couche terrestre par des composés tels que le CO₂, CH₄ mais aussi de l'ozone, les composés chlorés Ces gaz interfèrent avec les rayons IR en les empêchant de s'échapper vers l'espace, ce qui provoque une hausse des températures.

La part de l'ozone participant à l'effet de serre total est estimée à 18 % sur l'ensemble de la planète. A ce titre, une réduction de 70 à 80 % de la teneur en COV est estimée indispensable pour réduire significativement les concentrations élevées en photo-oxydants.

III.5.3.Les impacts économiques

Les produits pétroliers sont vendus et exportés à l'étranger donc toutes pertes de produits par évaporation entraînent une perte de coût.

III.5.4.Les impacts sur la sécurité

Les pertes par évaporation d'hydrocarbures légers lors de leur stockage conduisent à une augmentation des risques d'explosion et d'incendie (chapitre 4).

III.6.Les types de pertes par évaporation dans les réservoirs de stockages

III.6.1.Réservoir à toit fixe

Un réservoir à toit fixe n'est jamais complètement rempli de liquide et il existe toujours au-dessus du produit stocké un espace gazeux, composé d'un mélange d'air et de vapeur émise par le liquide. Ces émissions de vapeur sont de deux types :

- Pertes générées au remplissage.
- Pertes par respiration.

III.6.1.1. Perte par respiration

Au cours de la journée, lorsque le soleil chauffe le réservoir, le liquide s'évapore et la pression dans le réservoir s'élève. Les réservoirs à toit fixe ne sont conçus que pour de faibles surpressions de l'ordre de 5 à 25 mbar. Ces valeurs ne permettent pas de contenir, sur une journée, l'expansion provoquée par cet échauffement et le mélange air-vapeur doit être évacué dans l'atmosphère au travers des événements de toit.

Tout au contraire, le soir et durant la nuit quand la température baisse, les vapeurs se condensent et de l'air extérieur doit être admis dans le réservoir, par les événements de toit, pour éviter que la structure ne soit soumise aux effets d'une dépression interne. Cet air se mélange ensuite, jusqu'à saturation, avec la vapeur émise par le liquide et, au cours de l'expiration du jour suivant, une nouvelle quantité de produit sera expulsée dans l'atmosphère.

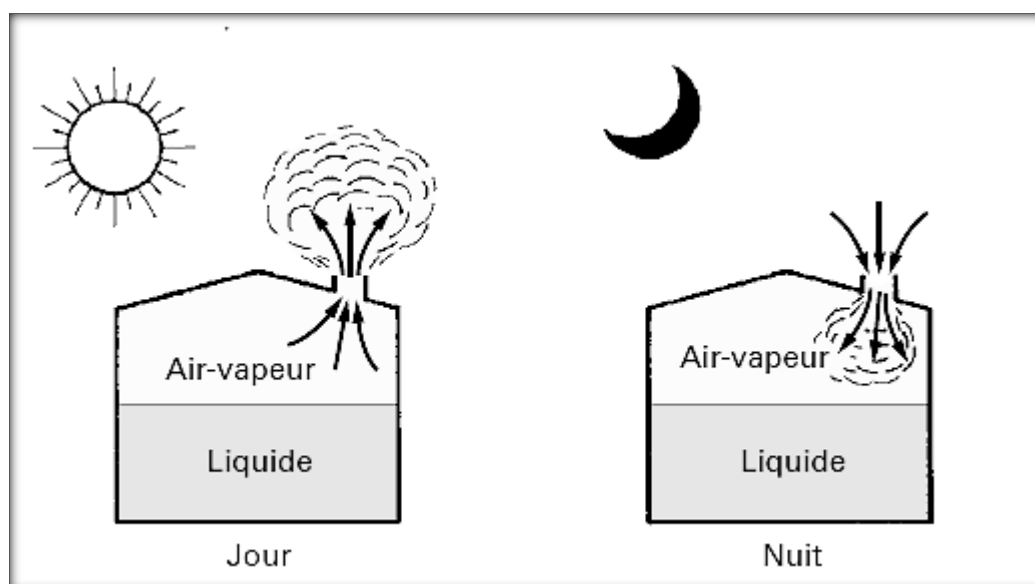


Figure III.2 : Perte par respiration

III.6.2. Perte par mouvement

Lorsque l'on soutire du liquide, de l'air est également aspiré dans l'espace vapeur, et un nouvel équilibre du mélange air-vapeur se crée en provoquant une évaporation du liquide qui conduit à une réduction du volume stocké. Par ailleurs, quand on remplit le réservoir, le mélange riche air-vapeur est expulsé à l'extérieur par les événements et perdu dans l'atmosphère.

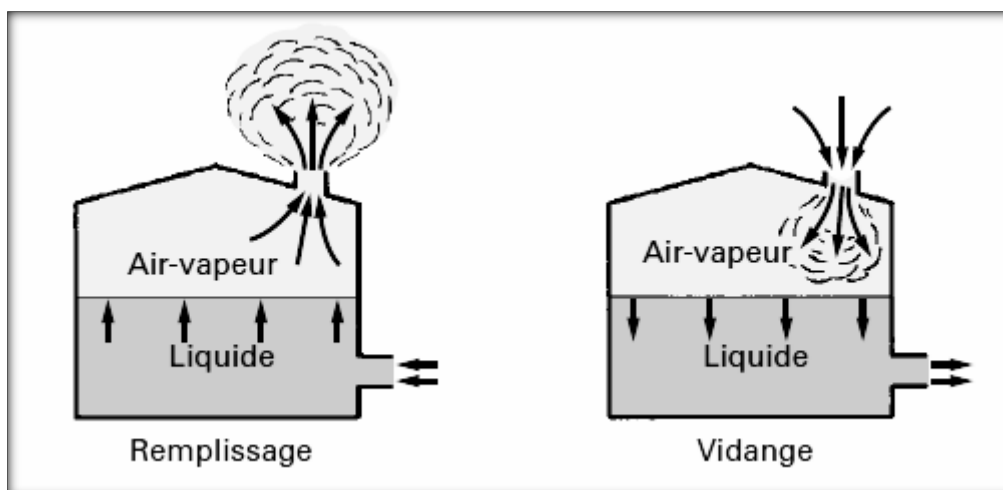


Figure III.3 : Perte par mouvement (remplissage)

III.6.2.Bacs à toit flottant

Les pertes qui subsistent encore sur les toits flottants sont peu importantes et n'ont aucune commune mesure avec celles constatées sur les réservoirs à toit fixe. Les deux types de pertes que l'on observe sont :

- les pertes de positionnement.
- les pertes de mouillage au soutirage.

III.6.2.1.Les pertes de positionnement

Les pertes de positionnement sont inhérentes à l'imperfection de l'étanchéité sur les joints annulaires et les accessoires de service traversant la structure tels que les pieds supports réglables, les puits de jauge ou de guidage, les poteaux du toit fixe, etc. Ce type de fuite est permanent et intervient même lorsque le toit est en stationnement sans aucun mouvement de produit.

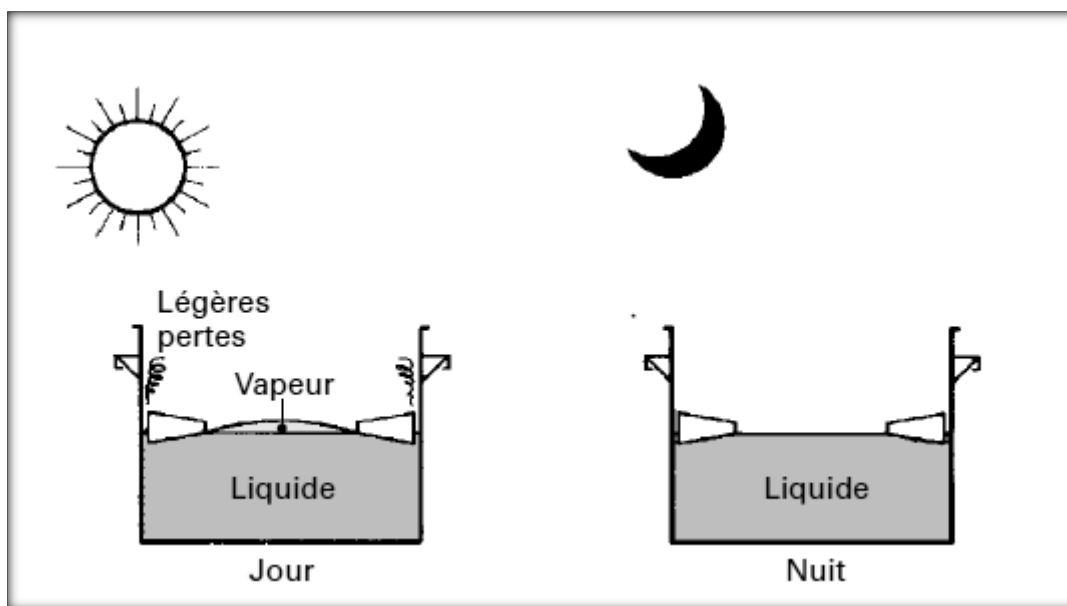


Figure III.4 : Perte par positionnement

III.6.2.2. Les pertes de mouillage au soutirage

Les pertes de mouillage au soutirage ont le résultat de l'évaporation du film de liquide déposé sur les parois de la cuve et des accessoires à l'occasion de la descente du toit, au cours de la vidange du réservoir.

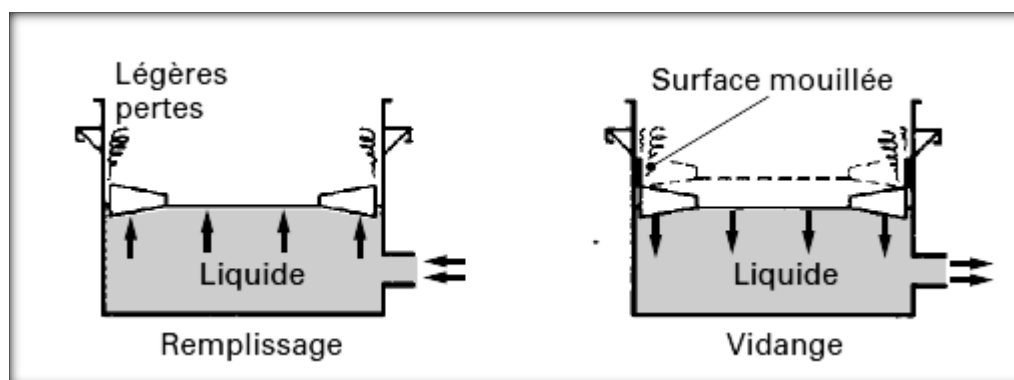


Figure III.5 : Perte de mouillage au soutirage

III.7. Technique de réduction des émissions des COV

Il existe deux principes de traitement des COV : l'oxydation (destruction) et la récupération.

III.7.1. Techniques de destruction

III.7.1.1. L'oxydation des COV

Tous les COV peuvent être transformés par oxydation totale en composés inorganiques. Les produits d'oxydation dépendent du COV à détruire. Selon la composition du COV à oxyder.

Les composés formés sont soit uniquement du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau (H_2O), soit un mélange de CO_2 , de H_2O et d'autres produits d'oxydation. Parmi ces derniers figurent par exemple le NO, le HCl, le SO_2 ainsi que les dioxines (polluants secondaires). Dans ce cas, un traitement des fumées en aval de l'incinérateur est éventuellement à prévoir.

Par le mode de mise en œuvre et le mode de récupération d'énergie, on distingue les quatre configurations suivantes : l'oxydation thermique régénérative, l'oxydation thermique récupératrice et l'oxydation thermique catalytique.

L'oxydation thermique récupératif : Le procédé consiste à porter les effluents, par chauffage direct grâce à un bruleur, à une température supérieure à 750 degré C. À cette température, une grande partie des COV est détruite par auto-combustion. Dans cette configuration, les gaz à traiter sont préchauffés au sein d'un échangeur primaire par les gaz traités. Cet échangeur a une efficacité limite de 60 à 70% pour éviter que l'auto-inflammation des polluants ne se produise avant le foyer. De ce fait, la température des effluents à la sortie de cet échangeur est relativement élevée et peut atteindre 350 à 500 degré C. un échangeur secondaire peut donc être prévue afin de récupérer une partie de l'énergie de ces gaz par l'intermédiaire d'un fluide auxiliaire (huile, vapeur...).

III.7.1.2.Procédés d'irradiation

III.7.1.2.1.Rayonnement UV (photo-oxydation)

La destruction des COV gazeux est réalisée en les exposant à de la lumière UV haute intensité, leurs liens chimiques sont ainsi brisés. On peut aussi oxyder les COV en les mettant en contact avec des oxydants tels que l'ozone, les peroxydes sous un rayonnement ultraviolet de 150 à 250 nm.

III.7.1.2.2.Faisceaux d'électrons

Ce procédé est basé sur le bombardement des COV, à température ambiante, par des électrons à haute vitesse créant des radicaux libres qui rompent les liaisons chimiques. La technique de faisceau d'électrons a montré son efficacité, de l'ordre de 99% pour l'abatement du trichloréthylène, du tétrachlorure de carbone et du benzène.

III.7.1.3.Traitement biologiques

Cette technique n'est applicable que si les COV étudiés solubles dans l'eau, biodégradables et en concentration acceptable, les COV peuvent être dégradés par des micro-organismes, vivant en suspension dans la solution ou sur un support solide, à qui ils servent d'éléments nutritifs en présence d'oxygène. Les micro-organismes utilisent les composés organiques comme source d'énergie indispensable à la dégradation d'un substrat (catabolisme) et comme source de carbone pour leur biosynthèse (métabolisme).

L'oxydation complète d'un substrat carboné organique conduit à la formation de biomasse et de composés minéraux (CO_2 et NO_x).

Les micro-organismes sont pour la plupart des bactéries, des champignons, des moisissures, des levures ou des algues microscopiques.

La dégradation s'effectue toujours en deux étapes : absorption des COV puis oxydation des COV. On distingue plusieurs types de procédés, parmi elles les bio-laveurs.

Dans les bio-laveurs, l'étape d'absorption s'effectue dans une colonne de lavage et elle permet un transfert continu des polluants de la phase gazeuse vers la phase liquide (le solvant le plus fréquemment utilisé est l'eau). L'étape de dégradation biologique se déroule dans un compartiment de régénération contenant de la biomasse. Ce compartiment assure l'élimination et l'oxydation des COV.

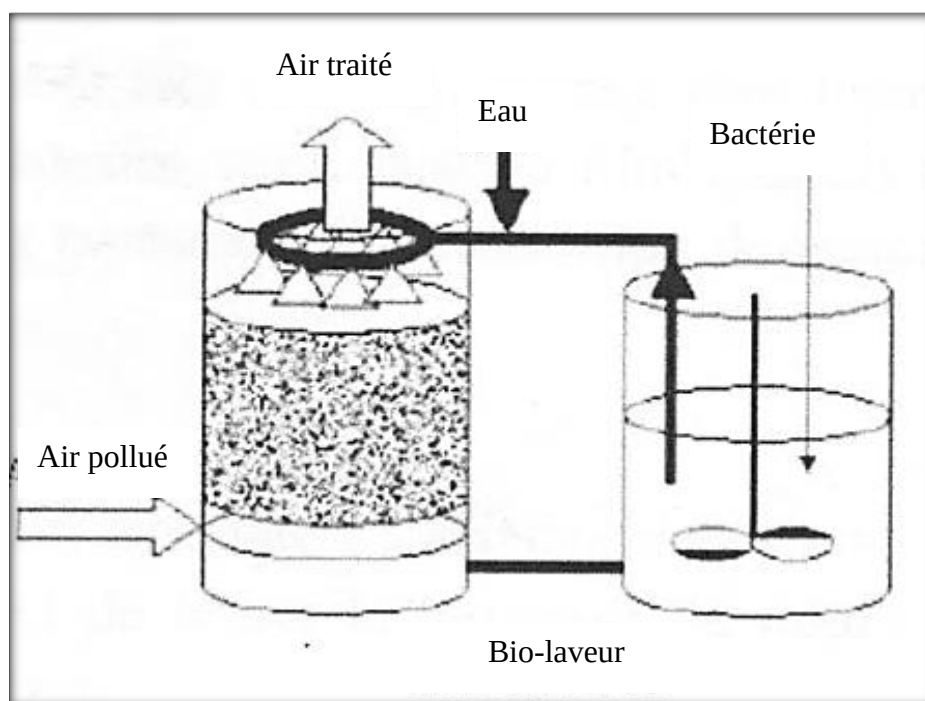


Figure III.6 : Bio-laveur

III.7.2. Techniques de récupération

III.7.2.1. Séparation par procédés membranaires

Lors de l'emploi de techniques membranaires on met en contact l'air chargé en COV avec un film polymère dense aux cavités < 2 nm, maintenue sous pression réduite à sa face aval. Le polymère élastomère facilite le passage des COV au détriment des molécules de plus petite taille (O_2 , N_2 , H_2 , ...).

Le transfert à travers la membrane est stimulé par l'inégalité de résistance de part et d'autre de la membrane : l'effluent en amont de la membrane s'appauvrit en composés alors que l'air en aval s'en enrichit.

Le flux de transfert dépend essentiellement de la différence de pression entre les deux faces de la membrane et de sa perméabilité. Il est favorisé par la diminution de l'épaisseur, l'augmentation de la perméabilité et l'augmentation de la différence de pression entre les deux faces.

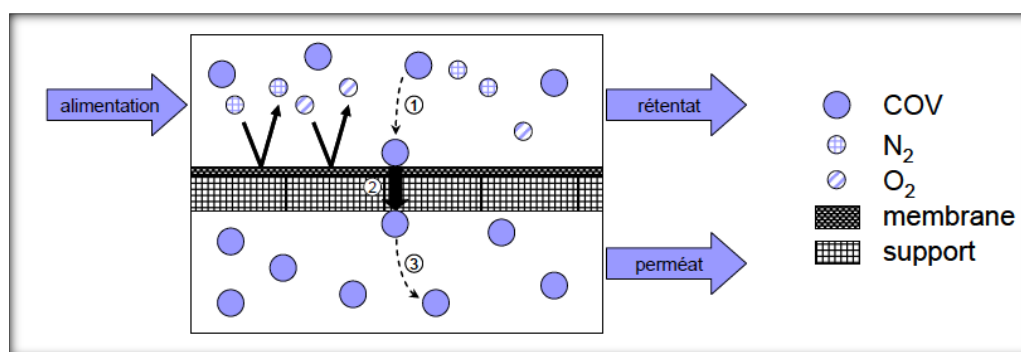


Figure III.7 : Principe de fonctionnement par membrane

III.7.2.2. Condensation

On cherche ici à faire passer les COV de la phase gazeuse à la phase liquide ou solide par abaissement de la température (entre -20 et -80°C).

La condensation mécanique se produit à des températures pouvant aller jusqu'à -40°C au moyen de compresseurs et d'échangeurs. La condensation cryogénique s'effectue à des températures inférieures à -40°C. À titre d'exemple, certaines sociétés utilisent l'azote liquide pour descendre à des températures de l'ordre de -180°C.

III.7.2.3. Adsorption

On parle d'adsorption, si des surfaces solides (les adsorbants) fixent certaines molécules de manière réversible à leur surface par des liaisons type covalent (la chimisorption) ou par des forces électrostatiques (la physisorption).

L'absorbant le plus utilisé est le charbon actif (CA) car c'est un carbone microporeux ayant subi un traitement à haute température de carbonisation et un traitement d'activation en présence d'oxydants tels que la vapeur d'eau ou le CO₂. Le charbon actif peut se présenter sous différentes formes : grains, poudres ou fibres mais les grains et les fibres sont préférables.

L'opération d'absorption peut être mise en œuvre dans différents équipements, parmi eux l'adsorption en lit fixe. L'adsorption en lit fixe est la technique la plus utilisée. Plusieurs lits fonctionnent en parallèle dont un est en mode adsorption et les autres en mode désorption.

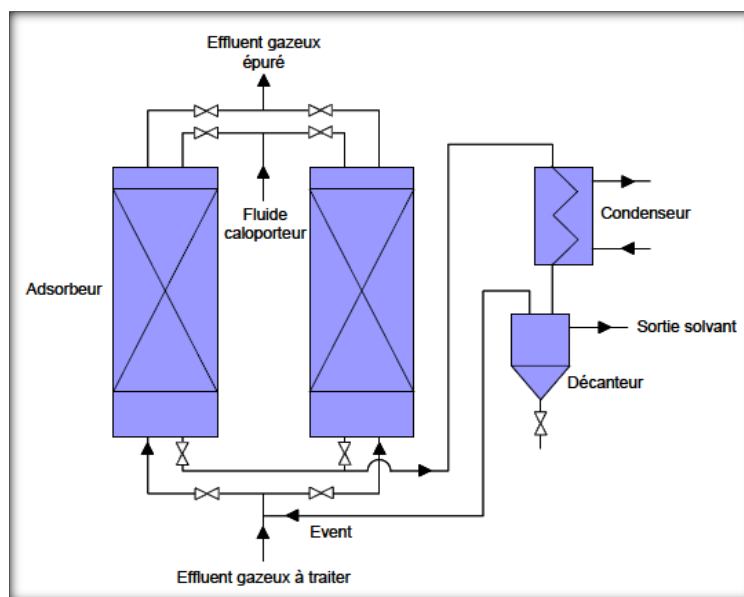


Figure III.8 : Schéma d'adsorption

III.8.Moyens de réduction des pertes par évaporation

Les procédés utilisés sont nombreux. Le choix en est déterminé par des considérations économiques (prix de revient des aménagements, comparé à l'économie réalisée par la réduction de la perte).

III.8.1.Augmentation de la pression de tarage

Dans la mesure où le réservoir peut se résister, il est évident que toute augmentation de la pression de tarage des soupapes réduira les pertes.

Les pertes par respiration peuvent être annulées en augmentant la pression de tarage jusqu'à $(0.2 \text{ à } 0.25) \text{ Kg/cm}^2$ au sud et $(0.15 \text{ à } 0.17) \text{ Kg/cm}^2$ au nord.

III.8.2.Interconnections des phases gazeuses de plusieurs réservoirs

Les pertes sont réduites par le jeu des compensations entre les remplissages et les vidanges des différents bacs, mais il peut en résulter une certaine pollution et une modification des points d'inflammabilité.

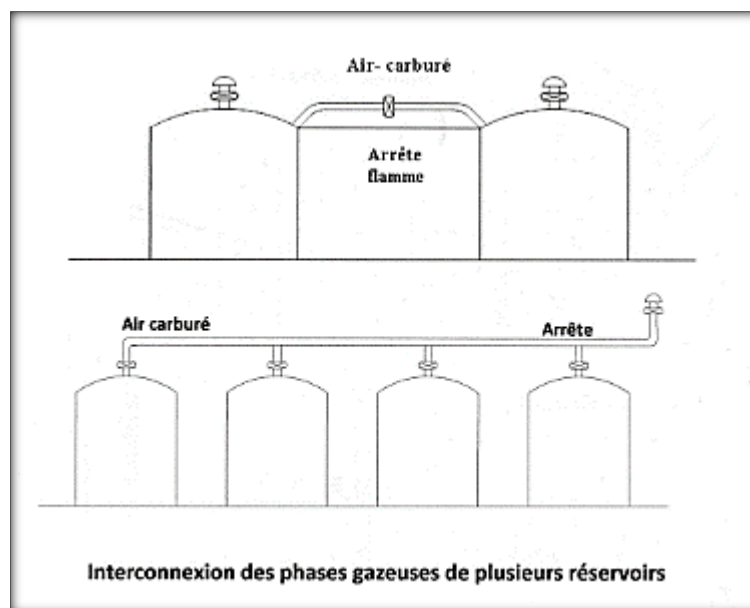


Figure III.9 : Schéma d'interconnexions des phases gazeuses à plusieurs réservoirs

III.8.3. Connexion des phases gazeuses à un gazomètre

L'ensemble fonctionne à pression constante et volume variable. Au cours de remplissage des réservoirs, la pression de la phase gazeuse augmente et l'air carburé se déplace des réservoirs au gazomètre. La cloche de gazomètre monte et le volume des phases gazeuses augmente. La vidange des réservoirs provoque le phénomène inverse. Le gazomètre peut être de divers types :

- « vaporsphère ».
- gazomètre à joint liquide.
- gazomètre sec ou poumon respirant (système wiggins).

III.8.4. Utilisation d'écrans flottants

Ce sont de grandes nappes circulaires en matière plastique, étendues sur la surface du liquide qui est ainsi isolé de la phase gazeuse. A l'exception de la petite surface annulaire constituant le jeu entre le bord de l'écran et la virole. La concentration de la phase gazeuse en hydrocarbures s'en trouve considérablement diminuée et on peut ainsi obtenir une réduction de 80% à 90% des pertes totales.

III.8.5. Utilisation des microsphères

Il s'agit des petites sphères creuses en matière plastique dont le diamètre est de l'ordre de 20 à 40 microns ; introduites dans un réservoir, elles forment à la surface du liquide comme une couche de mousse de faible épaisseur (1/2 pouce à 1 pouce). Leur présence freine l'évaporation qui peut être réduite de 80 à 90%.

Des précautions particulières sont à prendre pour pouvoir effectuer les opérations de jaugeage et d'échantillonnage sans introduction d'erreur, et aussi pour éviter l'entraînement de micro ballons par le produit stocké, lors de l'épuisement du réservoir.

III.8.6.Utilisation de bac à toit flottant

Le toit flottant est destiné à éliminer l'atmosphère gazeuse de réservoir et de fait à diminuer les pertes par respiration et au remplissage .Les vapeurs dues à l'ébullition sont stockées sous le toit pour être condenser ensuite pendant le temps froid de nuit

C'est la solution généralement adoptée pour les réservoirs de grand diamètre destinés au stockage du pétrole brut ou des essences.

III.8.7.Arrosage du réservoir

L'arrosage de réservoir donne la réduction des pertes par respiration entre 20% à 40% .L'irrégularité de l'arrosage provoque des pertes supplémentaires dues à la variation de la température de l'atmosphère gazeuse.

Inconvénients :

- Les dépenses suffisantes de l'eau.
- La corrosion du réservoir et de la fondation.

III.8.8.Utilisation des hydrocarbures fluorés

Le produit ayant une tension superficielle extrêmement faible s'étale sur la plupart des hydrocarbures pour former des films mono ou multimoléculaires .Dans ces films les groupes fluorés des molécules pointent vers l'extérieur .L'hydrocarbure couvert du film a une tension de vapeur superficielle très diminuée. Elle serait quatre fois moindre. Le film réduit donc le taux d'évaporation.

III.8.9.Utilisation des réservoirs spéciaux

III.8.9.1.Réservoir à toit respirant

Ces réservoirs visent à réduire ou à supprimer les pertes par respiration qui résultent des variations des conditions ambiantes.

Le toit est constitué par une cloche gazométrique à joint liquide, ce qui confère au réservoir, la propriété d'avoir une phase gazeuse de volume variable.

Il existe également des cloches gazométriques à joints secs, la jonction étanche entre la robe du réservoir et la cloche est réalisée par un joint souple de matière spéciale afin de réduire les pertes par respiration de l'ensemble, à condition que la variation du volume engendrée par le mouvement du toit soit suffisante.

Dans certains cas, le toit respirant est constitué par une membrane souple en tôle dont le bord est fixé par soudure à la partie supérieure de la robe. Cette membrane peut prendre une position convexe, selon la pression interne régnant en phase gazeuse du réservoir, on réalise ainsi une variation du volume qui, si elle est suffisante permet de supprimer les pertes par respiration.

Des colonnes verticales, prenant appui sur le fond, limitent le mouvement vers le bas du toit. On remarque le lestage spécial du toit, pour assurer des déformations régulières de celui-ci. Signalons aussi le réservoir à volume variable dit Horton-dôme.

III.8.9.2. Réservoir à compensation hydraulique

Ces réservoirs ont pour principe de base la réduction des pertes, aussi bien par respiration que par remplissage. Elles peuvent être totalement annulées si le volume de la phase gazeuse du réservoir est remplacé par un liquide économique, c'est-à-dire par l'eau.

Ce principe n'est d'ailleurs valable que pour des produits non miscibles à l'eau, l'essence par exemple.

Dans les réservoirs les produits s'échelonnent en fonction de leur densité. L'essence est donc la partie haute et l'eau est la partie basse.

Le principe de ces réservoirs est valable, mais la réalisation et l'exploitation soulèvent des problèmes difficiles à résoudre. La compensation instantanée exacte eau/essence est difficile à réaliser, même en supposant deux pompes identiques (attachées au même moteur) assurant l'une l'entrée d'essence, l'autre l'élimination de l'eau et vice versa. Les usures des pompes sont en effet différentes, ainsi que leurs régimes de fuite.

De plus, il faut deux circuits de conduites eau et essence. Enfin, on doit pouvoir disposer d'eau propre en quantité suffisante.

III.8.10. Utilisation des disques réflecteurs

Ils reflètent le jet de l'air entrant dans le réservoir et protègent la surface d'évaporation. La réduction des pertes est de 20% à 40% des produits pétroliers.

III.9. Conclusion

Ce phénomène des pertes par évaporation est un sacré problème qui engendre des conséquences graves à plusieurs échelles mais malheureusement la prise en considération de ces pertes est négligeable au sein des sociétés opérant en Algérie.

IV.1.Introduction

Les réservoirs de stockages jouent un rôle important dans l'exploitation de la chaîne pétrolière et la distribution des produits pétroliers. Comme ces produits sont volatils et inflammables leurs stockages présentent des difficultés et des risques majeurs tels que : incendie, BLEVE, feu de nappe, UVCE, Boil Over....etc.

Ces phénomènes provoquent dans la plupart des cas des dégâts matériels et humains catastrophiques, c'est pour cela qu'il faut connaître les causes de ces accidents et leur mécanisme pour savoir comment les prévenir et les intervenir. Dans ce chapitre, on va essayer de faire une description de ces différents phénomènes.

IV.2.Incendie

C'est une réaction chimique exothermique entre un comburant et un combustible en présence d'une source d'énergie.

Le comburant : le comburant est le produit qui contient de l'oxygène (présent dans l'air) ou certains produits stockés à caractère comburant (protoxyde d'azote (N_2O), monoxyde d'azote (NO), acide nitrique (HNO_3), nitrate de sodium ($NaNO_2$), peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), chlorate de sodium ($NaClO_3$).

Le combustible : le combustible est le produit qui va subir l'oxydation, il peut être :

- **Gaz ou vapeurs :** hydrogène, HC gazeux, H_2S ...
- **Gaz liquéfiés :** propane, ammoniac, butadiène....
- **Liquides, gouttelettes, aérosols :** Alcools, HC liquides, cétones, aldéhydes, solvants.
- **Solides massifs, poussières :** Polystyrène, polyéthylène, soufre, certains métaux (fer, aluminium, sodium, magnésium).

La source d'inflammation : La source d'inflammation d'énergie suffisante doit être apportée au système combustible/comburant pour débiter l'incendie, Ce dernier peut se développer sans source d'inflammation dès que la température d'auto-inflammation est atteinte.

Cette source d'inflammation peut se présenter sous différentes formes à savoir :

- a. **Flamme :** créée par une soudure, une allumette, une cigarette ...
- b. **Elévation de température :** elle peut amener le combustible à sa température d'auto-inflammation.
- c. **Etincelles :** elles sont provoquées par des chocs de métal/métal, métal/béton sec, métal/pierre, postes de soudages, Matériels électriques.

d. Composés pyrophoriques : Ils s'oxydent rapidement au contact de l'air et dégagent suffisamment de chaleur pour s'enflammer spontanément (phosphore, sulfure de fer....).

e .foudre.

f. rayonnements ionisants.

Ces trois éléments réunis forment le triangle de feu.



Figure IV.1 : Triangle de feu

IV.3.Feu de nappe

Le feu de nappe résulte de la combustion d'un liquide inflammable, la nappe de liquide inflammable résulte fréquemment d'une fuite, plus ou moins importante.

Conditions d'apparition : Présence simultanée d'une nappe de liquide inflammable portée à une température supérieure à son point éclair et d'un point chaud (étincelle, flamme nue, métal incandescent,...).

Il est à noter que le point chaud en lui-même, s'il est maintenu suffisamment longtemps, peut initier l'incendie d'un liquide dont la température est inférieure au point éclair : le point chaud en lui-même peut porter localement le liquide à une température supérieure à son point éclair, démarrer l'incendie qui se généralise ensuite à toute la nappe.

L'impact d'un feu de nappe dépend de la taille de la surface en feu, du produit qui se consume et de la durée de l'incendie. Ils présentent des conséquences faibles sur l'homme s'il est correctement maîtrisé, par contre, si l'incendie se développe à proximité de stockages de

matières combustibles, des effets dominos peuvent être observés et les conséquences peuvent être dramatiques (incendie plus violent, explosion...).

On peut distinguer :

-Le feu d'un réservoir : le feu est contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions de réservoir.

-Le feu de cuvette (de rétention), l'extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage.

-Feu de flaque libre ; en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie, l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

IV.4.Explosion de bac

C'est la transformation rapide d'un système matériel donnant lieu à une forte émission de gaz accompagnée éventuellement d'une émission de chaleur importante.

Conditions d'apparition :

- Présence d'un volume gazeux au-dessus du liquide.
- Le gaz est porté à une température supérieure au point éclair.
- Apport d'un comburant (oxygène de l'air).
- Présence d'une source d'inflammation.

IV.5.BLEVE

IV.5.1.Définition de BLEVE 'BoilingLiquidExpandingVapor Explosion'

Le BLEVE peut être défini comme la vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température d'ébullition à la pression atmosphérique.

IV.5.2.Description de phénomène

Lorsque l'on transfère de la chaleur à un liquide, la température de celui-ci augmente jusqu'au point d'ébullition pour former des bulles de vapeurs se développant sur les impuretés et les interfaces avec les solides.

Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation dans le liquide, le point d'ébullition peut être dépassé sans qu'il y ait d'ébullition. C'est ce qu'on appelle un liquide surchauffé.

Une fois le liquide surchauffé et le réservoir fragilisé sous un effet thermique et/ou mécanique, ce liquide peut subir une vaporisation brutale, il apparaît alors une onde de surpression qui se propage, et qui provoque la fragmentation du réservoir, et éventuellement, la création d'une boule de feu si le produit est inflammable.

IV.5.3.Type de BLEVE

IV.5.3.1.BLEVE « Froid »

Le BLEVE se produit avec un réservoir qui contient un liquide sous pression, liquide qui, s'il n'était pas sous pression, serait à l'état gazeux ; le réservoir n'est jamais complètement rempli, il y a un «ciel gazeux» qui maintient cette pression. C'est par exemple le cas du dioxyde de carbone liquide, des GPL ou de l'oxygène liquide à température ambiante (environ 20 °C).

Le BLEVE survient lorsque le réservoir qui contient le liquide se rompt. Cette rupture peut être due à un choc (accident de la circulation d'un camion-citerne, déraillement d'un wagon-citerne, impact), à une mauvaise manipulation (sur-remplissage du réservoir), ou à une fragilisation (corrosion, gel).

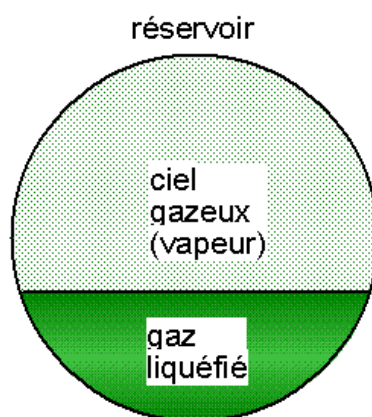


Figure IV.2 : Réservoir rempli d'un gaz liquéfié avec un ciel gazeux sous pression

Donc, une fissure se crée. Au niveau de cette fissure, la pression de l'air, qui était à pression atmosphérique (environ 1 bar), passe brusquement à la pression du réservoir (typiquement plusieurs dizaines à centaines de bar), il y a donc une première onde de surpression, un «bang».

Puis, le gaz s'échappe par cette fissure, sous la forme d'un jet. La pression baisse donc rapidement dans le réservoir, le liquide se met à bouillir, non pas sous l'effet de la chaleur, mais sous l'effet de la chute de pression (un peu comme les bulles de soda qui se forment à l'ouverture de la bouteille, bien que le phénomène soit différent). Puisque le liquide bout, il se transforme rapidement en gaz, et la pression augmente de manière très importante dans le

réservoir. Par ailleurs, le jet de gaz peut entraîner des gouttelettes (aérosol), qui viennent gêner l'échappement du gaz et contribuent ainsi à la montée en pression. Cette pressurisation catastrophique provoque la propagation de la fissure puis la rupture totale du réservoir avec une deuxième onde de surpression.

IV.5.3.2. BLEVE « Chaud »

Dans les cas les plus graves, la rupture du réservoir est due à un échauffement par un feu extérieur, par exemple lorsqu'une mare de produit enflammé se repend sous le réservoir, par un jet de feu provenant d'un réservoir voisin, ou bien lorsque des flammes viennent lécher les parois du réservoir. Sous l'effet de la chaleur, le liquide dans le réservoir se met à bouillir, la pression dans le réservoir augmente ; le gaz s'échappe alors par une valve de surpression (soupape de sécurité), pouvant produire à cette occasion un jet de feu. Le niveau de liquide baisse donc dans le réservoir.

Le gaz conduisant bien moins la chaleur que le liquide, la partie de la paroi du réservoir qui se trouve au-dessus du liquide s'échauffe de manière très importante (dans la partie basse, la chaleur de la paroi est évacuée de l'autre côté par la convection du liquide). La paroi surchauffée s'affaiblit, puis finit par se rompre, provoquant l'accident. On voit que par rapport au cas précédent, c'est la soupape qui joue le rôle de la fissure initiale.

Il ne faut pas en déduire que la soupape a un rôle néfaste, bien au contraire, comme la température monte, la pression monte de toutes manières, la soupape permet de retarder l'accident et de laisser plus de temps aux secours pour évacuer et combattre le sinistre. Elle peut même empêcher l'explosion.

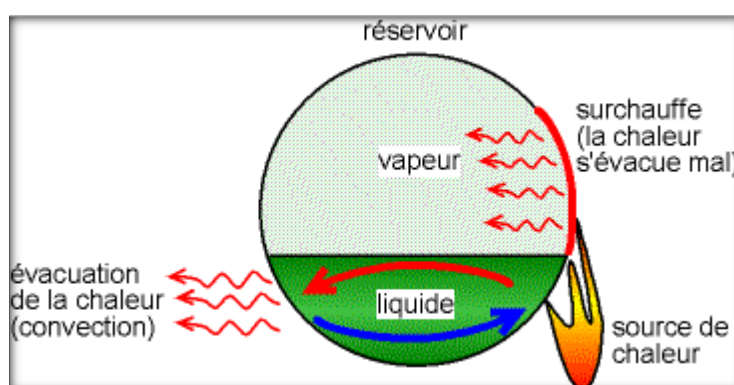


Figure IV.3 : Mécanisme de surchauffe et de rupture du réservoir

IV.5.4. Les causes d'un BLEVE

Les principales causes d'un BLEVE ont été identifiées, dont deux sont liées à des agressions externes :

- **Agression mécanique** : Un réservoir ayant subi une corrosion est plus faible qu'un réservoir neuf, il suffit que la température excède les 35°C pour qu'elle survienne
- **Agression thermique** : le feu de torche, feu de nappe ou hausse de la température durant l'été peut causer un "BLEVE" si votre réservoir de GPL est mal entretenu
- **Sur -remplissage du réservoir.**

Nature de réservoir	Impact mécanique	Agression thermique	Sur-remplissage de réservoir
Sphère	BLEVE froid	BLEVE chaud ou froid	BLEVE froid
Wagon citerne		BLEVE chaud	
Camion-citerne		BLEVE chaud	
Réservoir petit vrac		BLEVE chaud ou froid	
Bouteille		BLEVE chaud	

Tableau V.1 : Les différents types de BLEVE à différents natures de réservoir

IV.6.UVCE

IV.6.1.Définition

Un UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) est une explosion de gaz à l'air libre. Dans le cas d'un gaz inflammable, tel que les GPL, cette explosion produit :

- des effets thermiques,
- des effets de pression.

IV.6.2.Les causes d'un UVCE

Pour obtenir un UVCE il faut deux conditions réalisées simultanément :

- un nuage de gaz inflammable,
- une source d'inflammation.

Tous les scénarios de rupture de canalisation ou de fuite d'un GPL peuvent engendrer un UVCE. La fuite peut être liquide ou gazeuse, mais à conditions de fuite équivalentes (pression, température, section de fuite), une fuite en phase liquide produit des nuages inflammables toujours beaucoup plus grands qu'une fuite en phase gazeuse, car le débit rejeté est beaucoup plus élevé (pour les GPL dans des conditions ambiantes, 1 litre de phase liquide engendre de l'ordre de 250 litres de phase gazeuse).

IV.6.3.Déscription de phénomène

Un UVCE comprend généralement les étapes suivantes :

- rejet dans l'atmosphère d'un GPL, le produit étant en phase gaz ou en phase liquide,
- mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- de manière concomitante, dilution et transport du nuage de gaz dont une partie du volume reste inflammable,
- inflammation de ce nuage,
- propagation d'un front de flamme des parties inflammables du nuage ; ce front de flamme, associé à l'expansion des gaz brûlés, agit à la manière d'un piston sur les gaz frais environnant et peut être à l'origine de la formation d'une onde de pression aérienne, appelée déflagration, si sa vitesse de propagation est suffisante,
- enfin, le cas échéant, mélange avec l'air et combustion des parties du nuage qui étaient initialement trop riches en combustible pour être inflammables.

IV.6.4.Description des effets

Les effets générés par un UVCE sont fortement dépendants des conditions locales dans lesquelles l'explosion a lieu : conditions du mélange gazeux et conditions de l'environnement.

IV.6.4.1.Effets thermique

L'expérience montre qu'en pratique, les effets thermiques de l'UVCE ne sont pas dus au rayonnement thermique (très court) du nuage enflammé, mais uniquement au passage du front de flamme. Autrement dit, toute personne se trouvant sur le parcours de la flamme est susceptible de subir l'effet létal, mais celui-ci n'excède pas la limite extrême atteinte par le front de flamme. Ainsi, l'effet thermique de l'UVCE ou du Flash Fire (rappelons qu'il s'agit du même phénomène physique) sur l'homme est dimensionné par la distance à la LII.

De manière générale, l'effet thermique d'un UVCE sur les structures se limite à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, l'UVCE peut être initiateur d'un incendie, ou être suivi d'une feu torche, dont les effets thermiques sont à redouter.

IV.6.4.2.Effets de surpression

Ces effets sont produits par l'effet piston du front de flamme sur les gaz frais. Plus la propagation du front de flamme est rapide et plus son accélération est grande, plus l'amplitude

de l'onde de pression est importante. Celle-ci se propage dans l'environnement à la façon d'une onde de choc dont l'amplitude s'atténue lorsque l'on s'éloigne du centre de l'explosion, de manière inversement proportionnelle à la distance.

En l'absence d'obstacles, on observe expérimentalement que la propagation de la flamme dans un mélange homogène et au repos est très faiblement accélérée, et que les niveaux de pression associés n'excèdent pas quelques millibars. En revanche, la présence d'un écoulement turbulent ou de gradients de concentration suffit à accélérer la flamme et à engendrer des niveaux de pression plus élevés, même en l'absence d'obstacles.

IV.7.Boil over

IV.7.1.Boil over Classique

IV.7.1.1.Définition

Un boil over est un phénomène de moussage brutal impliquant des réservoirs atmosphériques et résultant de la transformation en vapeur, d'eau liquide (fond d'eau, eau libre, émulsion) contenue dans un réservoir en feu. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de combustible, du bouillonnement du contenu du bac, de l'extension des flammes et de la formation d'une boule de feu.

Ce phénomène se caractérise notamment par la présence d'une onde de chaleur dont le processus de formation est décrit sur la figure suivante.

IV.7.1.2.Conditions nécessaires pour la naissance d'un Boil-Over classique

1-La présence d'eau au fond du réservoir susceptible d'être transformée en vapeur, la présence d'eau est liée notamment aux causes suivantes :

- Pénétration d'eau de pluie au travers des événements, notamment lors d'averses orageuses.
- Condensation de l'humidité de l'air due à la respiration du réservoir et des cycles jour/nuit.
- L'hydrocarbure contient naturellement une fraction réduite d'eau susceptible de migrer par différences de densité au fond de bac.

2-La création d'une onde de chaleur (ou, en d'autres termes d'une zone chaude) qui entre en contact avec le fond d'eau situé sous la masse d'hydrocarbures.

3-Un hydrocarbure suffisamment visqueux, que la vapeur créée au contact de la zone chaude et de l'eau en fond de réservoir ne puisse pas traverser facilement depuis le bas du réservoir.

IV.7.1.3. Les différentes phases d'un Boil Over classique

1-En début d'incendie du bac, le produit occupe tout le volume du bac avec une composition quasi-homogène.



Figure IV.4 : Schéma de l'étape 1 de boil over classique

2-En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une distillation qui conduit à la séparation des coupes légères des coupes plus lourdes. Ces dernières descendant progressivement vers le fond du bac sous l'effet de la pesanteur, c'est la formation de l'onde de chaleur.

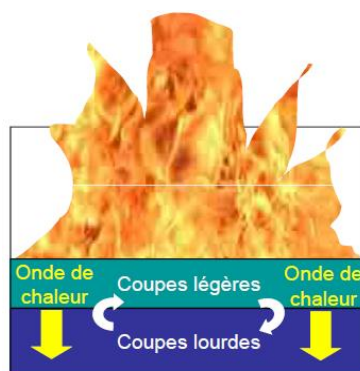


Figure IV.5 : Schéma de l'étape 2 de boil over classique

3-Ce phénomène perdure jusqu'à ce que les coupes les plus lourdes, appelées ondes de chaleur, atteignent l'eau située au fond du bac. Cette onde de chaleur a une température de l'ordre de 200 °C.



Figure IV.6 : Schéma de l'étape 3 de boil over classique

4- Le contact entre l'onde de chaleur et l'eau provoque l'évaporation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.

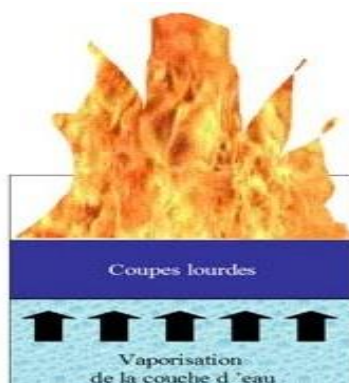


Figure IV.7 : Schéma de l'étape 4 de boil over classique

5- Une partie du liquide déborde du bac et une autre est mise en suspension en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une boule.



Figure IV.8 : Schéma de l'étape 5 de boil over classique

IV.7.1.4. Hydrocarbures susceptibles de produire un Boil-Over

L'hydrocarbure doit être principalement satisfaire deux critères :

- Une plage de températures d'ébullition s'étendent sur 60°C au-delà de la température d'ébullition de l'eau à la pression d'interface hydrocarbure/fond d'eau, soit au-delà de 393 K.
- Une viscosité cinématique supérieur à celle de kérosène à 393K, soit $\nu_{HC} > 0,73 \text{ cSt}$.

II.7.2.Boil-Over couche mince

II.7.2.1.Définition

Les deux campagnes d'essais menées respectivement par la profession (en 2006) et l'INERIS (en 2007) avec pour objectif de définir notamment la possibilité ou non de boil over « classique » sur certains produits ont mis en évidence que la combustion de gazole et kérosène ne génère pas d'onde de chaleur, donc il ne s'agit pas de boil over au sens classique du terme puisque il n'y a pas d'onde de chaleur, il s'agit de boil over en couche mince.

Ce phénomène « en couche mince » est dû à une nucléation hétérogène de l'eau à l'interface eau gazole. Lorsque le front de flamme et la fine couche de produit, dont la température est supérieure à 100°C, impacte le fond d'eau, des bulles de vapeurs commencent à se former à l'interface gazole-eau. Ces bulles grossissent et traversent la fine couche de produit jusqu'à la surface. Une projection peut alors se former lorsque le nombre de bulles est si important qu'elles ne peuvent être évacuées jusqu'à la surface.

Un volume plus important de vapeur est alors libéré et éjecté subitement, entraînant des gouttelettes de produits en combustion et une augmentation des flammes avec pour conséquences un accroissement du flux thermique et des « projections de gouttelettes ».

Pour des conditions initiales identiques (hauteur de produit, diamètre de bac...), ce phénomène lié à la vaporisation de l'eau en fond de bac est moins intense et plus bref qu'un boil over « classique » puisqu'une couche beaucoup plus fine de produit est concernée.

II.7.2.2.Les étapes de Boil Over en couche mince

1-En début d'incendie du bac, le produit qui occupe le volume du bac a une composition homogène qui le restera tout au long de l'incendie. En revanche, un gradient de température apparaît et une zone où la température est supérieure à 100°C peut être identifiée.



Figure IV.9 : Schéma de l'étape 1 de boil over en couche mince

2-En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une augmentation de température sans modification de composition locale. Il n'y a pas de formation d'onde de chaleur.



Figure IV.10 : Schéma de l'étape 2 de boil over en couche mince

3-Une fois que tout le combustible situé en dessous de cette zone de température supérieure à 100°C a été consommée, il y a contact entre l'eau et cette zone.

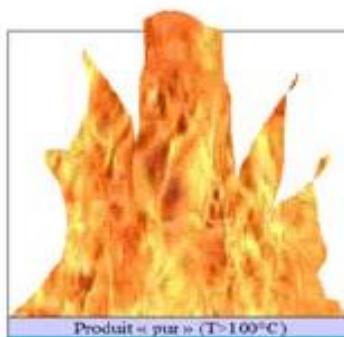


Figure IV.11 : Schéma de l'étape 3 de boil over en couche mince

4-Le contact entre la couche de produit et l'eau provoque l'évaporation de cette dernière. Cette vaporisation brutale conduit à une augmentation importante de volume et joue le rôle de piston en mettant en suspension le liquide inflammable restant dans le bac.

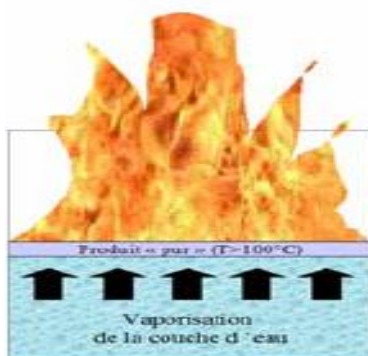


Figure IV.12 : Schéma de l'étape 4 de boil over en couche mince

5- Une partie du liquide est projetée en se fragmentant en gouttes et en se vaporisant en traversant les flammes pour former une zone de combustion vive.

IV.8.Slop Over

Une mousse est mélangée d'air et d'eau, obtenu à l'aide d'un émulseur et d'un générateur.

Cet ensemble de bulles non toxique non agressif vis-à-vis des matériaux plus léger que les liquides, est envoyé sur la surface du feu (cuvette de rétention associée au réservoir par exemple) ou dans le volume en feu afin d'éteindre l'incendie.

Une mousse agit principalement par étouffement, mais aussi par refroidissement.

L'étouffement par la couverture isolante de mousse empêche l'apport de l'oxygène vers le liquide en feu, arrête les émissions de vapeurs inflammables et isole les flammes de combustible. Cependant, une mousse peut être détruite par certains fluides ou par des turbulences.

Elle trouve sa principale application là où l'eau est peu ou pas efficace, comme sur certains feux de liquides inflammables ou pour noyer de grands volumes. Son utilisation est spécialement recommandée pour les feux de surfaces horizontales d'hydrocarbures liquides, de produits polaires du type alcools, amines, cétones, esters...

Mais il n'est pas recommandé de l'utiliser pour les liquides en feu dont la température d'ébullition est supérieure à 100°C (risque de stop-over) ceux pouvant libérer de l'oxygène lors de la combustion ou ceux qui réagissent avec l'eau (par exemple : les acides, de foisonnement et des émulseurs utilisés).

IV.9.Froth Over

Le Froth-Over est un moussage causé par le passage d'eau dans le produit ou contenue dans le produit et vaporisé.

Par exemple, lors de la rupture d'un serpentin dans un bac de stockage, de produits réchauffés, on trouve un débordement avec moussage, à cause de la mise en ébullition d'eau dans un produit chaud, non en feu.

Ce phénomène n'est pas causé par l'incendie. Il peut tout simplement survenir sur les produits lourds réchauffés.

L'expansion de l'eau en vapeur, environ 1680 m³ pour 1 m³ est suffisante pour arracher la toiture de certains capacités .Dans ce cas, l'émulsion peut être transformé en aérosol et s'enflammer au contact d'un point chaud.

Le Froth-Over peut également se produire lorsqu'il y a introduction accidentelle d'un produit léger dans un produit lourd réchauffé.

IV.10.Explosion confinée vapeur ou poussière

Est une explosion confinée vapeur ou poussière et susceptible de se produire dès qu'un mélange combustible de gaz, de vapeurs ou de poussières est présent dans une enceinte fermée.

IV.11.Conclusion

Ces phénomènes provoquent dans la plupart des temps des dégâts matériels et humains catastrophiques, c'est pour cela qu'il faut prendre des mesures pour éviter les sources d'inflammations, instaurer des contrôles périodiques, de disposer de moyens de lutte contre l'incendie bien adaptés aux installations de stockages.....etc.

Le dépôt de stockage de Caroubier dispose de nombreux réservoirs cylindriques verticaux (flottant et fixe), les données récoltées durant le stage effectué m'a permis d'évaluer les pertes par évaporation de l'essence super en reposant sur les méthodes de calculs de l'API (AP 42 et AM86).

V. Calcul des émissions des COV durant le stockage de l'essence super

Les données de stage

Température maximale = 32°C

Température minimale = 7°C

Pression atmosphérique = 101 325 Pa

Densité = 0.7626

Réservoir à toit fixe 'BAC n°7'

Diamètre (D_1) = 22 m

Hauteur de la partie cylindrique = 14.56 m

Hauteur moyenne du liquide = 13.50 m

Couleur : Blanc mat

Pression de tarage de la soupape émission (P_{smax}) = +2500 Pa

Pression de tarage de la soupape émission (P_{smin}) = -500 Pa

Volume transféré annuellement (Q_1) = 234829.622 m³

Réservoir à écran flottant 'BAC n°15'

Diamètre (D_2) = 16 m

Hauteur = 10.98 m

Couleur : Blanc mat

Type de joint : Patin mécanique sans joint secondaire

Volume transféré annuellement (Q_1) = 131 154.81 m³

V.1. Méthode de l'AM86 Modernisé

V.1.1. Limitation d'emploi

Cette méthode présentée est applicable à l'ensemble des réservoirs à toit fixe et des réservoirs à écran ou à toit flottant, à l'exception :

- des réservoirs calorifugés.
- des réservoirs maintenus à température constante.
- des réservoirs équipés de soupapes afin de limiter les émissions par respiration.

- des réservoirs dont la hauteur moyenne de liquide est inférieure à 40% de la hauteur de la partie cylindrique du réservoir.
- des réservoirs à toit flottant externe muni de deux barres de guidage ou plus.
- des réservoirs à toit flottant interne dont le nombre de jambes de toit et de colonnes de toit est 30% supérieur à la valeur conseillée par la méthode EPA.

V.1.2.Évaluation des émissions totales

Les émissions totales annuelles d'un réservoir sont calculées avec les formules suivantes :

$$E_T = E_R + E_M \quad (V.1)$$

Où :

E_T : émissions totales en tonnes par an (t/an).

E_R : émissions par respiration en tonnes par an (t/an).

E_M : émissions générées par les mouvements de produit en tonnes par an (t/an).

V.1.2.1.Réservoirs à toit fixe

a-Émissions par respiration

$$E_R = K_1 \times D_1^{1.73} \times H_c^{0.51} \times C \quad (V.2)$$

Où :

$$K_1 = 7 \times 10^{-7} \times P_v \times M_{Mol} \quad (V.3)$$

Avec :

P_v : pression de vapeur saturante du liquide inflammable en millibar (prise à 20 °C par défaut) (mbar).

M_{Mol} : masse molaire de la phase gazeuse émise en grammes par mole (g/ mole).

D : diamètre du réservoir en mètres (m).

H : hauteur du réservoir en mètres (m).

C : coefficient de couleur (Voir annexe, tableau n°1).

Remarque

La masse molaire se trouve généralement sur la fiche de données sécurité du produit ou dans des bases de données. Il peut toutefois être difficile de trouver la valeur pour des coupes pétrolières.

La masse molaire de la phase gazeuse, peut être différente de celle du liquide dans le cadre d'une coupe pétrolière ou d'un mélange car les fractions plus volatiles sont surreprésentées dans la phase gazeuse par rapport à la phase liquide. Par défaut on peut prendre les valeurs typiques des produits commerciaux les plus courants présenté dans le tableau (V.1).

Produit	Masse molaire vapeur	Tension de vapeur à 20°C
Essence hiver	64	50 KPa
Essence été	76	25KPa
Essence moyenne annuelle	70	40KPa
Naphta pétrochimique	80	20KPa
Jet fuel, ou white spirite	130	0.3KPa

Tableau V.1 : Valeurs typiques de masse molaire et tension de vapeur

Application Numérique

$$K_1 = 7 \times 10^{-7} \times 410 \times 70$$

$$K_1 = 0.02009$$

$$E_R = 0.022009 \times 22^{1.73} \times 14.56^{0.51} \times 1$$

$$E_R = 16.54182705 \text{ t/an}$$

b-Émissions générées par les mouvements

$$E_M = K_2 \times Q_1 \quad (V.4)$$

Où :

$$K_2 = 4.11 \times 10^{-8} \times P_v \times M_{Mol} \quad (V.5)$$

Avec :

P_v : pression de vapeur saturante du liquide inflammable en millibar (prise à 20 ° C par défaut) (mbar).

M_{Mol} : masse molaire de la phase gazeuse émise en grammes par mole (g/mol).

Q_1 : volume de produit transféré annuellement en mètres cubes (m³) et générant une variation de niveau dans le réservoir

Application Numérique

$$K_2 = 4.11 \times 10^{-8} \times 410 \times 70$$

$$K_2 = 1.17957 \times 10^{-3}$$

$$E_M = 1.17957 \times 10^{-3} \times 204051.025$$

$$E_M = 240.6924676 \text{ t/an}$$

c- Émissions totales du réservoir à toit fixe

Les émissions totales du réservoir à toit fixe sont calculées par la formule (V.1)

Application Numérique

$$E_T = 16.5418 + 240.6924$$

$$E_T = 257.2342 \text{ t/an}$$

V.1.2.2. Réservoir à écran flottant

a-Émissions par évaporation directe

$$E_{ED} = K_3 \times [(S+P) \times (D_2)^2 + (F+A) \times D_2 + B] \quad (V.6)$$

Où :

$$K_3 = 1.8 \times 10^{-7} \times P_v \times M_{Mol} \quad (\text{sauf pour le pétrole } k = 0.0013) \quad (V.7)$$

Avec :

P_v : pression de vapeur saturante du liquide inflammable en millibar (prise à 20 ° C par défaut) (mbar)

M_{Mol} : masse molaire de la phase gazeuse émise en grammes par mole (g/mol)

F : coefficient de joint de l'écran flottant (voir annexe, tableau n°2)

S et P : respectivement, coefficient de structure de l'écran interne et coefficient de perméation de l'écran flottant (voir annexe, tableau n°3).

A et B : coefficients de configuration du réservoir, respectivement égaux à 13 et 220.

Application Numérique

$$K_3 = 1.8 \times 10^{-7} \times 410 \times 70$$

$$K_3 = 5.166 \times 10^{-3}$$

$$E_{ED} = 5.166 \times 10^{-3} \times [(0.45+0) \times (16)^2 + (14.9+1.3) \times 16 + 220]$$

$$E_{ED} = 3.0706 \text{ t/an}$$

b-Émissions générées par les mouvements

$$E_M = K_4 \times Q_2 \times (M / D_2) \quad (V.8)$$

Où :

$$K_4 = 7.5 \times 10^{-3} \quad (\text{sauf pour le pétrole brut ou } k = 3.75 \times 10^{-2}) \quad (V.9)$$

Avec :

Q : volume de produit transféré annuellement en mètres cubes (m³) et générant une variation de niveau dans le réservoir.

M : coefficient de mouillage fonction de l'état des parois, confèrent aux valeurs suivantes :

$M = 0.0015$ pour les parois neuves ou légèrement oxydées.

$M = 0.0075$ pour les parois très oxydées.

$M = 0.15$ pour les parois rugueuses.

D : diamètre du réservoir en mètres (m).

Application Numérique

$$K_4 = 7.5 \times 10^{-3}$$

$$E_M = 7.5 \times 10^{-3} \times 131154.81 \times (0.0015 / 16)$$

$$E_M = 0.0922 \text{ t/an}$$

c- Émissions totales de réservoir à écran flottant interne

$$E_T = E_{ED} + E_M \quad (V.10)$$

Application Numérique

$$E_T = 3.0706 + 0.0922$$

$$E_T = 3.1628 \text{ t/an}$$

V.2.Méthode de l'AP 42

V.2.1.Domaine d'application de la méthode

La méthode présentée dans cette annexe n'est applicable qu'aux réservoirs à toit fixe dont la pression interne est proche de la pression atmosphérique.

V.2.2.Evaluation des émissions totales

V.2.2.1.Réservoir à toit fixe

Les émissions totales annuelles d'un réservoir sont calculées avec la formule suivante :

$$E_T = E_R + E_M \quad (V.11)$$

Où :

E_T : émissions totales en tonnes par an (t/an)

E_R : émissions par respiration en tonnes par an (t/an).

E_M : émissions générées par les mouvements de produit en tonnes par an (t/an).

Remarque

Les formules donnent les émissions en (Kg/an) et non pas en (t/an).

a-Évaluation des émissions annuelles par respiration

$$E_R = 365 \times V_v \times D_v \times K_E \times K_S \quad (V.12)$$

Avec :

E_R : émissions par respiration en kilogrammes par an (Kg/an).

V_v : volume d'espace libre au-dessous du liquide en mètre cube (m^3).

D_v : densité de la vapeur de solvant de l'air du volume libre en kilogrammes par mètres cubes (Kg / m^3).

K_E : coefficient d'expansion de la phase vapeur.

K_S : facteur de saturation de la phase vapeur.

a-1-Détermination de V_v

$$V_v = \pi \times R_c^2 \times h_v \quad (V.13)$$

Avec :

V_v : volume d'espace libre au-dessous du liquide en mètres cubes (m^3).

R_c : rayon de réservoir en mètres (m). ($R_c = \frac{D_1}{2}$)

h_v : hauteur équivalente de la phase vapeur en (m) « hauteur d'un cylindre dont le rayon est égal à celui rempli de vapeur y compris le volume du cône ou de dôme surmontant la partie cylindrique du réservoir.

$$h_v = h_c - h_L + h_E \quad (V.14)$$

Avec :

h_c : hauteur de la partie cylindrique du réservoir en mètres (m).

h_L : hauteur moyenne du liquide en mètres (m).

h_E : hauteur équivalente du toit de réservoir en mètres (m).

Pour un toit conique, la hauteur h_E est déterminée grâce aux équations suivantes :

$$h_E = \frac{1}{3} \times h_{T0} \quad (V.15)$$

et

$$h_{T0} = P_{T0} \times R_c \quad (V.16)$$

Avec:

h_{T0} : hauteur de la partie conique du réservoir en mètres (m).

R_c : rayon de la partie cylindrique du réservoir en mètres (m).

P_{T0} : pente de la partie conique du toit (rapport de distances sans unité).

Si cette pente est inconnue, la valeur par défaut est 0.0625.

Application Numérique

$$h_{T0} = 0.0625 \times 11$$

$$h_{T0} = 0.6875 \text{ m}$$

$$h_E = \frac{1}{3} \times 0.6875$$

$$h_E = 0.2292 \text{ m}$$

$$h_V = 14.56 - 13.50 + 0.2292$$

$$h_V = 1.2892 \text{ m}$$

$$V_V = \pi \times 11^2 \times 1.2892$$

$$V_V = 490.067 \text{ m}^3$$

a-2- Détermination de D_v

En supposant que la vapeur se comporte comme un gaz parfait :

$$D_v = \frac{M_{\text{Mol}} \times P_{VA}}{R \times T_{LS}} \quad (\text{V.17})$$

Avec :

D_v : densité de la vapeur de solvant de 'air du volume libre en gramme par mole (g/ m^3).

M_{Mol} : masse molaire e la vapeur en gramme par mole (g/mol).

P_{VA} : pression de vapeur saturante à la surface du liquide à la température journalière moyenne en Pascals (Pa).

T_{LS} : température journalière moyenne à la surface du liquide en kelvins (K).

La masse molaire moyenne M_{Mol} est celle de la substance contenue dans le réservoir (corps pure) ou déterminée à partir de la composition de la phase liquide s'il s'agit d'un mélange .Dans ce dernier cas M_{Mol} est calculé avec la formule suivante :

$$M_{\text{Mol}} = \sum y_i \times M_i \quad (\text{V.18}) \quad y_i = \frac{P_i}{P_{VA}} \quad (\text{V.19})$$

Avec :

M_i : masse molaire du composé i par gramme par mole [g/mol].

y_i : fraction molaire du composé i dans la phase vapeur.

P_i : pression de vapeur partielle du composant i ou pression de vapeur saturante du composant i multipliée par la fraction molaire dans le liquide en kilo pascals (KPa).

P_{VA} : pression de vapeur saturante totale de liquide stocké en kilo pascals (KPa), somme des pressions de vapeur saturantes de tous les constituants.

$$P_{VA} = \sum P_i \quad (V.20)$$

Remarque

La masse molaire calculée est celle de la phase vapeur (pas de différence pour une substance pure, c'est la même que celle du liquide).

Le calcul de la masse molaire de la phase vapeur par la formule n'est possible que si l'on connaît bien la composition de la phase liquide ce qui n'est pas possible pour les coupes pétrolières. On pourra prendre par défaut les valeurs du tableau .

La pression de vapeur saturante à la surface du liquide à la température journalière moyenne du liquide peut être calculée au moyen de la loi d'Antoine :

$$\text{Log}(P_i) = (A_i - \frac{B_i}{T_{LS} + C_i}) \quad (V.21)$$

Avec :

P_i : pression de vapeur saturante à la surface du liquide à la température journalière moyenne (les constantes d'Antoine retenues sont en adéquation avec l'unité de pression choisie).

T_{LS} : température journalière moyenne à la surface du liquide en kelvins (K).

A_i, B_i, C_i : constantes d'Antoine du composé i, B_i et C_i sont exprimés en kelvins (K).

La température moyenne T_{LS} est calculée grâce à l'équation suivante :

$$T_{LS} = 0.44 \times T_{AM} + 0.56 \times T_{LM} + 0.00387 \times \alpha \times I \quad (V.22)$$

T_{LS} : température journalière moyenne à la surface du liquide en (K).

T_{AM} : température ambiante moyenne en kelvins (K).

T_{LM} : température du liquide en kelvins (K).

α : absorbance solaire du revêtement du réservoir (voir tableau n°4)

I : facteur d'insolation en joule par centimètres carrés par jour (joule/cm². Jour).

La température moyenne ambiante journalière peut être calculée par l'équation :

$$T_{AM} = \frac{T_{A \max} + T_{A \min}}{2} \quad (V.23)$$

Avec :

T_{AM} : température ambiante moyenne journalière en kelvins (K).

$T_{A\max}$: température ambiante maximum journalière en kelvins (K).

$T_{A\min}$: température ambiante minimum journalière en kelvins (K).

La température de la masse du liquide T_{LM} est calculée par la formule suivante :

$$T_{LM} = T_{AM} + 3.3 \times \alpha - 0.55 \quad (V.24)$$

Avec :

T_{AM} : température ambiante moyenne journalière en kelvins (K).

T_{LM} : température du liquide dans sa masse en kelvins (K)

α : absorbance solaire du revêtement du réservoir (voir annexe, tableau n°4).

Application Numérique

$$T_{AM} = \frac{305.15 + 280.15}{29}$$

$$T_{AM} = 292.65 \text{ K}$$

$$T_{LM} = 292.65 + 3.3 \times 0.17 - 0.55$$

$$T_{LM} = 292.66 \text{ K}$$

$$T_{LS} = 0.44 \times 292.65 + 0.56 \times 292.66 + 0.00387 \times 0.17 \times 1800$$

$$T_{LS} = 293.84 \text{ K}$$

$$D_v = \frac{70 \times 41000}{293.84 \times 8.314}$$

$$D_v = 1174.7919 \text{ g/m}^3$$

$$D_v = 1.17479 \text{ Kg/m}^3$$

a-3- Détermination de K_E

$$K_E = \frac{\Delta T_v}{T_{LS}} + \frac{\Delta P_v - \Delta P_s}{P_A - P_{VA}} \quad (V.25)$$

Avec :

K_E : coefficient d'expansion de phase vapeur (≥ 0).

T_{LS} : température journalière moyenne à la surface de liquide en kelvins (K).

P_A : pression atmosphérique en Pascals (Pa).

P_{VA} : pression de vapeur saturante à la surface du liquide à la température journalière moyenne en Pascals (Pa).

$$\Delta T_v = 0.72 \times \Delta T_A + 0.0137 \times \alpha \times I \quad (V.26)$$

Avec :

ΔT_v : amplitude thermique journalière de la vapeur en kelvins (K).

ΔT_A : amplitude thermique journalière ambiante en kelvins (K).

α : absorbance solaire de revêtement du réservoir.

I : facteur d'insolation journalière en joule par centimètres carré par jour (joule/cm².jour).

ΔT_A est estimé de la façon suivante :

$$\Delta T_A = T_{A \max} - T_{A \min} \quad (V.27)$$

Avec :

ΔT_A : amplitude thermique journalière en kelvins (K).

$T_{A \max}$: température ambiante journalière maximale en kelvins (K).

$T_{A \min}$: température journalière minimale en kelvins (K)

ΔP_v est calculé de la façon suivante :

$$\Delta P_v = P_{v \max} - P_{v \min} \quad (V.28)$$

Avec :

ΔP_v : amplitude journalière de pression en kilo Pascals (KPa).

$P_{v \max}$: pression de vapeur saturante à la température maximale de la surface du liquide en Pascals (Pa).

$P_{v \min}$: pression de vapeur saturante à la température minimale de la surface du liquide en Pascals(Pa).

ΔP_s est calculée par la formule :

$$\Delta P_s = P_{S \max} + P_{S \min} \quad (V.29)$$

Avec :

ΔP_s : amplitude de tarage de la soupape de mise à l'atmosphère en Pascals (Pa).

$P_{S \max}$: valeur absolue de la pression de tarage de la soupape (émission) en Pascals (Pa).

$P_{S \min}$:valeur absolue de la pression de tarage de la soupape (admission) en Pascal (Pa).

Application Numérique

$$\Delta P_S = 2500 + 500$$

$$\Delta P_S = 3000 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_V = P_{V \max} - P_{V \min}$$

$$\Delta P_V = 59 - 35$$

$$\Delta P_V = 24 \text{ KPa}$$

$$\Delta T_A = 305.15 - 280.15$$

$$\Delta T_A = 25 \text{ K}$$

$$\Delta T_V = 0.72 \times 25 + 0.0137 \times 0.17 \times 1800 = 293.84$$

$$\Delta T_V = 22.19 \text{ K}$$

$$K_E = \frac{22.19}{293.84} + \frac{24000 - 3000}{101325 - 41000}$$

$$K_E = 0.423631668$$

a-4-Détermination de K_S

$$K_S = \frac{1}{1 + 0.0252 \times P_{VA} \times h_V} \quad (\text{V.30})$$

Avec :

K_S : facteur de saturation de la phase vapeur.

P_{VA} : pression de vapeur saturante à la surface du liquide à la température journalière moyenne en kilo Pascals (KPa)

h_V : hauteur équivalente de la phase vapeur en mètres (m).

Application Numérique

$$K_S = \frac{1}{1 + 0.0252 \times 41 \times 1.2892}$$

$$K_S = 0.428816201$$

Les émissions annuelles par respiration sont calculées par la formule (V.12)

Application Numérique

$$E_R = 365 \times 490.0670 \times 1.1748 \times 0.42631668 \times 0.428816201$$

$$E_R = 38416.332 \text{ Kg/an}$$

$$E_R = 38.4163 \text{ t/an}$$

b- Evaluation des émissions annuelles générées par les mouvements de produit

$$E_M = \frac{M_{Mol} \times P_{VA} \times Q_1}{8.31 \times T_{AM}} \times K_N \times K_P \quad (V.31)$$

Avec:

E_M : pertes annuelles en fonctionnement en kilogrammes par an (Kg /an).

T_{AM} : température moyenne annuelle en kelvins (K).

M_{Mol} : masse molaire moyenne de la vapeur en kilogrammes par mole (Kg/mol).

P_{VA} : pression de vapeur saturante à la température moyenne journalière de la surface du liquide en Pascals (Pa).

Q_1 : volume de produit transféré annuellement en mètres cubes (m^3) et générant une variation de niveau dans le réservoir.

$$N = \frac{Q_1}{V_1} \quad (V.32)$$

K_N : facteur de saturation.

$K_N = 1$ pour un nombre de rotation annuel inférieur ou égal à 36.

$K_N = (180 + N) / (6 \times N)$ pour un nombre de rotation annuel supérieur à 36.

N est le nombre de rotation annuelle (le rapport entre le volume transféré annuellement et le volume de du bac).

K_P : facteur lié au produit stocké :

$K_P = 0.75$ pour le pétrole brut.

$K_P = 1$ pour les autres liquides inflammables.

Application Numérique

$$N = \frac{204051.025}{5000}$$

$$N = 41$$

$$N= 41 \quad \text{donc} \quad K_N = \frac{180+41}{6 \times 41}$$

$$K_N = 0.898373983$$

$$E_M = \frac{0.07 \times 41000 \times 234829.62}{8.3 \times 292.65} \times 0.8984 \times 1$$

$$E_M = 216335.7491 \text{ Kg/an}$$

$$E_M = 216.3357491 \text{ t/an}$$

Emissions totale :

$$E_T = E_R + E_M$$

$$E_T = 38.4163 + 216.3357$$

$$E_T = 254.752 \text{ t/an}$$

V.2.2.2. Réservoir à écran flottant

Evaluation des émissions totales par an

Les émissions totales annuelles d'un réservoir sont calculées avec la formule suivante :

$$E_T = E_P + E_M \quad (V.33)$$

Avec :

E_T : émissions totales en tonnes par an (t/an)

E_P : émissions par perméabilité en tonnes par an (t/an).

E_M : émissions générés par les mouvements de produit en tonnes par an (t/an).

a-Émissions par perméabilité

Ces émissions s'expriment de la façon suivante :

$$E_P = (F_R + F_F + F_D) \times P^* \times M_{Mol} \times K_C \quad (V.34)$$

Avec:

E_P : émissions annuelles par perméabilité en kilogrammes par an (Kg/an).

F_R : facteur de perte au joint périphérique en kilogrammes-mole par an (Kg. Mole/an).

F_F : facteur total de perte aux joints des accessoires en kilogrammes-mole par an (Kg. Mole/an).

F_D : facteur total de perte par perméabilité de l'écran (uniquement pour les toits flottants interne équipés d'écrans boulonnés) en kilogrammes -mole par an (Kg. Mole/an).

P^* : fonction de pression de vapeur saturante.

M_{Mol} : masse molaire moyenne de la vapeur en grammes par mole (g/mole).

K_C : facteur lié au produit stocké, $K_C = 0.4$ pour le pétrole brut, $K_C = 1$ pour les autres liquides inflammables.

Remarque

On considère 3 types d'émission pour l'écran :

- Les pertes au joint.
- Les pertes via les accessoires de l'écran.
- Les pertes via la perméation de l'écran.

a-1 – Détermination de F_R

$$F_R = K_{RA} \times D^2 \quad (V.35)$$

Avec

F_R : facteur de perte au joint périphérique en kilogrammes-mole par an (Kg. Mole/an).

K_{RA} : coefficient de perte au joint périphérique en kilogrammes-mole par an (Kg. Mole /an) (voir tableau n°5).

D : Diamètre du réservoir en mètres (m).

Type de joint : Patin mécanique sans joint secondaire, donc : $K_{RA} = 8.63$

Application Numérique

$$F_R = 8.63 \times 16$$

$$F_R = 138.08 \text{ Kg. Mole/ an}$$

a-2- Détermination de F_F

$$F_F = [(N_{F1} \times K_{F1}) + (N_{F2} \times K_{F2}) + \dots + (N_{Fn} \times K_{Fn})] \quad (V.36)$$

Avec :

F_F : facteur total de perte aux joints des accessoires en kilogrammes –mole par an (Kg. Mole /an).

N_{Fi} : nombre d'accessoires de type donné ($i=0, 1, 2, 3, \dots, n$).

K_{Fi} : coefficients de perte aux accessoires pour un type d'accessoire donnée en kilogrammes-mole par an (Kg .mole/an)

n : nombre total des différents types d'accessoires.

Remarque

-lorsque le nombre d'accessoires n'est pas connu, un nombre est proposé pour chaque type d'accessoires dans l'annexe, (tableau n°6 ,7)

-D'une manière générale, les accessoires sont ' avec joint', sauf pour les jambes et les colonnes de toit.

-Il y a d'autres types d'accessoires (trou d'homme, puits de jauge...) mais les émissions peuvent, le plus souvent, être négligées.

Application Numérique

Nombre de jambes d'écran flottant :

$$N = 5 + \left(\frac{D_2}{3}\right) + \left(\frac{D_2^2}{56}\right) \quad (\text{Voir annexe, tableau n°8}) \quad (V.37)$$

$$N = 5 + \left(\frac{16}{3}\right) + \left(\frac{16^2}{56}\right)$$

$$N = 15$$

$$F_F = [(1 \times 6.4) + (1 \times 2.8) + (1 \times 0.32) + (15 \times 3.6) + (1 \times 2 \times 5.4) + (1 \times 23.1)]$$

$$F_F = 112.02 \text{ Kg. Mole/ an}$$

a-3-Détermination de F_D

$$F_D = K_D \times S_D \times D_2^2 \quad (V.38)$$

Avec :

F_D : facteur de perte par perméabilité des raccords d'écran en kilogramme -mole par an (Kg .mole/an).

K_D : coefficient de perte par perméabilité des raccords d'écran par unité de longueur de raccord en kilogrammes -mole par an (Kg. Mole/ m.an).

S_D : facteur de longueur des raccords d'écran en mètres par mètres carrées (m/ m²).

$$S_D = \frac{L_{\text{raccord}}}{A_{\text{écran}}} \quad (V.39)$$

Avec :

L_{raccord} : longueur totale des raccords d'écran en mètres (m).

$A_{\text{écran}}$: surface de l'écran en mètres carrés (m²).

Remarque

-La perte par perméabilité des raccords d'écran des réservoirs à toit flottant externe et des réservoirs à toit flottant interne équipés d'un écran soudé ou collé est nulle.

-lorsque la longueur totale des raccords d'écran n'est pas connue, une valeur de SD par défaut de 0.65 m/m² est retenue.

Comme l'écran flottant est de type soudé alors : $F_D=0$.

a-4- Détermination de P^*

$$P^* = \frac{(P_{VA} / P_A)}{[1 + [1 - (P_{VA} / P_A)]^{0.5}]^2} \quad (V.40)$$

Avec :

P^* : fonction de pression de vapeur saturante.

P_{VA} : pression de vapeur saturante du liquide en kilo Pascals (KPa).

P_A : pression atmosphérique moyenne sur le site en kilo Pascals (KPa).

Application Numérique

$$P^* = \frac{(41/101.325)}{[1 + [1 - (41 / 101.325)]^{0.5}]^2}$$

$$P^* = 0.128925113$$

$$E_P = (F_R + F_F + F_D) \times P^* \times M_{\text{Mol}} \times K_C$$

$$E_P = (138.03 + 112.02 + 0) \times 0.128925113 \times 70 \times 1$$

$$E_P = 2256.6407 \text{ Kg/an}$$

$$E_P = 2.22566 \text{ t/an}$$

b- Émissions par mouvement

Les émissions par mouvement s'estiment par la formule :

$$E_M = \left[\frac{4 \times Q_2 \times C \times D_L}{D_2} \right] \times \left[1 + \frac{(N_C \times F_C)}{D_2} \right] \quad (V.41)$$

Avec :

E_M : émissions par mouvement en kilogrammes par an (Kg/an).

Q_2 : volume de produit transféré annuellement et générant une variation de niveau dans le réservoir en mètres cubes (m^3).

C : coefficient de mouillabilité en mètres cubes par mètres carrés (m^3/m^2) (voir Annexe, tableau n°9).

D_L : densité moyenne du liquide en kilogrammes par mètres cubes (kg/m^3)

D_2 : diamètre de réservoir en mètre (m).

N_C : nombre de colonnes de toit présentes dans le réservoir (voir annexe, tableau N°10).

F_C : diamètre des colonnes de toit en mètres (m).

Application Numérique

$$E_M = \left[\frac{4 \times 131154.81 \times 2.57 \times 10^{-6} \times 726.6}{16} \right] \times \left[1 + \frac{(1 \times 0.25)}{16} \right]$$

$$E_M = 62.1850 \text{ Kg/an}$$

$$E_M = 0.6219 \text{ t/an}$$

$$E_T = 0.6219 + 2.2257$$

$$E_T = 2.8476 \text{ t/an}$$

V.3. Les émissions totales de l'essence super dans le dépôt de Caroubier

Les pertes de l'essence super au niveau dépôt de caroubier peuvent être déterminées par les relations ci-dessous où 'a' est le nombre de bac à toit fixe et 'b' est le nombre de bacs à écran flottant : a=1 et b=2

Toit fixe

$$E_{\text{totale toit fixe}} = E_{\text{totale toit fixe}} \times a$$

Toit flottant

$$E_{\text{totale écran flottant}} = E_{\text{totale écran flottant}} \times b$$

Émissions totales de l'essence super

$$E_{\text{totale écran flottant}} = E_{\text{totale toit fixe}} \times a + E_{\text{totale écran flottant}} \times b$$

Application Numérique

Méthode AM86

$$E_{\text{totale toit fixe}} = 257.2342 \times 1 = 257.2342 \text{ (t/an)}$$

$$E_{\text{totale écran flottant}} = 3.1628 \times 2 = 6.3256 \text{ (t/an)}$$

$$E_{\text{totale essence super}} = 257.2342 + 6.3256 = 263.5598 \text{ (t/an)}$$

Méthode AP42

$$E_{\text{totale toit fixe}} = 254.752 \times 1 = 254.752 \text{ (t/an)}$$

$$E_{\text{totale écran flottant}} = 2.8476 \times 2 = 5.6952 \text{ (t/an)}$$

$$E_{\text{totale essence super}} = 257.2342 + 6.3256 = 260.4472 \text{ (t/an)}$$

V.4.Comparaison des pertes par évaporation entre un réservoir à toit fixe et à écran flottant

Pour comparer entre ces deux bacs, il faut considérer les mêmes conditions (même diamètre, même volume, produit...).

Pour le calcul on prend les données de stage et on fait varier la quantité transféré annuellement, la méthode utilisé pour le calcul est AM 86 Modernisé (formules V.1, V.2, V.4, V.6, V.8, V.10). Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous.

a-Toit flottant

Quantité transféré annuellement (m ³)	E _{ED} (t/an)	E _M (t/an)	E _T (t/an)
50000	4,1028372	0,0255682	4,1284054
80000	4,1028372	0,0409091	4,1437463
100000	4,1028372	0,0511364	4,1539736
150000	4,1028372	0,0767045	4,1795417
200000	4,1028372	0,1022727	4,2051099
250000	4,1028372	0,1278409	4,2306781
300000	4,1028372	0,1534091	4,2562463
350000	4,1028372	0,1789773	4,2818145

b-Toit fixe

Quantité transféré annuellement (m ³)	E _R (t/an)	E _M (t/an)	E _T (t/an)
50000	0,9712416	58,9785	59,949742
80000	0,9712416	94,3656	95,336842
100000	0,9712416	117,957	118,92824
150000	0,9712416	176,9355	177,90674
200000	0,9712416	235,914	236,88524
250000	0,9712416	294,8925	295,86374
300000	0,9712416	353,871	354,84224
350000	0,9712416	412,8495	413,82074

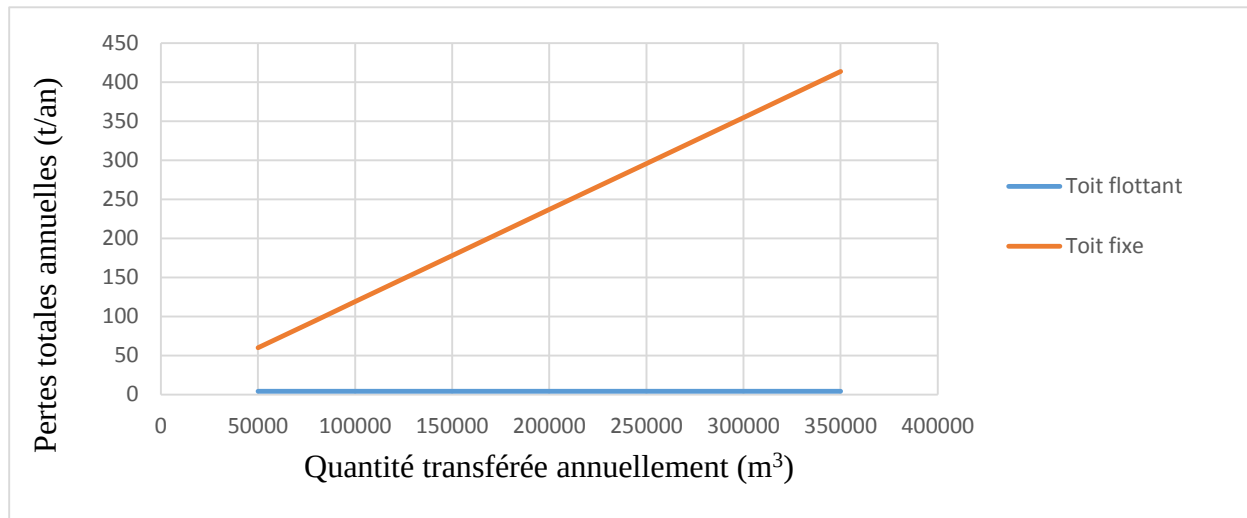


Figure V.1 : Variation des pertes annuelles en fonction des quantités transférées annuellement

Le graphe montre l'écart important entre les pertes par évaporation dans les deux bacs (à toit fixe, écran flottant), d'où la nécessité d'utiliser des réservoirs à écran flottant pour stocker des produits volatiles telle que l'essence.

V.5. Influence des différents paramètres sur les pertes par évaporation

V.5.1. Influence de diamètre sur les pertes par évaporation

A- Toit flottant

Pour voir l'influence de diamètre sur l'évaporation durant le stockage, on garde les mêmes données de stage et on fait varier le diamètre.

Le calcul se fait en utilisant les formules (V.6, V.8, V.10, V.33, V.34, V.35, V.36, V.41).

Méthode AP42

Diamètre (m)	N	N entier	F _F (Kg. Mole/an)	F _R (Kg.Mole/an)	E _P (t/an)	E _M (t/an)	E _T (t/an)
10	10,119	11	97,62	86,4	1,660736	0,10041	1,76115
14	13,1667	14	108,42	120,96	2,070099	0,07122	2,14132
16	14,9048	15	112,02	138,24	2,258536	0,06218	2,32072
18	16,7857	17	119,22	155,52	2,479462	0,05518	2,53464
20	18,8095	19	126,42	172,8	2,700388	0,04959	2,74998
22	20,9762	20	130,02	190,08	2,888825	0,04504	2,93386
24	23,2857	23	140,82	207,36	3,14224	0,04124	3,18348
26	25,7381	26	151,62	224,64	3,395655	0,03804	3,4337
28	28,3333	29	162,42	241,92	3,649071	0,0353	3,68437
30	31,0714	32	173,22	259,2	3,902486	0,03293	3,93541

Méthode AM86 Modernisé

Diamètre (m)	E _{ED} (t/an)	E _M (t/an)	E _T (t/an)
8	1,9548144	0,1844353	2,1392497
10	2,205882	0,1475483	2,3534303
14	2,76381	0,1053916	2,8692016
16	3,0706704	0,0922177	3,1628881
18	3,3961284	0,0819713	3,4780997
20	3,740184	0,0737741	3,8139581
22	4,1028372	0,0670674	4,1699046
24	4,484088	0,0614784	4,5455664
26	4,8839364	0,0567493	4,9406857
28	5,3023824	0,0526958	5,3550782
30	5,739426	0,0491828	5,7886088

Selon les calculs faits précédemment et le graphe ci-dessous, on constate que l'augmentation de diamètre génère une croissance de quantité perdue par évaporation. Un diamètre plus grand permet à un grand nombre de molécules qui se trouve à la surface de se détacher de la masse de liquide plus facilement (car ils n'ont pas une forte liaison).

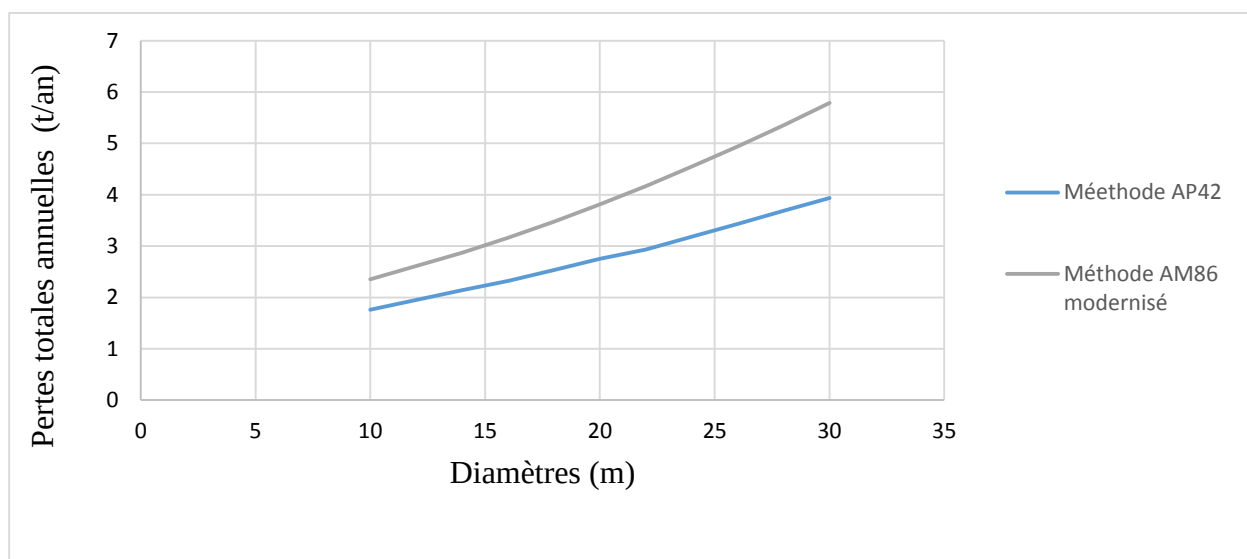


Figure V.2 : Variation des pertes annuelles en fonction de diamètre de réservoir

Toit fixe

Pour voir l'influence de diamètre sur l'évaporation durant le stockage, on garde les mêmes données de stage et on fait varier le diamètre.

Le calcul se fait en utilisant les formules (V.1, V.2, V.4, V.12, V.13, V.14, V.15, V.16).

Méthode AM86 Modernisé

Diamètre (m)	Rayon (m)	H _C (m)	E _R (t/an)	E _M (t/an)	E _T (t/an)
10	5	63,661977	8,97343661	276,997244	285,97068
12	6	44,209706	10,213568	276,997244	287,210812
14	7	32,480601	11,3948787	276,997244	288,392122
16	8	24,86796	12,5280647	276,997244	289,525308
18	9	19,648758	13,6207894	276,997244	290,618033
20	10	15,915494	14,6787846	276,997244	291,676028
22	11	13,153301	15,7064813	276,997244	292,703725
24	12	11,052427	16,7073966	276,997244	293,70464
26	13	9,4174523	17,6843816	276,997244	294,681625
28	14	8,1201502	18,6397894	276,997244	295,637033
30	15	7,073553	19,5755913	276,997244	296,572835

Méthode AP42

D m	h_c (m)	h_L (m)	h_{T0} (m)	h_E (m)	h_v (m)	V_v (m ³)	K_S	E_R (t/an)	E_M (t/an)	E_T (t/an)
10	63.64	59,2075	0,3125	0,1041	4,5606	358,180	0,1750	11,3909	230,9415	242,3328
12	44.211	41,1163	0,375	0,125	3,2197	364,136	0,2311	15,2883	230,9419	246,2302
14	32.4816	30,2079	0,4375	0,1458	2,4195	372,44	0,2857	19,3313	230,9419	250,2733
16	24.8687	23,1279	0,5	0,1666	1,9074	383,500	0,3366	23,45041	230,9419	254,3923
18	19.6493	18,2739	0,5625	0,1875	1,5629	397,711	0,3824	27,6293	230,9419	258,5713
20	15.9160	14,8018	0,625	0,2083	1,3224	415,447	0,4225	31,8922	230,9419	262,8341
22	13.1532	12,2329	0,6875	0,2291	1,1499	437,110	0,4570	36,2888	230,9419	267,2307
24	11.052	10,2790	0,75	0,25	1,0236	463,0937	0,4859	40,8827	230,9419	271,8247
26	9.4117	8,7585	0,8125	0,2708	0,9300	493,788	0,50995	45,7428	230,94195	276,6847
28	8.1204	7,5519	0,875	0,2916	0,8600	529,588	0,52947	50,9373	230,9419	281,8793
30	7.0737	6,5786	0,9375	0,3125	0,8076	570,886	0,54511	56,5309	230,9419	287,4728

Selon les calculs faits précédemment et le graphe ci-dessous, on constate que l'augmentation de diamètre génère une croissance de quantité perdue par évaporation. Un diamètre plus grand permet à un grand nombre de molécules qui se trouve à la surface de se détacher de la masse de liquide plus facilement (car ils n'ont pas une forte liaison).

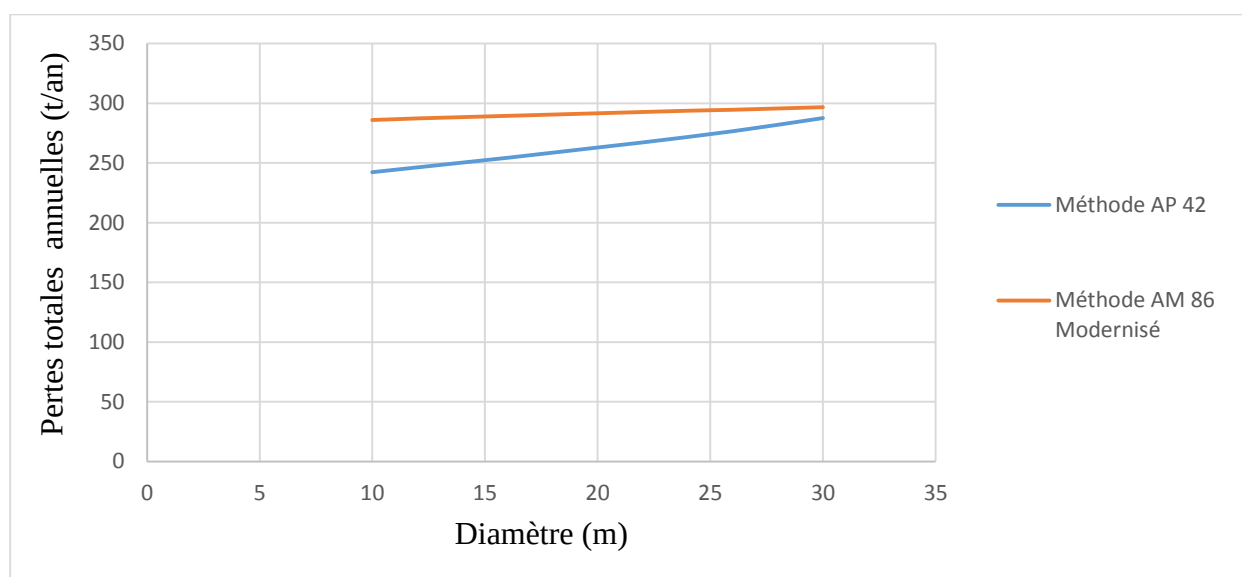


Figure V.3 : Variation des pertes annuelles en fonction de diamètre de réservoir

V.5.2. Influence de type de joint sur les pertes par évaporation dans les bacs à toit flottant

Pour connaître l'influence de type de joint sur l'évaporation, on considère à chaque fois un type donnée de joint et on calcul les pertes par évaporation en utilisant les formules (V.6, V.8, V.10, V.33, V.34, V.35) des deux méthodes (AM86 Modernisé et AP42).

Méthode AP42

Type de joint	Kra	FR (Kg. Mole/an)	EP (t/an)	EM (t/an)	ET (t/an)
PM	8,63	138,08	2,257092	0,0621851	2,319277
JG	9,97	159,52	2,4505828	0,0621851	2,5127678
JL	2,38	38,08	1,3546162	0,0621851	1,4168012
PM/PS	2,38	38,08	1,3546162	0,0621851	1,4168012
PM/JS	0,89	14,24	1,1394659	0,0621851	1,201651
JL/EP	1,04	16,64	1,1611254	0,0621851	1,2233104
JL/JS	0,45	7,2	1,0759316	0,0621851	1,1381167
JG/EP	4,91	78,56	1,7199384	0,0621851	1,7821234
JG/JS	3,27	52,32	1,4831287	0,0621851	1,5453138

Méthode AM86 Modernisé

Type de joint	F	EED (t/an)	EM (t/an)	ET (t/an)
PM	14,9	3,0706704	0,0922182	3,1628886
JG	17,1	3,2525136	0,0922182	3,3447318
JL	4,1	2,1779856	0,0922182	2,2702038
PM/PS	4	2,16972	0,0922182	2,2619382
PM/JS	1,5	1,96308	0,0922182	2,0552982
JL/EP	1,8	1,9878768	0,0922182	2,080095
JL/JS	0,8	1,9052208	0,0922182	1,997439
JG/EP	8,5	2,541672	0,0922182	2,6338902
JG/JS	5,6	2,3019696	0,0922182	2,3941878

Après avoir fait les calculs, on trace l'histogramme ci-dessous :

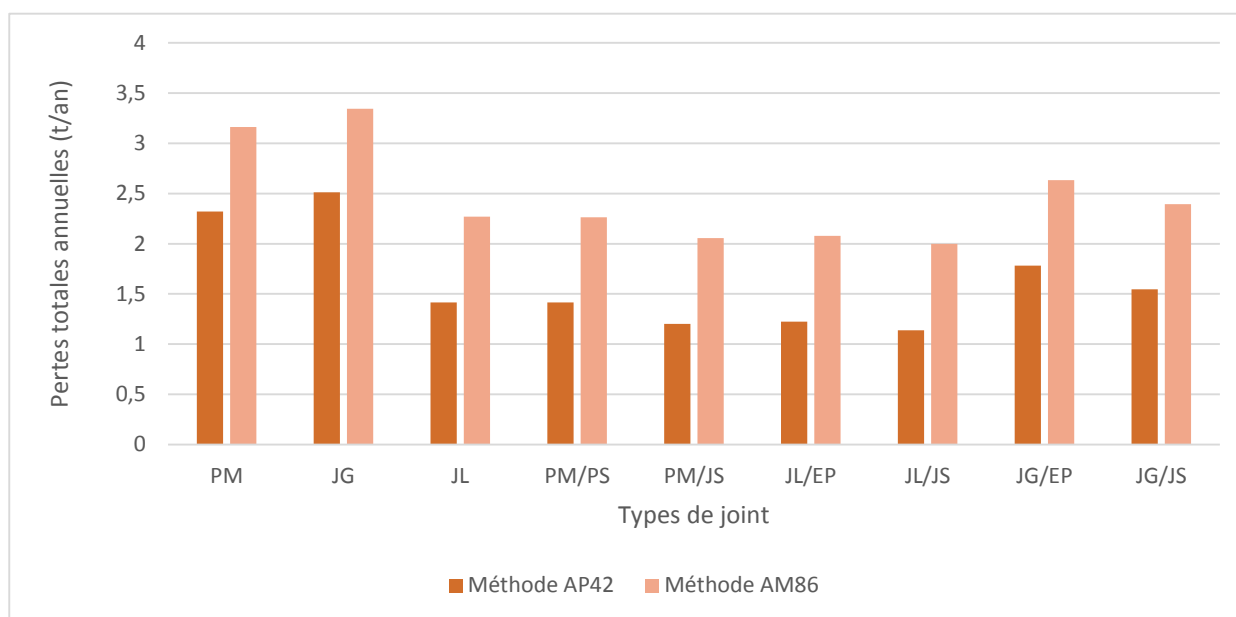


Figure V.4 : Variation des pertes annuelles en fonction des types de joint

D'après cet histogramme, on constate que les types de joint ont une influence importante sur les pertes par évaporation dans les bacs à écran flottant ou à toit flottant.

On constate aussi que l'installation d'un joint secondaire réduit les pertes par évaporation d'une manière importante (car l'étanchéité en périphérie du toit).

Nb :

La réduction obtenue peut atteindre dans certains cas, avec un joint secondaire bien adapté et correctement installé, 90 % des émissions du joint primaire.

V.5.3. Influence de nature de produit ' sa volatilité ' sur les pertes par évaporation

La volatilité de produit a une influence sur l'évaporation du liquide, pour connaître cette influence on prend les données de stage sauf les caractéristiques de produit quand fait varier en fonction de nature de produit et on fait le calcul des pertes par évaporation en utilisant les formules de la méthode AM86 modernisé (V.1, V.2, V.3, V.4, V.5), les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Produit	M _{Mol} (g/mol)	P _v	K ₁	E _R (t/an)	K ₂	E _M (t/an)	E _T (t/an)
essence super	70	410	0,02009	16,541827	0,00117957	276,997977	293,539804
Naphta	80	210	0,01176	9,68302071	0,00069048	162,145157	171,828178
pétrole	18,935	723,731	0,00959269	7,89848984	0,00056323	132,26264	140,161129
white spirite	130	3	0,000273	0,22478441	1,6029E-05	3,76408401	3,98886842

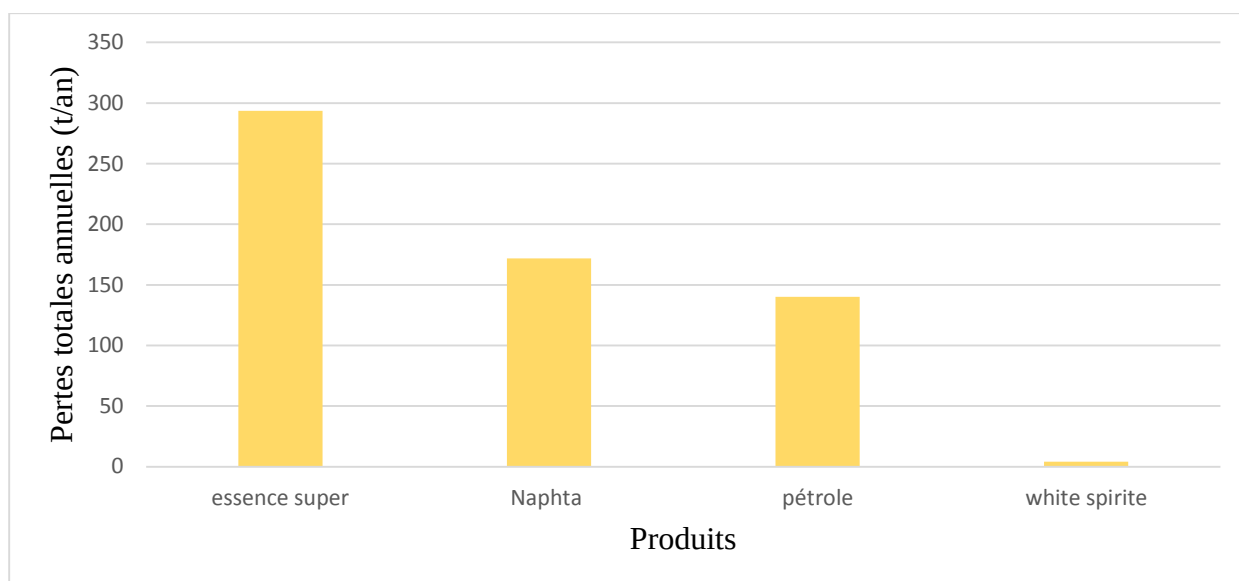


Figure V.5 : Variation des pertes annuelles en fonction de nature de produit

L'histogramme ci-dessus montre que l'évaporation dépend ainsi de la nature de produit stocké, plus le produit est volatil plus l'évaporation est importante.

V.6. Le coût lié aux pertes par évaporation chaque année

On prend les approximations suivantes :

1 tonnes = 1000 kg

1Kg de l'essence super $\rightarrow$ 0.726 litre d'essence super (car $\rho_{\text{essence super}} = 726.6 \text{ Kg/m}^3 = 0.726 \text{ Kg/l}$)

Coût d'un litre d'essence = 20.35 DA

Coût totale = $E_{\text{totale essence super}} \times \text{Coût d'un litre d'essence}$

Méthode AM 86 Modernisé

$E_{\text{totale essence super}} = 263.5598 \text{ tonnes par } = 263.5598 \times 10^3 \text{ kg} = 263.5598 \times 10^3 \times 0.726 \text{ litres}$

$E_{\text{totale essence super}} = 191.344 \times 10^3 \text{ litres}$

Le coût totale = $20.35 \times 191.344 \times 10^3 = 3\,893\,850 \text{ DA}$

Méthode AP42

$E_{\text{totale essence super}} = 260.4472 \text{ tonnes par } = 260.4472 \times 10^3 \text{ kg} = 260.4472 \times 10^3 \times 0.726 \text{ litres}$

$E_{\text{totale essence super}} = 189.084 \times 10^3 \text{ litres}$

Le coût totale = $20.35 \times 189.084 \times 10^3 = 3\,847\,859 \text{ DA}$

Le stockage de l'essence super dans les réservoirs de stockage (1 à toit fixe et 2 à écran flottant seulement) dans le dépôt Caroubier engendre un coût perdu important.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, j'ai élaboré une évaluation des pertes par évaporation durant le stockage de l'essence au niveau de dépôt « Caroubier » ainsi les moyens de les réduire et les procédés de récupération de ces vapeurs perdues.

Ce phénomène des pertes par évaporation est un sacré problème provenant de mouvement de liquide (remplissage et vidange es bacs), respiration des bacs, fuites à travers les joints, le toit.....etc et peuvent engendrer des conséquences graves à plusieurs échelles.

L'évaluation complète de ces émissions repose essentiellement sur la connaissance des différents facteurs qui interviennent dans le phénomène d'évaporation lors de stockage. Dans ce présent travail, je me suis intéressé à estimer la quantité de vapeurs d'essence perdue dans deux bacs différents, l'un à toit fixe et l'autre à écran flottant, en utilisant les formules API (Américain Petroleum Institute) qui sont basées sur les deux méthodes l'AM86 et AP42. Ces méthodes tiennent compte des paramètres et des dimensions des réservoirs et les conditions d'opération.

L'analyse des résultats de calcul par les deux méthodes a montré que la quantité de l'essence perdue dans les réservoirs à toit fixe est plus importante et ceci à cause de la volatilité des produits et la présence de volume important de la phase gazeuse dans ces réservoirs, on conclut donc que les bacs à toit flottant ou les bacs à écran flottant sont la meilleure solution pour amener les pertes par évaporation à un niveau plus bas.

D'après les graphes, j'ai déduit que les facteurs tels que diamètre de réservoir, vitesse de vent, type de joint favorisent les émissions par évaporation donc le choix optimale de diamètre et type de joint est nécessaire et l'utilisation des bacs à écran flottant dans les zones où il y a plus de vent est important.

Il existe plusieurs procédés pour la réduction des pertes par évaporation et récupération des vapeurs et le choix est déterminé par des conditions économiques (prix de revient des aménagements comparé à l'économie réalisé par la réduction des pertes).

Bibliographie

1. Mr CHAMAYOU, Réservoirs métalliques : stockage des liquides « Généralités ».
2. Mr.CEDRATI, Stockage de pétrole brut et des produits finis, formation industrie IAP SKIKDA, 2008.
3. Stockage des gaz liquéfiés, formation industrie, IFP Training, 2005.
4. Groupe d'Étude de Sécurité des Industries Pétrolières et Chimiques, partie stockage (émissions de COV).
5. HOFFMAN Pierre Alaine : Etude de deux procédés innovants pour le traitement d'effluents gazeux industriels faiblement pollués par des composés organiques volatiles, thèse de doctorat 2007, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCE APPLIQUEES, TOULOUSE
6. Groupe de travail sectoriel "GPL" : **Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie, explosion de gaz à l'air libre (UVCE)**, décembre 2006.
7. Groupe de travail sectoriel "GPL" : **Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie, explosion de gaz à l'air libre (BLEVE)**, décembre 2006.
8. SAYEGH Ahmed : Calcul des COV durant le stockage de l'essence dans le dépôt « Caroubier »,mémoire de Master 2010, Université M'hamed Bougara -BOUMEDES-
9. Documentation technique NFTAL.
10. Cours de stockages des liquides, Mr YOUNSI.
11. Cours des risques liés aux stockages des hydrocarbures Mme.BENRAHOU.

Tableau n°1 : Coefficient de couleur externe du réservoir

Couleur externe du réservoir	C
Aluminium brillant	1.1
Aluminium moyen	1.2
Aluminium mat	1.4
Aluminium métal poli	0.8
Blanc brillant	0.8
Blanc mat	1.0
Brun clair	1.4
Crème	1.1
Crème usé	1.2
Gris clair	1.4
Gris moyen	1.5
Gris moyen usé	1.6
Gris foncé	1.7
Noir	1.8
Rouge primaire	1.7
Vert sombre	1.7

Tableau n°2 : Coefficient du joint de l'écran flottant

Type de joint de toit flottant	F
Sans joint secondaire(PM)	14.9
Avec écran ou patin secondaire (PM/PS)	4.0
Avec joint secondaire flexible (PM/JS)	1.5
Sans joint secondaire (JL)	4.1
Avec écran ou patin secondaire (JL/EP)	1.8
Avec joint secondaire flexible (JL/JS)	0.8
Sans joint secondaire (JG)	17.1
Avec écran ou patin secondaire (PM/PS)	8.5
Avec joint secondaire flexible (JG/JS)	5.6

Tableau n°3 : Coefficient de structure (S° et de perméation (P) de l'écran flottant

Écran	Poteaux	S	P
Soudé /collé	Avec	0.45	0
Autre	Avec	0.45	0.56
Soudé	Sans	0.12	0
Soudé /collé	Sans	0.12	0.56

Tableau n°4 : Absorbance solaire du revêtement du réservoir

Couleur externe du réservoir	α (suivant l'état du réservoir)	
	Bon état	Mauvais état
Aluminium brillant	0.39	0.49
Aluminium mat	0.60	0.68
Aluminium métal poli	0.10	0.15
Blanc	0.17	0.34
Brun	0.43	0.55
Crème	0.35	0.49
Gris clair	0.54	0.63
Gris moyen	0.68	0.74
Marron	0.58	0.67
Noir	0.97	0.97
Rouge primaire	0.89	0.91
Rouille	0.43	0.55
Vert sombre	0.89	0.91

Tableau n°5 : Coefficient K_{RA} pour les réservoirs à écran flottant

Accessoires	K_{RA}
Patin mécanique primaire	
Sans joint secondaire (PM)	8.63
Avec écran ou patin secondaire (PM/PS)	2.38
Avec joint secondaire flexible (PM/JS)	0.89
Joint souple phase liquide	
Sans joint secondaire (JM)	2.38
Avec écran ou patin secondaire (JM/ES)	1.04
Avec joint secondaire flexible (JM/JS)	0.45
Joint souple phase gazeuse	
Sans joint secondaire (JG)	9.97
Avec écran ou patin secondaire (JG/EP)	4.91
Avec joint secondaire flexible (JG/JS)	3.27

Tableau n°6 : Coefficient K_F pour les réservoirs à écran flottant

Accessoire	K_F	Nombre conseillé
Sonde		1
Sonde	6.4	
Casse vide		Cf. tableau
Sans joint	3.5	
Avec joint	2.8	Type conseillé
Drain de secours		Cf. tableau
Drain toit flottant	0.82	
Drain écran flottant	0.5	
Event		1
Sans joint	0.31	
Avec joint	0.32	Type conseillé
Barre de guidage		0
Sans joint	14.1	
Avec joint	6.4	
Avec puits de jauge sans joint	19.5	
Avec puits de jauge sans joint	18.6	Type conseillé
Jambes d'écran flottant		Cf. tableau
Jambes d'écran flottant	3.6	
Puits d'échelles		1
Sans joint	44.5	
Avec joint	25.4	Type conseillé
Colonnes de toit		Cf. tableau
Sans joint	23.1	Type conseillé
Avec joint	15.0	

Tableau n°7 : Nombre de casse vides et de drains conseillés

Diamètre du réservoir (m)	Nombres de cases vides			Nombre de drains	
	Toit flottant simple pont	Toit flottant double pont	Ecran flottant	Toit flottant	Ecran flottant
15	1	1	1	1	0 pour les écrans $D^2/12$ pour les écrans boulonnées
30	1	1	1	1	
46	2	2	1	2	
61	3	2	1	3	
76	4	3	1	5	
91	5	3	1	7	
107	6	4	1	ND	
122	7	4	1	ND	

Tableau n°8 : Nombre de jambes pour les réservoirs à toit flottant interne

Accessoires	Nombre
Jambes	$5 + \frac{D}{3} + \frac{D^2}{56}$

Tableau n°9 : Coefficients de mouillabilité C des revêtements intérieurs des réservoirs

Liquide inflammables stockés	Etat de revêtement		
	Neuf ou légèrement oxydé	Très oxydé	Rugueux
Essence et autres produits mono composants	$2.57 * 10^{-6}$	$1.28 * 10^{-5}$	$2.57 * 10^{-4}$
Pétrole brut	$1.03 * 10^{-5}$	$5.13 * 10^{-5}$	$1.03 * 10^{-3}$

Tableau n°10 : Nombres de colonnes de toit pour les réservoirs à toit flottant interne

Diamètre du réservoir (m)	Nombre de colonnes de toit
$D \leq 26$	1
$26 < D \leq 30$	6
$26 < D \leq 37$	7
$26 < D \leq 41$	8
$26 < D \leq 46$	9
$26 < D \leq 52$	16
$26 < D \leq 58$	19
$26 < D \leq 67$	22
$26 < D \leq 72$	31
$26 < D \leq 82$	37
$26 < D \leq 84$	43
$26 < D \leq 88$	49
$26 < D \leq 101$	61