

*République Algérienne Démocratique et populaire*  
*Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique*  
*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.*

*Faculté du Génie de la Construction.*

*Département de Génie Mécanique.*



*Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie Mécanique*

*Option : **Énergétique***

**Thème**

***Etude du phénomène de Boil-Over***

***Proposé et dirigé par :***

***M<sup>r</sup> M.HAMZAOUI***

***Étudié par :***

***M<sup>elle</sup> HAMMAR Samia***

***Promotion : 2012/2013***

## REMERCEMENTS

*Je remercie tout d'abord « DIEU » tout puissant de m'avoir donné le courage  
d'effectuer ce mémoire de fin d'étude, dans les meilleures conditions*

*Comme je tiens à adressées tout autres reconnaissances et mes gratitude à :*

*Mon promoteur M<sup>er</sup> HAMZAOUI Malek, de m'avoir encadrée,*

*Suivie et orientée tout au long de mon travail.*

*Je remercie M<sup>er</sup> LOUNAOUCI Mohand qui m'a encouragée et aidée durant  
mes études.*

*Mes remerciements à M<sup>er</sup> TAACHACHETE.S et à tous mes enseignants.*

*Je remercie d'avance, les membres du jury d'avoir accepter d'examiner et juger  
mon travail.*

*Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la  
réalisation de ce mémoire.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chères grand-mères Fatima et Malha aux quelles je souhaite une longue vie.*

*A mes très chers parents Mebarek et djamila.*

*A mes frères et à mes sœurs.*

*A ma sœur Nassima et son marie Abderrahmane et leurs enfants mokrane et madjid qui va venir dans deux mois et à la grande famille.*

*A Khalti et sa famille et surtout yousra et ma tente et sa famille.*

*A Momoh qui ma toujours soutenu et aidé et à tous mes amis(es).*

*A toute la promotion de génie mécanique « Energétique » de 2012/2013.*



*Dédicaces*

*Dedicated*

# Liste des figures

---

Figure (I.1) : Molécule d'hydrocarbure .....	3
Figure(I.2) : Schéma de la formation du pétrole.....	6
Figure (I.3): Coupe simplifiée d'un bac de stockage .....	13
Figure (I.4): réservoir de stockage de brut.....	14
Figure (I.5) : réservoir à toit fixe.....	15
Figure (I.6) : bac à toit flottant.....	16
Figure(I.7) : Réservoir à toit flottant : vue externe.....	17
Figure (I.8) : Réservoir à toit flottant : vue interne.....	17
Figure (I.9) : Réservoir à écran interne.....	18
Figure(I.10) : bac de stockage cryogénique.....	19
Figure (I.11): Vue aérienne du dépôt de Gennevilliers (France) .....	20
Figure (I.12): Barils de pétrole .....	21
Figure(II.1) : Mécanisme de formation de l'onde de chaleur.....	27
Figure (II.2): représentation schématique des différentes phases d'un boil- over classique....	28
Figure (II.3): Mécanisme du boil over.....	32
Figure(II.4) : représentation schématique des différentes phases d'un boil- over en couche mince.....	36
Figure (III.1) : propagation de l'onde de chaleur.....	42
Figure III 1-b (temps $t_{bo}$ ).....	42
Figure III 1-a (temps $t$ ) .....	42
Figure(III.2): Courbe de distillation d'hydrocarbure – Approximation par une droite.....	43
Figure (III.3) : l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure.....	53
Figure (III3a) : l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure .....	53
Figure (III.3b) : l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure avec échelle logarithmique.....	53
Figure (III.4) : courbe de temps de déclenchement du boil over en fonction de la fraction d'hydrocarbure.....	54
Figure (III.5) : Temps de déclenchement en fonction de H.....	55

# Liste des figures

---

Figure (III.6) : Temps de déclenchement en fonction de la température d'onde de chaleur.....	56
Figure(III.7) : Onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil.....	62
Figure(III.7.a) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil.....	62
Figure(III.7.b) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil avec échelle logarithmique.....	62
Figure (III.8) : courbe de temps de déclenchement du boil over en fonction de la fraction de fuel oil.....	63
Figure (III.9): Temps de déclenchement en fonction de H pour le fuel oil.....	64
Figure (III.10): Temps de déclenchement en fonction de la température d'onde de chaleur pour le fuel-oil.....	65
Figure (IV.1):Raffinerie d' Amoco (Milford Haven GB) – 1983.....	74
Figure (IV.2) : Raffinerie d'Orion (USA) – 2001.....	75
Figure(IV.3): Dépôt de carburant Buncefiled (GB) – 2.....	76
Figure (IV.4): Terminal de Stockage de Skikda RTE 2005.....	77
Figure (IV.5): flamme rouge et fumée noire.....	78
Figure (IV.6): flamme bleu et verte.....	78
Figure (IV.7): Les Feux d'évent.....	79
Figure (IV.8) : Les Feux de joint.....	79
Figure (IV.9): Feux de surface obstruée par un toit coulé.....	80
Figure (IV.10): Feux de pleine surface.....	81
Figure (IV.11): Les feux de cuvette.....	82

# Liste des tableaux

---

Tableau (I.1) : Les familles des hydrocarbures (pétrole).....	9
Tableau (III.1) : Résultats de calcul de $t_{BO}$ , $T_{WAV}$ et $X_{BO}$ .....	48
Tableau (III2) : Résultats de calcul de $t_{BO}$ , $T_{WAV}$ et $X_{BO}$ .....	57

## Nomenclatures

Symbole	description
T	Température [k]
$C_p$	La chaleur massique [J/kg.k]
$v_1$	La vitesse de combustion [m/s]
$\rho$	La masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
$L_v$	La chaleur latente de vaporisation [J/kg]
$\Delta H$	La chaleur de combustion [J/kg]
$\nu$	Viscosité cinématique [st]
R	Rayon [m]
V	Volume [m <sup>3</sup> ]
t	Temps [s]
M	Masse de brut projeté [kg]
X	Fraction d'hydrocarbure brûlée dans la boule [%]
S	Surface [m <sup>2</sup> ]
$T_{wav}$	Température de l'onde de chaleur [k]
$X_{BO}$	Fraction d'hydrocarbure vaporisée [%]
$M_{VAP}$	Masse de vapeur [kg]
$M_{LIQ}$	Masse d'hydrocarbure contenue dans le bac au début de l'incendie [kg]
$V_{bp}$	Volume de brut projet [m <sup>3</sup> ]

## Nomenclatures

---

$T_{FLA}$	Température de flamme [k]
$H_{iBO}$	Hauteur de brut à l'instant du déclenchement du boil-over [m]
LSI	Limite supérieure d'inflammabilité [% vol]
$R_{FB}$	Rayon de la boule de feu [m]
$V_{FB}$	Volume de boule de feu [m <sup>3</sup> ]
$t_{FB}$	Durée de vie de la boule de feu [s]
$h_{FB}$	Hauteur du centre de la boule de feu [m]

# Table des matières

---

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
-----------------------------------	----------

## **Chapitre I : Généralités sur le pétrole et son stockage**

I.1 .Introduction .....	3
I .2. Généralités sur le pétrole .....	3
I.2.1. Introduction.....	3
I.2.2 .Définition du pétrole .....	3
I. 2.3. Historique.....	4
I.2.4 La formation du pétrole .....	6
I.2.5. Les Propriétés physiques et chimiques.....	7
I.2.5.1. Propriétés physiques.....	7
I.2.5.2. Propriétés chimiques.....	8
I.2.6. Composition chimique des produits pétroliers.....	9
I.2.7 .Les familles des hydrocarbures (pétrole) .....	9
I.2.8. Classification du pétrole .....	10
I.2.9. Raffinage.....	11
I.2.9.1. La distillation du pétrole brut.....	11
I.2.9.2. La transformation.....	12
I.2.9.3. L'amélioration .....	12
I.2.10. Conclusion .....	12
I.3. Le stockage de pétrole .....	13
I.3.1. Introduction .....	13
I.3. 2. Types du réservoir de stockage de brut .....	14
I.3. 2.1 Les cuves ouvertes.....	14

# Table des matières

---

I.3. 2.2. Réservoir à toit fixe.....	15
I.3. 2.3.Réservoir à toit flottant.....	16
I.3. 2.4.Réservoirs cryogéniques.....	18
I.3. 3. Classification des réservoirs.....	22
I.3. 4.Modes de stockage.....	22
I.3. 4.1. Liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante.....	22
I.3.4.2. Liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante.....	22
I.2. 4.3 .Trois modes de stockage peuvent être envisagés.....	23
I.3. 4. Conclusion.....	24
I.4. Conclusion .....	24

## **Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)**

II.1. Introduction .....	25
II.2. Boil over classique.....	25
II.2.1.Introduction.....	25
II.2.2.Définition du phénomène de boil over « classique ».....	25
II.2.3.L'onde de chaleur .....	26
II.2.4.Effet piston.....	27
II.2.5.Les différentes phases d'un boil-over.....	28
II.2.6.Les conditions d'occurrence du phénomène de boil over « classique ».....	30
II.2.7.Mécanisme du boil over .....	32
II.2.8.Comment en peut savoir si un liquide à l'origine d'un boil over ou non ?.....	33

# Table des matières

---

II.2.3.conclusion.....	33
II.3. Boil over en couche mince.....	33
II.3.1.Introduction .....	33
II.3.2. Définition et description du phénomène de boil over « en couche mince ».....	33
II.3.3. Les différentes étapes conduisant à un boil-over en couche mince .....	35
II.3.4. Conditions d'occurrence du boil over « en couche mince ».....	37
II.3.5. Description du modèle de boil over en couche mince.....	37
II.3.6.conclusion.....	38
II.3. conclusion.....	39

## **Chapitre III : Analyse phénoménologique du phénomène de boil-over classique**

III.1.Introduction.....	40
III.2.Modélisation du phénomène.....	40
III.2.1.Quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu.....	40
III.2.1.1.La vitesse de combustion de l'hydrocarbure $v_1$ .....	40
III.2.1.2.La vitesse de propagation $v_2$ .....	41
III.2.1.3.Le temps de déclenchement du boil over.....	41
III.2.1.4.calculer la température de l'onde de chaleur $T_{WAV}$ .....	41
III.2.1.5.La fraction d'hydrocarbure vaporisée $X_{BO}$ .....	44
III.2.1.6.La masse de vapeur $M_{VAP}$ .....	44
III.2.1.7.Le volume de brut projeté .....	44
III.2.1.8.La masse de brut projeté.....	45
III.2.2.Calcul des caractéristiques de la boule de feu.....	45
III.2.2.1.La température de flamme $T_{FLA}$ .....	45
III.2.2.2.La concentration $C$ d'hydrocarbure présent dans la boule de feu.....	45
III.2.2.3.Le volume $V_{FB}$ de la boule de feu .....	45
III.2.2.4.Le rayon de la boule de feu .....	45
III.2.2.5.La durée de vie de la boule de feu $t_{FB}$ .....	46

# Table des matières

---

III.2.2.6.La hauteur $h_{FB}$ du centre de la boule de feu.....	46
III.2.3.Calcul des effets thermiques de la boule de feu .....	46
III.2.3.1.Les effets létaux significatifs.....	46
III.2.3.2.Les effets létaux.....	47
III.2.3.3.Les effets irréversibles.....	47
III.3. l'application numérique .....	47
III.3.1.le boil over classique avec le produit inflammable « brut léger » .....	47
III.3.1.1.Calcul de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu.. .....	47
III.3.1.2.Calcul des caractéristiques de la boule de feu.....	50
III.3.1.3.Calcul des effets thermiques de la boule de feu .....	51
III.3.1.4. présentation graphique.....	53
III.3.2.le boil over classique avec le produit inflammable « fuel oil ».....	56
III.3.2.1.Calcul de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu.....	56
III.3.2.2. Calcul des caractéristiques de la boule de feu .....	59
III.3.2.3. Calcul des effets thermiques de la boule de feu.....	61
III.3.2.4. présentation graphique .....	61
III.4.Conclusion.....	66
<b>Chapitre IV : les risques de boil over et ces préventions</b>	
IV.1. Introduction .....	67
IV.2. Conditions nécessaires pour la naissance d'un boil over.....	67
IV.2.1.Présence d'eau.....	68
IV.2. 2. Onde de chaleur ou zone chaude.....	68
IV.2. 3.Hydrocarbure suffisamment visqueux.....	69
IV.2. 4.Hydrocarbures susceptibles de produire un boil over.....	69
IV.3. Les Stratégies de Lutte Contre l'Incendie.....	70
IV.3. 1. Stratégie passive.....	70
IV.3. 2. Stratégie défensive .....	70
IV.3. 3. Stratégie offensive.....	70
IV.4. Les préventions .....	71

# Table des matières

---

IV.4.1. Préventions liées au stockage des hydrocarbures.....	71
IV.4.2. Mesures prévention contre le risque explosion incendie.....	71
IV.4.3. Mesures de prévention générale contre l'incendie .....	71
IV.4.4. Installation des liaisons équipotentielles .....	71
IV.4.5. Mesures de prévention contre la corrosion .....	72
IV.4.6. Débordement ou avarie d'une capacité .....	73
IV.4.7. Mesures de prévention contre la pollution des sols et plan d'eau.....	73
IV.4.8. Systèmes de Protection des réservoirs .....	73
IV.5.quelque accidents de boil over .....	74
IV.5.1. Refineries D'Amoco (Milford Haven GB) – 1983 .....	74
IV.5.2. Raffinerie d'Orion (USA) – 2001 .....	75
IV.5.3. Dépôt de carburant Buncefiled (GB) – 2005 .....	75
IV.5.4. Terminal de Stockage de Skikda RTE 2005 .....	76
IV.6. Précautions et Consignes d'Extinction des Feux de Bac.....	77
IV.6.1. Les Feux d'évent .....	77
IV.6.2. Les Feux de joint .....	79
IV.6.3. Feux de surface obstruée par un toit coulé.....	80
IV.6.4. Feux de pleine surface .....	80
IV.6.5. Les feux de cuvette .....	81
IV.7. Conclusion.....	82
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>83</b>

## **Bibliographique**

## Introduction générale

---

Depuis la fin du XIXe siècle et plus encore au début du XXe siècle, le pétrole a pris toute son importance comme combustible en vue de produire de l'énergie, afin de subvenir à nos besoins, de plus en plus importants. Cependant les produits pétroliers peuvent causer ou conduire à des phénomènes très dangereux liés aux stockages de ces substances (produits pétroliers). On en veut pour exemples :

- § Le boil over ;
- § Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) ;
- § UVCE (Unconfined Vapor Cloud Explosion).

Dans notre étude, nous nous intéressons au boil over qui est un phénomène de moussage de grande ampleur impliquant des réservoirs et résultant de la vaporisation d'eau liquide contenue dans des réservoirs atmosphériques d'hydrocarbures en feu. Ce phénomène est à l'origine de violentes projections de liquide enflammé et de la formation d'une boule de feu.

Nous distinguons deux types de boil over :

- ü Le boil over classique ;
- ü Le boil over en couche mince.

Pour que le 1<sup>er</sup> type se réalise, il faut que les conditions suivantes soient réunies. Celles-ci sont:

- Ø La présence d'eau dans le réservoir ;
- Ø L'incendie prolongé en partie supérieure du bac de stockage ;
- Ø La propagation d'une onde de chaleur ;
- Ø La vaporisation de l'eau (1 m<sup>3</sup> d'eau donne 1600 à 2000 m<sup>3</sup> de vapeur).

Pour que le second type se réalise, il faut que les conditions sus-citées soient réunies à l'exclusion de la propagation de l'onde de chaleur.

L'objectif de notre travail consiste à réaliser une étude numérique pour le boil over classique afin de déterminer la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu, les caractéristiques de cette boule de feu et en dernier les effets du rayonnement de la boule de feu pour deux produits : le pétrole brut léger et fuel oil.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons présenté notre travail comme suit :

Pour le chapitre I porte sur les généralités sur le pétrole et son stockage. Ce chapitre contient deux parties sont distinguées :

La 1<sup>ère</sup> partie est consacrée aux généralités sur le pétrole et la 2<sup>ème</sup> présente le stockage du pétrole et les types de bacs.

## Introduction générale

---

Dans le chapitre II sont présentées les définitions de deux types de boil-over (le boil-over classique et le boil-over en couche mince) et les différentes phases de réalisation de ce phénomène.

Le chapitre III présente les équations mathématiques qui décrivent le boil-over classique et les programmes sur Matlab. Le programme de calcul utilisé est langage Matlab qui permet de faire les calculs, la modélisation de ce phénomène et présenter les différents résultats trouvés.

Dans le chapitre IV sont illustrés les risques et la prévention de boil-over. L'étude se termine par une conclusion générale.

## I.1 Introduction

Dans le monde il existe plusieurs sources primaires d'énergie qui peuvent couvrir nos besoins énergétiques tels que le pétrole et les énergies renouvelables (énergie solaire, etc.). Dans ce chapitre on s'intéresse à l'énergie fossile qu'est le pétrole et son mode de stockage.

## I.2. Généralités sur le pétrole

### I.2.1. Introduction

Le pétrole, de "Pétra" et "oléum" en latin qui signifie "l'huile de pierre", est une huile minérale naturelle accumulée en gisement et utilisée comme source d'énergie.

Elle se crée à partir d'une accumulation de matière organique et d'une transformation de celle-ci après plusieurs millions d'années.

### I.2.2. Définition du pétrole

Le pétrole -l'or noir- désigne un liquide composé principalement de molécules d'hydrocarbures (formées uniquement de carbone et d'hydrogène). Ce pétrole contient également, en proportions assez variables (15 % en moyenne), des molécules lourdes plus complexes (incluant de l'oxygène, de l'azote et du soufre) appelées résines ou asphaltènes. Ce pétrole s'est formé à partir d'organismes vivants (algues, plancton, parfois végétaux continentaux, etc.) qui ont vécu il y a fort longtemps. [1]

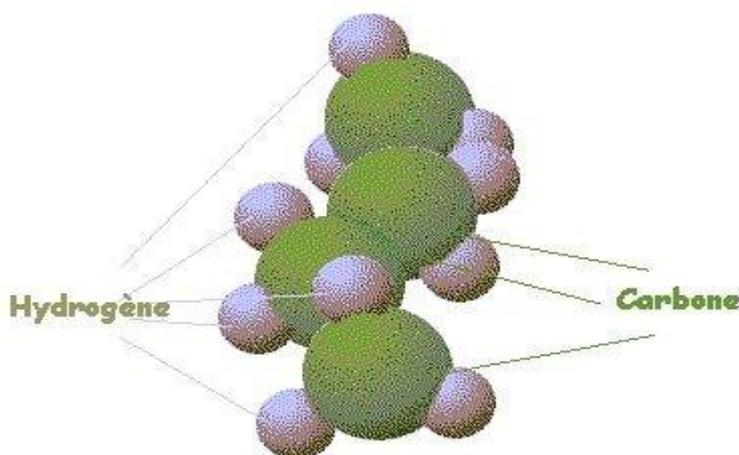


Figure (I.1) : La molécule d'hydrocarbure [1]

### I.2.3. Historique

Les dépôts de surface de pétrole brut sont connus depuis très longtemps. La Bible mentionne le bitume, employé pour recouvrir l'arche de Noé. Le pétrole, remonté à la surface sous forme de suintement de bitume, était utilisé par les peuples de Mésopotamie, il y a plus de trois mille ans, comme mortier dans la construction des remparts, pour le calfatage des coques des navires et pour assurer l'étanchéité des citernes et conduites d'eau, comme source d'énergie et même comme médicament.

Connues depuis l'Antiquité, les utilisations du pétrole à des fins médicales se sont développées dès le XV<sup>e</sup> siècle. On attribuait alors au pétrole plusieurs vertus.

Au Moyen Âge, on utilisait des sortes de grenades en terre cuite remplies de pétrole et de salpêtre, appelées « feux grégeois », qui furent la hantise des marins : lancées d'un navire, elles explosaient en laissant échapper le pétrole, qui s'enflammait, se répandait sur l'eau et propageait le feu aux autres navires.

La révolution industrielle entraîna la recherche de nouveaux combustibles. Les bouleversements sociaux qu'elle occasionna créèrent le besoin d'un pétrole peu onéreux et de bonne qualité pour les lampes. Toutefois, l'huile de baleine n'était accessible qu'aux riches, les bougies de suif avaient une odeur désagréable et les becs de gaz n'existaient que dans les maisons et appartements modernes des zones urbaines.

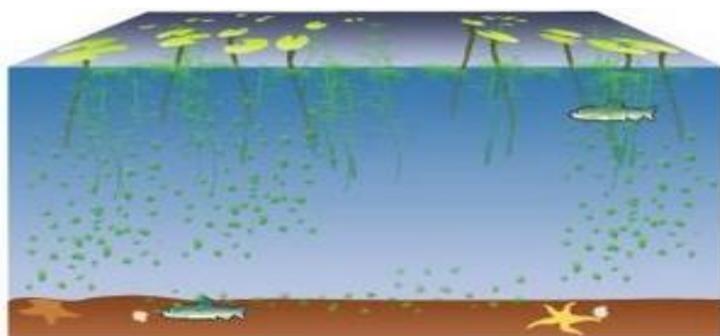
La recherche d'un meilleur combustible de lampe entraîna une forte demande d'« huile de roche » — c'est-à-dire de pétrole brut —. Vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, de nombreux scientifiques mirent au point des procédés permettant d'en faire un usage commercial. C'est ainsi que James Young, en Angleterre, commença à fabriquer différents produits à partir du pétrole brut, mais il s'orienta par la suite vers la distillation du charbon et l'exploitation des schistes bitumeux. Le physicien et géologue canadien Abraham Gessner déposa, en 1852, un brevet pour obtenir, à partir du pétrole brut, un combustible peu onéreux pour lampe, brûlant sans résidu, appelé pétrole lampant ; En 1855, le chimiste américain Benjamin Silliman publia un rapport indiquant la gamme de produits utiles pouvant être obtenus par distillation du pétrole.

C'est ainsi que débuta la recherche de plus importantes sources d'approvisionnement en pétrole brut. On savait que les puits creusés pour l'eau et le sel présentent parfois des infiltrations de pétrole. L'idée de forages pétroliers fit donc naturellement son chemin. Les

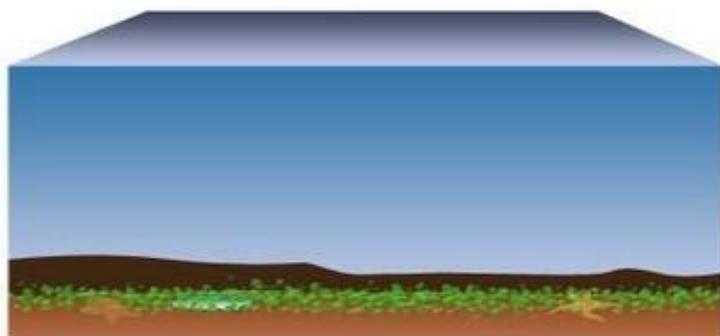
premiers puits furent forés en Allemagne, en 1857. L'initiative qui rencontra le plus grand retentissement fut cependant celle d'Edwin L. Drake, le 27 août 1859, à Titusville, en Pennsylvanie. Drake procéda à des forages pour trouver la « nappe mère », origine des affleurements de pétrole de Pennsylvanie occidentale. Si Drake ne put extraire qu'un pétrole d'écoulement aisé et facile à distiller et si le puits était peu profond — 23 m seulement —, sa réussite n'en marquait pas moins le début de l'industrie pétrolière moderne. Cette découverte déclencha une véritable ruée vers l'« or noir ».

Depuis, on a découvert du pétrole sur tous les continents, sauf en Antarctique. Le pétrole fit rapidement l'objet de toute l'attention de la communauté scientifique, et des hypothèses cohérentes furent émises quant à sa formation, sa remontée à travers les couches terrestres et son emprisonnement. Avec l'invention de l'automobile, en 1880, et les besoins en énergie issus de la Première Guerre mondiale, l'industrie du pétrole devint l'un des fondements de la société industrielle. [2]

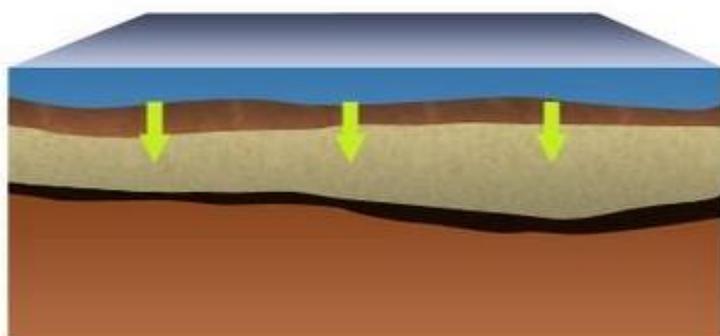
## I.2.4. La formation du pétrole



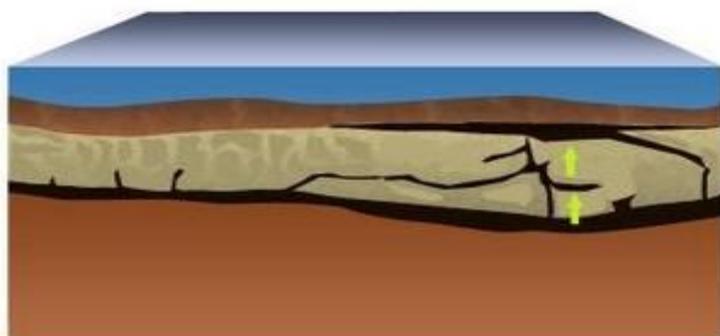
1. Les plantes et les animaux marins meurent et coulent au fond de l'océan



2. La vase recouvre la couche de plantes et d'animaux morts



3. Avec le temps, les sédiments s'accumulent et compriment les plantes et les animaux jusqu'à ce qu'ils se transforment en pétrole.



4. Le pétrole remonte à travers la roche poreuse et forme un réservoir.

Figure(I.2) : Schéma de la formation du pétrole [3]

L'origine du pétrole aura donc son importance pour :

- La production des produits « finis » (adaptation des marchés) ;
- Les procédés d'exploitation ;
- L'analyse des risques.

## **I.2.5. Les propriétés physiques et chimiques**

### **I.2.5.1. Propriétés physiques**

- **État naturel**

Dans la nature, les hydrocarbures se présentent le plus souvent sous la forme d'un liquide que l'on appelle le pétrole brut. Il existe cependant des gisements d'hydrocarbures gazeux, et plus exceptionnellement des gisements d'hydrocarbures solides sous forme de sables ou de schistes bitumeux. Le pétrole brut est un mélange d'hydrocarbures que l'on doit séparer par raffinage pour obtenir des produits utilisables.

L'opération de raffinage donne des produits gazeux, liquides et solides.

- **Densité**

Presque tous les hydrocarbures liquides sont plus légers que l'eau. Pour les produits les plus courants, la densité varie de 0,7 à 0,9.

- **Point éclair**

C'est la température la plus basse où la concentration des vapeurs émises est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou d'un point chaud, mais insuffisante pour produire la propagation de la combustion en l'absence de la flamme "pilote".

- **Température d'auto inflammation**

C'est la température minimale pour laquelle un mélange combustible, de pression et de composition donnée, s'enflamme spontanément sans contact avec une flamme.

- **Vapeurs**

Les hydrocarbures liquides émettent des vapeurs inflammables dans certaines conditions de température et de pression.

Les hydrocarbures gazeux sont entièrement à l'état de vapeur dans les conditions normales de température et de pression.

À l'exception du méthane et de l'acétylène qui sont plus légers que l'air, de l'éthane et de l'éthylène qui ont une densité voisine de l'air, les autres vapeurs d'hydrocarbures sont plus lourdes que l'air (2,5 à 3 fois). Aussi, tendent-elles à s'accumuler dans les parties basses :

caniveaux, fosses, sous-sols et à y séjourner faute de ventilation suffisante. Toutefois, elles se diffusent dans l'atmosphère suivant les mouvements de l'air.

Ces vapeurs peuvent former avec l'air des mélanges inflammables.

Un litre d'essence peut produire, en s'évaporant, environ 200 litres de vapeurs. Ces 200 litres de vapeurs, mélangés à l'air, donnent un mélange inflammable d'environ 13 000 litres (volume d'une petite pièce). [9]

- **Tension de vapeur**

Les vapeurs d'hydrocarbures exercent dans une enceinte fermée, une pression déterminée et constante pour chaque température. Cette pression s'appelle " tension de vapeur ".

Elle augmente rapidement avec la température.

Lorsque la température est stable, l'évaporation de liquide cesse dès que la tension de vapeur est atteinte. Ces données sont importantes en cas d'incendie car :

- Un récipient clos contenant des hydrocarbures peut être soumis à des pressions internes rapidement croissantes avec la température
- L'évaporation à l'air libre d'un hydrocarbure s'accroît avec l'élévation de la température et la turbulence de l'air. [9]

### **I.2.5.2. Propriétés chimiques**

Les propriétés chimiques des hydrocarbures sont innombrables et la chimie est certainement loin d'avoir exploré la totalité des domaines offerts par l'aptitude qu'a l'atome de carbone à réaliser des combinaisons chimiques. Cependant, deux grandes familles de propriétés chimiques sont intéressantes.

- **Propriétés de liaison**

L'atome de carbone peut non seulement être associé à des atomes d'hydrogène, mais encore être lié à un autre atome de carbone qui sera lui-même lié à d'autres atomes d'hydrogène.

Cette aptitude permet la formation de chaînes linéaires ou fermées. Si l'on ajoute que les atomes d'hydrogène peuvent être remplacés par d'autres atomes, on peut imaginer la multitude de combinaisons possibles et par conséquent le nombre considérable de produits imaginables.

- **Propriétés d'oxydation**

L'action brutale de l'oxygène sur les hydrocarbures conduit à une oxydation rapide qui détruit l'édifice moléculaire en formant du gaz carbonique et de l'eau en libérant une grande

quantité de calories. La quantité de chaleur ainsi dégagée est très importante : 1 kg de combustible a un pouvoir calorifique d'environ 1 000 kilocalories.

Cette aptitude des hydrocarbures à fournir de l'énergie sous forme de chaleur est exploitée à grande échelle pour toutes sortes de besoins industriels et domestiques lorsque la combustion est contrôlée.

Mais cette dernière peut également être accidentelle et dans ce cas provoqué de dégâts importants, voire même des catastrophes. [3]

### I.2.6. Composition chimique des produits pétroliers

Le pétrole est un mélange complexe majoritairement constitué d'hydrocarbures (93 à 99 %) mais également de composés organiques soufrés (0,01 à 6 %), azotés (0,05 à 0,5 %), oxygénés (0,1 à 0,5 %) et de certains métaux (0,005 à 0,15%), tels que le nickel et le vanadium. Il est composé d'un continuum de molécules hydrocarbonées pouvant comporter de quelques unités à plus d'une centaine d'atomes de carbone. [4]

### I.2.7. Les familles des hydrocarbures (pétrole)

Une distinction des hydrocarbures par familles chimiques peut-être effectuée en fonction du degré d'insaturation de la structure des molécules :

- Û **Les hydrocarbures aliphatiques saturés** : paraffines normales dites N-paraffines (alcane linéaires) ou iso-paraffines (alcane ramifiés).
- Û **Les hydrocarbures aliphatiques insaturés** : oléfines (alcènes) qui ne se rencontrent pas ou très peu dans le pétrole brut du fait de leur réactivité. Cependant, les oléfines peuvent être produites lors des procédés de raffinage et notamment lors de procédés de conversion des coupes lourdes.
- Û **Les hydrocarbures aliphatiques cycliques saturés** : naphthènes qui sont des cycles carbonés de 5 ou 6 atomes pouvant comporter un ou plusieurs cycles et des chaînes ramifiées.
- Û **Les hydrocarbures aromatiques** : composés cycliques polyinsaturés présents en forte quantité dans les coupes les plus lourdes. Ils peuvent contenir un ou plusieurs Cycles aromatiques et/ou naphthéniques et/ou des chaînes ramifiées. [4]

Les formules chimiques se présentent dans le tableau suivant :

Familles	N-paraffines	Iso-paraffines	Oléfines	Naphtènes	Aromatiques
Formules	$C_nH_{2n+2}$	$C_nH_{2n+2}$	$C_nH_{2n}$	$C_nH_{2n}$	$C_nH_{2n-8k}$

Tableau (I.1) : Les familles des hydrocarbures (pétrole) [4]

$n$  : nombre d'atomes de carbones

$k$  : nombre d'insaturations

### I.2.8. Classification du pétrole

Tout processus de formation est unique : un gisement de pétrole contient un mélange d'hydrocarbures qui le caractérise selon l'histoire géologique de la zone où il s'est développé.

La provenance géographique est donc un des critères de classification du pétrole (Golfe Persique, mer du Nord, Venezuela, Nigeria, etc.). Toutefois, pour établir des comparaisons entre différents sites, d'autres critères existent. Les plus importants sont les mesures de la viscosité et de la teneur en soufre du pétrole brut.

Selon la viscosité, quatre types de gisements sont définis (léger, moyen, lourd ou extra-lourd et bitume). Plus le pétrole brut est visqueux, plus il est « lourd » :

- **les gisements de pétrole léger** : l'aspect du pétrole brut se rapproche de celui du gazole. Les gisements sahariens présentent cette caractéristique ;
- **les gisements de pétrole moyen** : la viscosité du pétrole brut est intermédiaire entre le pétrole léger et le pétrole lourd. Il s'agit par exemple des gisements du Moyen-Orient ;
- **les gisements de pétrole lourd ou extra-lourd** : le pétrole brut ne coule pratiquement pas à la température ambiante. Les gisements d'Amérique du sud en sont un exemple ;
- **les gisements de bitume** : le pétrole brut est très visqueux voire solide à la température ambiante. Les principales réserves de ce type se trouvent au Canada.

Cette propriété est importante pour déterminer la rentabilité de l'exploitation. En effet, un pétrole peu visqueux ou léger est plus facile à extraire et à traiter qu'un pétrole lourd.

- La teneur en soufre distingue le pétrole brut soit en doux (faible teneur en soufre) soit en sulfuré dans le cas contraire. Des gisements de pétrole doux sont notamment trouvés en Afrique, ceux de pétrole sulfuré en Amérique du Nord.

Cette mesure est utilisée pour la phase de raffinage du pétrole, une faible teneur en soufre la favorisant. [6]

### I.2.9. Raffinage

Le raffinage est l'ensemble des procédés de séparation des produits pétroliers. Le pétrole va être chauffé pour provoquer une évaporation progressive. Le brut, qui entre dans une raffinerie, va subir une série d'opérations pour aboutir aux produits dont les industriels ont besoin au quotidien. Il y a trois grandes familles d'opérations: [7]

#### I.2.9.1. La distillation du pétrole brut

Le raffinage du pétrole brut a pour but de séparer et d'améliorer les différents produits pétroliers pour répondre aux besoins industriels et domestiques. Une première étape essentielle du raffinage est la distillation fractionnée qui s'effectue en trois temps : la première étape est la distillation atmosphérique. Ensuite les constituants les moins volatils subiront une distillation sous pression réduite. Alors que les constituants volatils, eux, subiront une distillation sous pression élevée.

##### ▼ La distillation atmosphérique

Comme son nom l'indique, cette distillation s'effectue sous une pression atmosphérique c'est à dire d'un Bar. Elle se produit dans une tour de distillation atteignant entre 50 et 60 mètres de haut pour 7 mètres de diamètre et comporte environ 50 plateaux de fractionnement. Une telle installation permet le traitement de jusqu'à 30 000 tonnes de pétrole par jour.

Pour se faire, on introduit dans la colonne du pétrole brut à une température de 380°C.

Grâce à cette distillation, on récupère les produits suivants :

- A moins de 40°C : les gaz et les essences qui seront ensuite séparés grâce à la distillation sous pression élevée ;
- Entre 40 et 180°C : le naphta ;
- Entre 180 et 230°C : les kérosènes et les pétroles lampants ;
- Entre 230 et 360°C : le gazole atmosphérique ;
- A plus de 360°C : les produits lourds qui vont quitter la colonne par le bas pour subir une distillation sous pression réduite.

##### ▼ La distillation sous pression réduite

Ensuite les produits lourds vont être traités et séparés grâce à une distillation sous pression réduite (0,1 bar). Cette diminution de la pression va permettre d'abaisser leur température d'ébullition initialement à 400°C pour éviter qu'ils ne se dégradent.

Cette distillation sous vide donne 4 catégories principales de produits :

- Les produits à craquer ;
- Les bases pour lubrifiants ;

- Les fiouls lourds ;
- Les paraffines.

#### ✓ La distillation sous pression élevée

Les produits issus de la distillation atmosphérique les plus volatils (les gaz et les essences) vont subir une distillation sous pression élevée afin de les différencier.

Pour séparer les constituants ayant des températures d'ébullition basses et très voisines, on augmente la pression lors de la distillation. Ainsi, leur température d'ébullition est plus élevée et plus distincte.

On obtient donc après cette distillation des essences telles que:

- Le méthane et le propane ;
- des naphthas (éthers de pétrole, essence lourde). [8]

#### I.2.9.2. La transformation

Elle va permettre de casser des molécules lourdes en petits morceaux afin d'avoir des produits plus légers: c'est le craquage catalytique. Il s'effectue à 500°C en présence d'un catalyseur permettant de favoriser la réaction. C'est un traitement très énergétique où plus de  $\frac{3}{4}$  des produits lourds sont transformés en gaz, essence et gazole.

Le résultat est encore plus efficace si on ajoute de l'hydrogène (hydrocraquage) et si on fait intervenir des procédés d'extraction du carbone (conversion profonde). En fait, tous les lourds sont transformables en légers, mais il faut y mettre le prix. Et les conversions profondes sont grosses consommatrices d'énergie.

#### I.2.9.3. L'amélioration

Il permet d'éliminer les composants indésirables et de modifier les caractéristiques de certains produits pour les rendre compatibles aux normes. [7]

#### I.2.10. Conclusion

Après cette étape, le pétrole transformé sous plusieurs formes, est prêt à être utilisé.

On peut dire que le pétrole est un élément essentiel de notre vie quotidienne car il est à la base de la création de multiples produits qui sont essentiels. Cependant, celui-ci doit subir plusieurs transformations importantes afin de convenir à nos besoins de plus en plus importants.

### I.3. Le stockage de pétrole

#### I.3.1. Introduction

Le stockage du pétrole consiste à immobiliser temporairement certains volumes de pétrole dans des capacités de stockage appelées aussi appareils à pression ou réservoirs selon que le produit stocké est ou n'est pas sous pression.

Le pétrole brut est stocké à plusieurs reprises durant le processus qui le conduit à sa transformation, notamment après son extraction et à son arrivé dans les raffineries.

Les membres de l'Union Européenne sont obligés d'avoir trois mois de stock de produits pétroliers (brut ou fini). En France, chaque région doit assurer une disponibilité de dix jours de super et de quinze jours de gazole et de fioul. Le stockage du pétrole se fait dans des réservoirs généralement de forme cylindrique comme indique la figure (I.3) suivante :

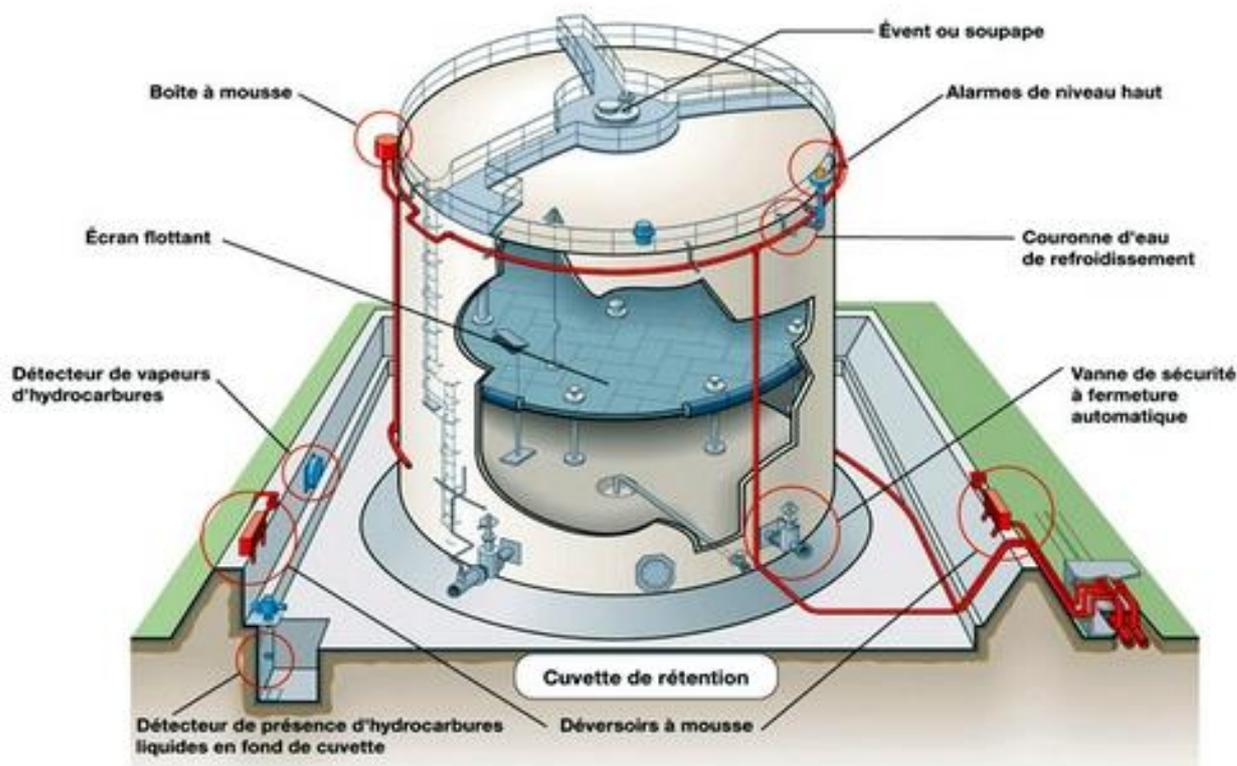


Figure (I.3): Coupe simplifié d'un bac de stockage [1]

### I.3. 2 Types du réservoir de stockage du brut

Les réservoirs ou bacs utilisés pour le stockage du pétrole brut sont des réservoirs cylindriques verticaux aériens en acier, voir la figure (I.4) :



Figure (I.4): réservoir de stockage du brut [9]

L'ensemble des bacs de stockage des hydrocarbures (hormis les bacs de purge) est un ensemble des réservoirs à 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. Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve. Il est obturé par un système d'étanchéité déformable qui permet au toit de coulisser sans entraves à l'intérieur de la robe. Ces réservoirs sont des réservoirs à toit flottant externe dont le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes.

Les réservoirs utilisés pour le stockage du pétrole brut et des produits pétroliers (autres que les GPL) sont des réservoirs cylindriques verticaux aériens en acier. Une des classifications de ces réservoirs consiste à les différencier selon le type de couverture (Toit). On distingue :

#### I.3. 2.1. Les cuves ouvertes

Qui ne comportent pas de toit. Leur emploi est limité aux liquides que l'on peut, sans danger pour leur qualité et pour l'environnement, exposer à l'air libre.

Ces réservoirs sont principalement destinés au stockage d'eau d'incendie et des eaux de ballast. Ils ne conviennent pas pour le stockage des produits pétroliers. Les cuves ouvertes sont constituées essentiellements:

- d'un fond;
- d'une robe;
- d'une poutre raidisseuse (souvent appelée simplement : raidisseur). [9]

### I.3. 2.2. Réservoir à toit fixe

Le stockage des produits peu volatils et à faible tension de vapeur (inférieure à 1 bar) est réalisé dans des réservoirs où la partie supérieure est recouverte d'un toit fixe. Ce dispositif permet d'empêcher leur contamination par des agents extérieurs (pluie, poussières,...). Le fond et la robe du réservoir sont du même type que sur les cuves ouvertes. Cependant, la présence du toit fixe assure une rigidité suffisante au sommet de la robe qui permet d'éviter l'installation d'un raidisseur, la figure (I.5) représente ce type de réservoir.

On classe les réservoirs à toit fixe en deux catégories :

- Réservoirs à toit supporté;
- Réservoirs à toit autoportant.

Ces toits sont constitués d'une charpente soutenue par un ou plusieurs poteaux (pour des diamètres supérieurs à 25 mètres) qui s'appuient sur le fond du réservoir.

Les toits autoportants sont soit coniques soit sphériques.

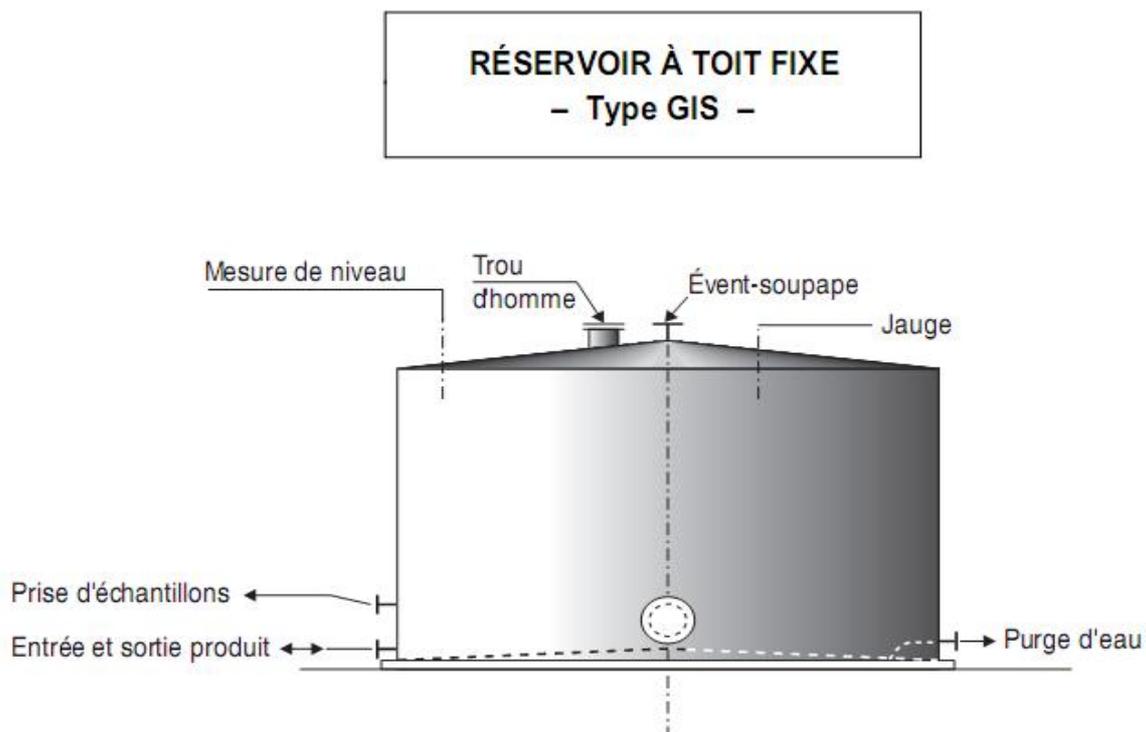


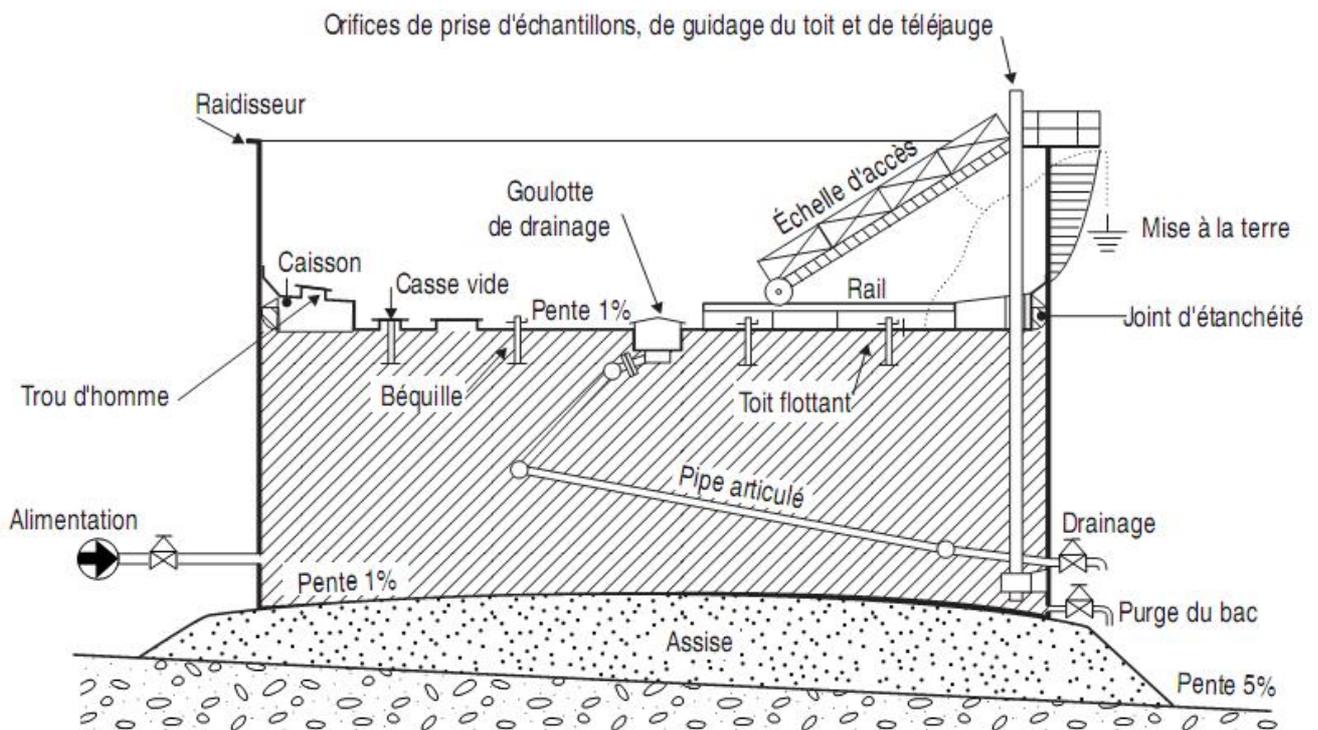
Figure (I.5) : réservoir à toit fixe [9]

### I.3. 2.3. Réservoir à 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 (voir la figure (I.6)). Pour permettre ces déplacements, un espace annulaire libre existe entre le toit et la robe de la cuve.

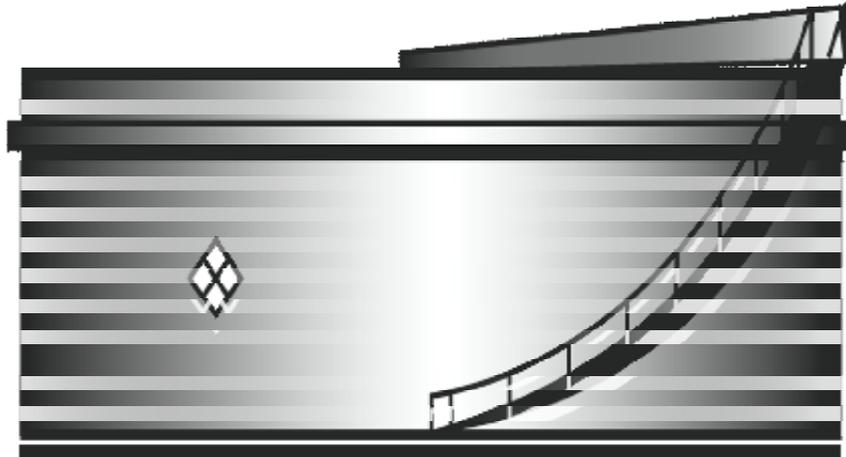
Comprennent une structure flottante directement posée sur le liquide que l'on installe soit dans une cuve ouverte soit dans un réservoir à toit fixe. Ces réservoirs, en raison de leur remarquable capacité à réduire les pertes par évaporation sont réservés aux produits volatils. La capacité de ces réservoirs peut être très importante (plus de 35 000 m<sup>3</sup>). [9]

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. C'est le cas, par exemple, des pétroles bruts. L'absence d'espace vapeur permet à ces réservoirs de fonctionner et d'être étudiés sous pression atmosphérique et de réduire considérablement les émissions et les pertes par évaporation et de ce fait, limiter les risques d'incendie. [10]



Exemple de bac à toit flottant, type ponton annulaire

Figure (I.6) : bac à toit flottant [9]



Figure(I.7) : Réservoir à toit flottant : vue externe. [10]

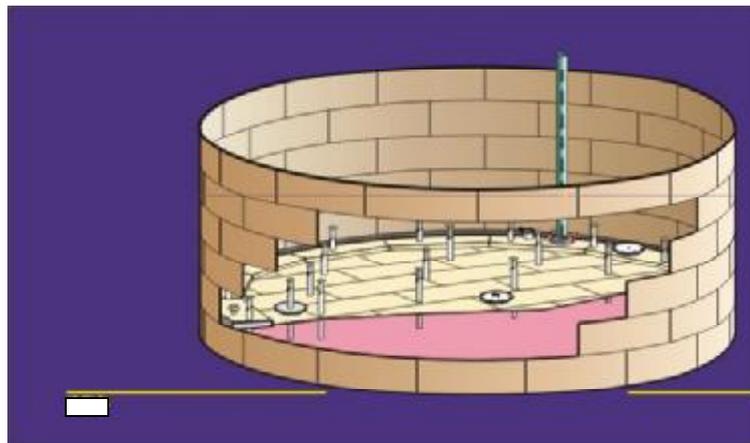


Figure (I.8) : Réservoir à toit flottant : vue interne. [10]

Il existe deux types de réservoirs à toit flottant :

### § Réservoirs à toit flottant externe

Dans ce cas le toit est installé à l'air libre dans des cuves ouvertes.

Le réservoir proprement dit n'est autre qu'une cuve ouverte. La face inférieure du toit est complètement mouillée par le liquide sur lequel le toit flotte. Pratiquement aucun espace vapeur n'existe, ce qui permet de réduire considérablement les pertes par évaporation et les risques d'incendie.

### § Réservoirs à toit flottant interne

Dont le toit est placé à l'intérieur de réservoir à toit fixe.

Ce sont des réservoirs à toit fixe dans lesquels est installé un toit flottant simplifié également appelé écran flottant. Le toit fixe peut être soit de type supporté, avec poteaux verticaux à l'intérieur du réservoir, soit du type autoportant sans poteaux. Lorsque la structure comporte des poteaux, ils traversent le toit flottant par des puits équipés de joints d'étanchéité des puits. Ces réservoirs sont particulièrement bien adaptés pour le stockage des produits volatils dont il faut assurer la conservation, préserver la pureté ou limiter l'émission des vapeurs vers l'atmosphère. [10]

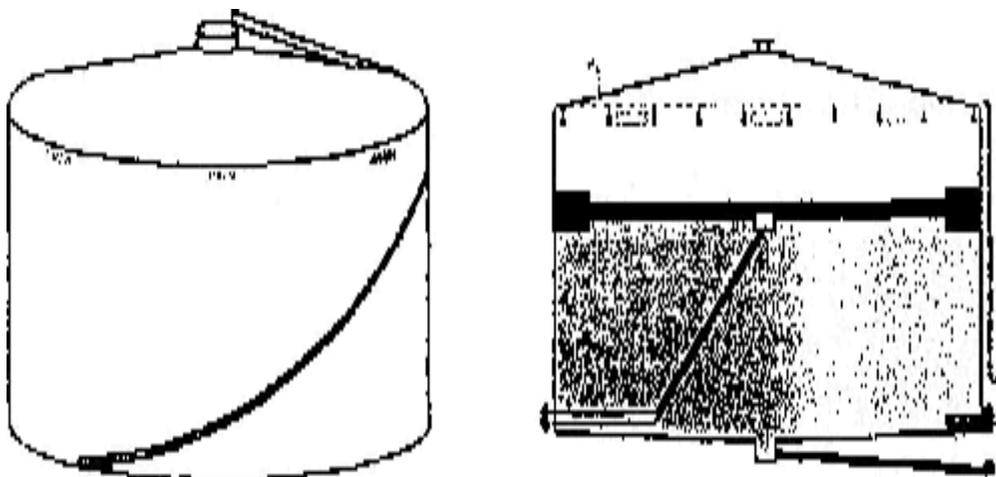


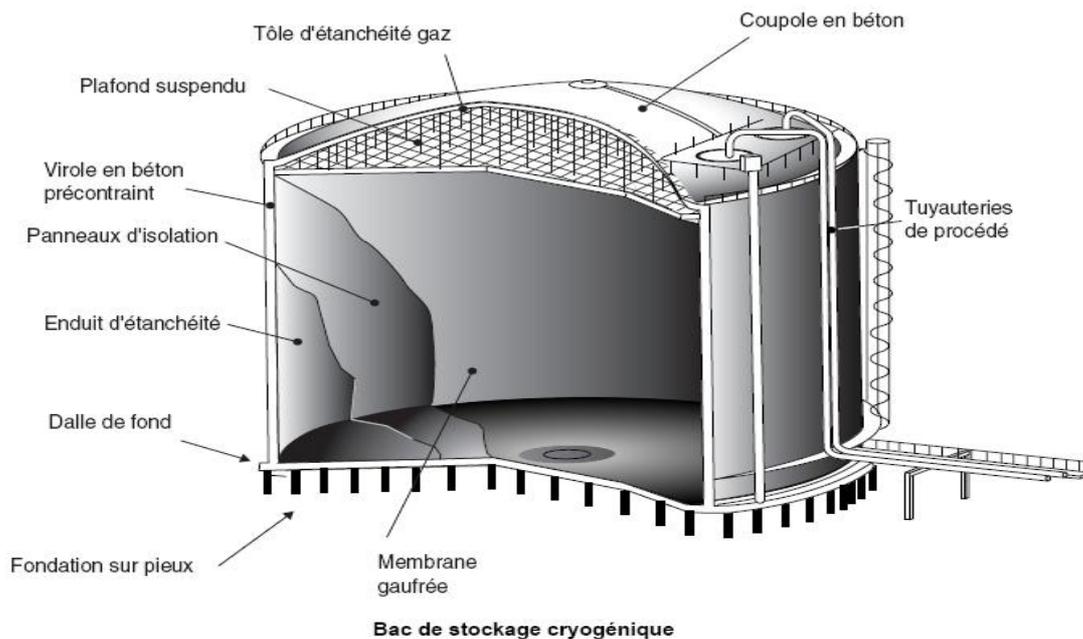
Figure (I.9) : Réservoir à écran interne [9]

#### I.3. 2.4 Réservoirs cryogéniques

Ces unités de stockage comprennent nécessairement une isolation thermique performante qui enrobe complètement le conteneur froid pour empêcher le réchauffement du produit réfrigéré.

Ces réservoirs, malgré leurs dimensions souvent respectables, sont cependant plus satisfaisants sur le plan de la sécurité pour l'environnement que les unités de gaz liquéfiés sous pression. [9]

La figure (I.10) montre ce bac de stockage :



Figure(I.10) : bac de stockage cryogénique [9]

Remarque :

On trouve aussi des parcs de stockage de pétrole (voir la figure (I.11)) où l'on concentre les différents types de réservoirs. Ils sont souvent placés aux abords de grandes villes ou placés dans les grands espaces d'un pays. La sécurité dans ces parcs est très importante.



Figure (I.11): Vue aérienne du Dépôt de Gennevilliers en France [1]

On trouve aussi des stockages souterrains lorsque la configuration du terrain est favorable avec l'existence de couches souterraines imperméables. La société Géo stock possède beaucoup de ces cavités et loue aux raffineurs et autres utilisateurs indépendants.

Le stockage du pétrole est très sécurisé notamment pour les incendies et aussi les risques de pollution des sols et des nappes phréatiques à cause des fuites.

L'utilisation du stockage sous terrain permet une discrétion, une protection environnementale mais aussi une sécurité pour les incendies. Comme dans toutes industries, le stockage provoque une perte d'argent.

On trouve autant de bacs de stockage que de produits pétroliers. Le pétrole peut-être aussi stocké dans des barils de pétrole qui font 159 litres en moyenne.



Figure (I.12): Barils de pétrole [1]

### I.3. 3. Classification des réservoirs

Dans l'industrie pétrolière, on désigne sous ce terme les réservoirs de stockage utilisés pour les divers produits pétroliers. Leur forme n'est autre que celle d'une grande cuve fermée d'un toit. Il existe des bacs à toit fixe et des bacs à toit flottant. Ces derniers sont utilisés pour les produits volatils tels que le pétrole brut et les essences.

Les réservoirs de stockage peuvent être classés selon différents critères :

- Matériau utilisé;
- Situation par rapport au sol ;
- Forme;
- Position;
- Nature du produit stocké. [9]

### I.3. 4. Modes de stockage

La géométrie des réservoirs dépend étroitement de la nature du produit stocké et de sa volatilité à la température de stockage. Cette volatilité étant connue, différents modes de stockage peuvent être envisagés. On peut les classer en fonction de la pression et de la température de fonctionnement du liquide stocké, compte tenu de la relation qui existe entre ces deux paramètres.

#### I.3. 4.1 Liquides volatils qui ne bouillent pas à température ambiante

Leur point normal d'ébullition est supérieur à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiant est inférieure à 1,013 bar. A température ambiante  $\theta_a$ , la pression effective au-dessus du liquide est donc nulle. Le stockage s'effectue sous pression atmosphérique ou sensiblement atmosphérique à température ambiante (stockage libre).

#### I.3.4.2 Liquides volatils qui bouillent à des températures inférieures ou égales à la température ambiante

Leur point normal d'ébullition est inférieur ou égal à la température ambiante et leur tension de vapeur absolue à l'ambiant est supérieure ou égale à 1,013 bar. A température ambiante  $\theta_a$ , une pression effective existe donc au-dessus du liquide. [9]

**I.2. 4.3 Trois modes de stockage peuvent être envisagés****✓ Stockages sous pleine pression**

Ils sont réalisés avec des réservoirs directement exposés à l'air ambiant sans isolation thermique; la température du produit stocké est voisine de la température du site et la pression d'exploitation est maximale.

Ce mode de stockage est réservé aux gaz liquéfiés qui, à température ambiante, développent de fortes pressions. Il consiste à stocker ces produits sous une pression d'exploitation réduite obtenue par abaissement de leur température au moyen de machines frigorifiques.[9]

**✓ La température de stockage**

Retenue se situe entre celle du produit sous pleine pression à température ambiante et celle du produit totalement réfrigéré au point normal d'ébullition. Généralement, on retient une température positive voisine de 5°C. Cependant lorsque le point normal d'ébullition est trop bas, les températures de stockage adoptées se situent autour de -20 à -25 °C, ce qui permet de rester à un niveau de pression encore raisonnable de l'ordre de 20 à 25 bar. [9]

**✓ Stockages réfrigérés et cryogéniques**

Ils fonctionnent sous pression d'exploitation pratiquement nulle obtenue par abaissement de la température du produit jusqu'à son PNE. Ils sont pourvus d'un système isolant dimensionné pour maintenir le produit à basse température.

Par ailleurs, avec ce mode de stockage, la quantité de produit stocké est plus grande, car la densité des liquides est maximale au PNE. Cette caractéristique constitue un avantage essentiel pour le transport sur grande distance.

Par convention, on désigne par stockages réfrigérés, les réservoirs dont la température minimale est supérieure à - 60°C car, jusqu'à cette température, les réservoirs peuvent être réalisés avec des aciers au carbone classiques. Les réservoirs cryogéniques couvrent la gamme de températures comprise entre - 60 et - 273°C. Ils sont construits avec des matériaux beaucoup plus résilients tels que les aciers alliés au nickel (5 à 9 % de Ni), les aciers inoxydables et les alliages d'aluminium. [9]

**I.3. 4. Conclusion**

Le stockage des produits pétroliers doit reprendre aux normes et à la réglementation pour éviter les accidents et les risques industriels.

**I.4. Conclusion**

On constate que toutes les étapes de production et de consommation du pétrole étaient sources de pollution et plus le stockage de pétrole peut causer de dangers plus graves sur l'homme et sur l'environnement à titre d'exemple : le boil over et d'autres risques industriels (bleve, etc.) donc on doit respecter les normes de stockage pour les produits pétroliers.

## **Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)**

---

### **II.1. Introduction**

Tous les produits inflammables caractérisés par une viscosité par une viscosité importante et une certaine plage d'ébullition étaient considérés comme susceptibles de donner lieu à un boil over. On distingue deux types de boil over :

- ✓ Boil over classique ;
- ✓ Boil over en couche mince.

L'objet de ce chapitre est de s'intéresser aux différentes étapes et les caractéristiques pour les deux types de boil over

### **II.2. Boil over classique**

#### **II.2.1.Introduction**

Le boil over classique est un phénomène qui présente des risques très importants car il est à l'origine de violentes projections de combustible et de la formation d'une boule de feu. Dans cette partie de ce chapitre on va définir le boil over classique et les différentes phases, ces conditions de réalisation.

#### **II.2.2.Définition du phénomène de boil over « classique »**

Le NFPA et L'INERIS donnent les deux définitions suivantes :

**Le NFPA** (National Fire Protection Association - USA) propose une définition précise du phénomène :

« Le terme de boil over est attribué à un événement survenant lors d'un incendie de certains hydrocarbures contenus dans un réservoir à ciel ouvert, lorsqu'une soudaine augmentation de l'intensité du feu [de réservoir] est observée, accompagnée de l'expulsion de l'hydrocarbure hors du réservoir, après une longue période de combustion régulière [de l'hydrocarbure]. Le boil over a lieu lorsque les résidus de combustion, issus de la surface en feu, deviennent plus denses que les hydrocarbures non brûlés et sombrent formant une couche chaude qui progresse vers le fond plus rapidement que la régression de la surface de liquide. Lorsque cette couche chaude, également appelée onde de chaleur, atteint l'eau ou une émulsion d'eau dans l'hydrocarbure située en fond de bac, l'eau est d'abord surchauffée, puis portée à ébullition de façon quasi explosive entraînant le débordement du bac. »

## **Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)**

---

L'INERIS donne une autre définition s'intéressant notamment aux conséquences du phénomène. «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. Une représentation schématique des différentes phases est présentée sur la Figure 2. 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.»[11]

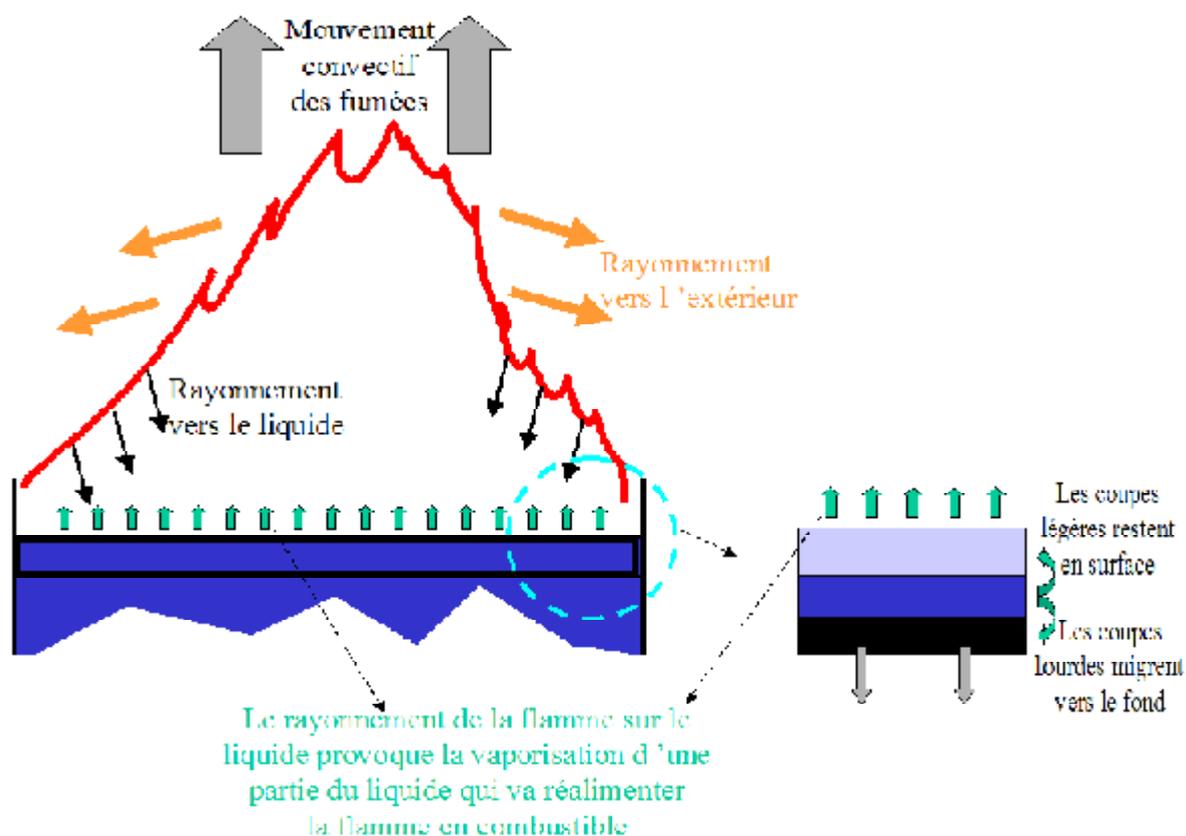
### **On va proposer une définition simple pour le boil over classique**

Le Boil-Over est un phénomène explosif lié aux incendies d'hydrocarbures. En présence d'un réservoir d'hydrocarbures en flamme, La chaleur de l'incendie est communiquée à l'eau située au fond des réservoirs qui peut se vaporiser brusquement en projetant des gouttelettes d'hydrocarbure enflammées dans l'air sous la forme d'une boule de feu.

### **II.2.3.L'onde de chaleur**

La présence d'une onde de chaleur conduit à considérer qu'un boil-over classique est possible, les produits concernés sont des produits dont la plage d'ébullition est suffisamment étendue et dont la viscosité est suffisante pour que l'effet piston puisse être observé ; la figure (II.1) explique la formation d'onde de chaleur.

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)



Figure(II.1) : Mécanisme de formation de l'onde de chaleur. [12]

### II.2.4.Effet piston

Sous la pression de l'interface, la masse volumique de la vapeur est 1700 à 2000 fois moindre que celle de l'eau liquide aux conditions normales de température et de pression. De ce fait, pour que le volume de vapeur engendré remplisse le bac, il suffit que l'épaisseur du fond d'eau soit, en ordre de grandeur, de l'ordre du 1/1700ème au 1/2000ème de la hauteur du bac, soit de l'ordre du centimètre pour les bacs les plus communs. Le volume de vapeur développée quasi instantanément va agir sur la masse d'hydrocarbures la surplombant à l'instar d'un piston. En conséquence, l'accroissement de volume  $\Delta V$  consécutif à la vaporisation de l'eau contribue à mettre en mouvement la masse d'hydrocarbures en lui communiquant instantanément l'énergie cinétique  $PVAP \cdot \Delta V$  où  $PVAP$  est la pression de vapeur à l'interface eau / hydrocarbure au moment où l'eau atteint la zone chaude. [12]

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

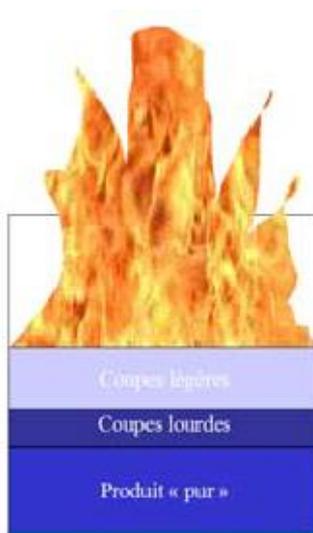
### II.2.5. Les différentes phases d'un boil-over

#### La phase 1



En début d'incendie du bac, le produit occupe tout le volume du bac avec une composition quasi-homogène. [11]

#### La phase 2

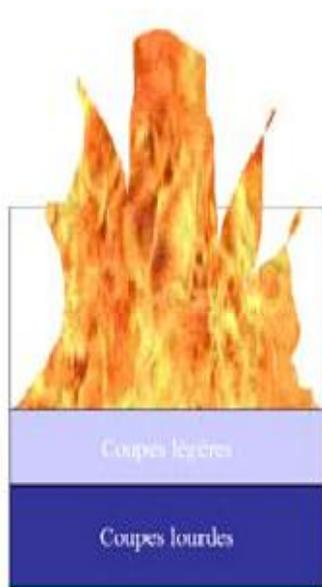


En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une distillation qui conduit à la séparation des coupes légères des coupes plus lourdes. Ces dernières descendant progressivement vers le fond du bac sous l'effet de la pesanteur, c'est la formation d'une onde de chaleur. [11]

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

### La phase 3



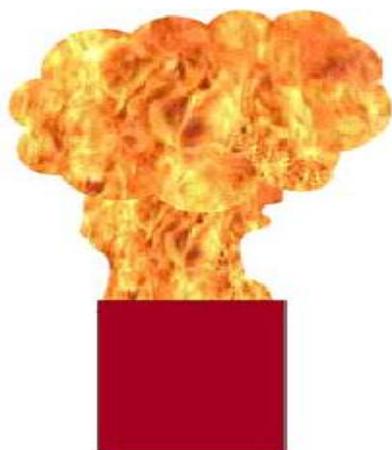
Ce phénomène perdure jusqu'à ce que les coupes les plus lourdes (onde de chaleur) atteignent l'eau située au fond du bac. Cette onde de chaleur a une température de l'ordre de 200 °C. [11]

### La phase 4



Le contact entre l'onde de chaleur et l'eau provoque la vaporisation 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. [11]

### La phase 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 de feu lors de sa combustion. [11]

Figure (II.2): représentation schématique des différentes phases d'un boil-over classique. [12]

### II.2.6. Les conditions d'occurrence du phénomène de boil over « classique »

Plusieurs conditions sont nécessaires à l'occurrence d'un boil over :

- 1) un feu de bac (condition 1) après l'effacement du toit ;
- 2) la présence d'eau à transformer en vapeur (condition 2) ;
- 3) un hydrocarbure pouvant générer une onde de chaleur qui entre en contact avec le fond d'eau et suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau vers la surface (condition 3).

#### Ø Condition 1 :

La première condition est un feu de bac d'un produit respectant la condition 3.

Les séquences accidentelles pouvant conduire à un feu de bac qui doivent ressortir de l'analyse de risque de l'exploitant, initient la séquence accidentelle du phénomène de boil over. Le phénomène de boil over est un phénomène retardé qui se produit plusieurs heures après le déclenchement de l'incendie du bac (la cinétique dépend notamment de la hauteur de remplissage du bac).

Outre les conditions 2 et 3, pour qu'un boil over se produise, il faut évidemment que le feu du bac n'ait pu être éteint dans le laps de temps précédent le déclenchement du boil over.

## Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)

---

### Ø Condition 2 :

La création de vapeur d'eau engendre un accroissement de volume agissant à l'instar d'un piston : 1 litre d'eau génère de 1700 à 2000 litres de vapeur, en fonction de la température de l'onde de chaleur.

Un fond d'eau centimétrique peut suffire à expulser le contenu résiduel d'un bac.

Cette eau peut notamment provenir des eaux pluviales, des eaux de condensation, des eaux projetées lors de l'intervention ou des eaux de décantation susceptibles d'être présentes en fond de bac.

### Ø Condition 3 :

Dans le cas de combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une large plage de températures d'ébullition, les coupes légères à bas point d'ébullition montent à la surface et alimentent le feu, tandis que les coupes plus lourdes à haut point d'ébullition coulent vers le fond et forment un front chaud qui réchauffe les couches d'hydrocarbure froid de plus en plus profondes, tandis que le feu continue de brûler en surface. On obtient ainsi, sous la surface du feu, une zone de température homogène dont l'épaisseur va croissant au cours du temps. C'est ce que l'on appelle ici " l'onde de chaleur ".

L'onde de chaleur n'est pas un phénomène de conduction en provenance de la surface en feu : il s'agit d'un transfert de chaleur d'une particule chaude de masse spécifique plus élevée vers une couche plus froide située plus profond. L'onde de chaleur est alimentée en continu par les résidus de la combustion de surface et son épaisseur augmente plus rapidement que ne diminue la hauteur d'hydrocarbure dans le bac. La température de l'onde de chaleur est fonction de la nature de l'hydrocarbure en feu.

Commentaire de P. Michaelis (expert en risques industriels TOTAL ayant codéveloppé le modèle UFIP avec l'INERIS et EDF en 1995) :

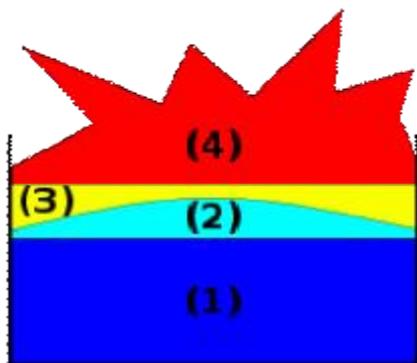
« Pour qu'il se produise un boil over il faut que le réservoir soit en feu, condition sine qua non, car dans un boil over c'est l'onde de chaleur qui est responsable de la vaporisation de l'eau, et pour ce faire il faut engendrer un phénomène de séparation (distillation) des coupes légères qui brûlent à la surface liquide du bac, le toit étant effacé, avec les coupes plus lourdes qui coulent vers le fond avec une température égale à la température d'ébullition de la coupe plus légère alimentant le feu de bac. Il s'agit d'un échange calorifique par transfert de masse et non par conduction dans un liquide. » [11]

## Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)

---

### II.2.7.Mécanisme du boil over

Le boil over est un phénomène explosif qui peut se rencontrer dans la lutte contre les incendies d'hydrocarbures et des distillats en général. Pour voir apparaître ce phénomène il faut plusieurs conditions simultanées. Il faut tout d'abord qu'il y ait de l'eau dans le fond d'un réservoir qui a pris feu. Cette eau peut être présente dans le bac suite aux précipitations, dans le cadre de la lutte contre un incendie ou pour une autre raison. Du fait de la différence de densité entre l'eau et les hydrocarbures, l'eau étant plus lourde elle s'accumule dans le fond d'un bac. En cas de feu dans le bac et au bout d'un temps assez important, la chaleur dégagée par l'incendie pourra vaporiser l'eau, projetant des gouttelettes d'hydrocarbure enflammées, sous la forme d'une boule de feu. [13]



- (1) : eau
- (2) : vapeur
- (3) : hydrocarbure
- (4) : feu

Figure(II.3): Mécanisme du boil over [13]

### II.2.8.Comment on peut savoir si un liquide à l'origine d'un boil over ou non ?

Le calcul du **PBO** (Propensity to Boil Over) permet de déterminer si un liquide peut être à l'origine d'un boil over. Lorsque le PBO calculé est inférieur à 0,6 il n'y a pas de danger. Par contre lorsque celui-ci est supérieur à ce seuil, le boil over est possible. [13]

— — —

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

Avec

- $T_{eb}$ : température d'ébullition moyenne du produit stocké (K)
- $\Delta T_{eb} = T_{eb} - 393$
- $\nu$ : viscosité cinématique à 393 K (cSt)

### Hydrocarbure PBO Risque

Brut lourd	6,76	Oui
Brut moyen	4,24	Oui
Gasoil/Diesel	1,20	Oui
Kérosène	0,53	non
Naphta	0,29	non
Essence	-0,25	Non

### II.2.9.conclusion

Un boil-over dit « classique » est observé lorsque le produit est suffisamment visqueux et qu'il est susceptible de former une onde de chaleur à la suite de sa distillation en coupes légères et coupes lourdes. C'est ce qui peut être observé avec le brut léger par exemple. L'estimation des conséquences radiatives peut être réalisée à l'aide du modèle décrit au chapitre « boil over classique ».

### II.3. Boil over en couche mince

#### II.3.1.Introduction

Le boil-over couche mince a été uniquement observé dans le cadre d'une étude portant sur trois produits : Jet A-1, gazole et FOD. De fait, ces produits ont été retirés de la liste des produits susceptibles de donner lieu à un boil-over classique. C'est un phénomène très dangereux dans l'industrie, donc cette partie de ce chapitre sera consacré pour le boil over en couche mince.

## **Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)**

---

### **II.3.2. Définition et description du phénomène de boil over « en couche mince »**

Comme indiqué dans les paragraphes précédents, il ne s'agit pas de boil over au sens classique du terme puisque il n'y a pas d'onde de chaleur, mais d'un phénomène lié à une vaporisation de l'eau contenue dans le bac à la suite du contact d'une couche de produit à une température supérieure à 100 °C. Ce phénomène sera qualifié de phénomène éruptif en couche mince ou de boil over « en couche mince » pour reprendre la terminologie utilisée dans les publications scientifiques récentes : « thin-layer boil-over ».

Ce phénomène « en couche mince » fait l'objet de recherches scientifiques. Il est dû à une « nucléation hétérogène de l'eau à l'interface eau gazole » (Garo-1996). 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. [11]

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 ».

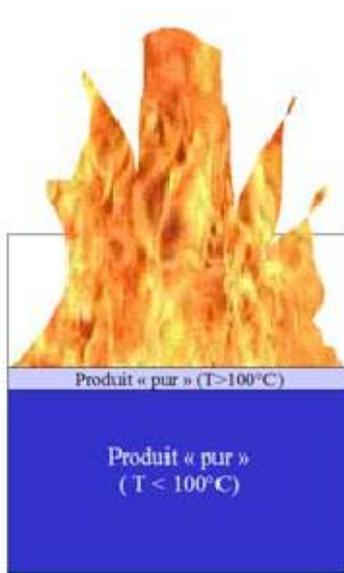
Pour des conditions initiales identiques (hauteur de produit, diamètre de bac, etc.), ce phénomène lié à la vaporisation de l'eau en fond de bac est moins intense et plus bref qu'un boil over « classique » puisqu'une couche beaucoup plus fine de produit est concernée.

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

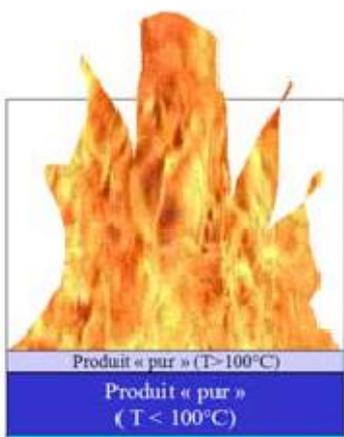
### II.3.3. Les différentes étapes conduisant à un boil-over en couche mince

#### Etape 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 d'épaisseur limitée peut être identifiée. [12]

#### Etape 2



En raison du rayonnement des flammes sur la surface du liquide, le liquide subit une augmentation locale de température sans modification de composition. Il n'y a pas de formation d'onde de chaleur. La zone chaude ( $T > 100^{\circ}\text{C}$ ) peu épaisse progresse vers le fond du bac à mesure que le produit se consume à la même vitesse que la surface du liquide. [12]

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

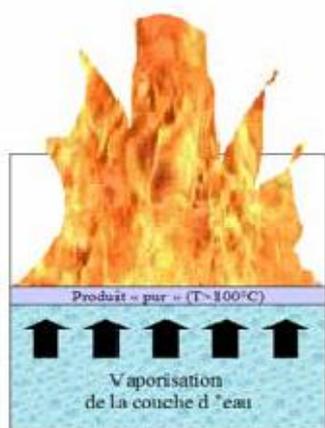
---

### Etape 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. [12]

### Etape 4



Le contact entre le combustible chauffé à plus de 100°C et l'eau provoque la vaporisation 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. [12]

### Etape 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 zone de combustion vive. [12]

Figure(II.4) : représentation schématique des différentes phases d'un boil-over en couche mince. [12]

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

### II.3.4. Conditions d'occurrence du boil over « en couche mince »

Comme illustré précédemment, les conditions d'occurrence sont sensiblement les mêmes que pour un boil over « classique » à l'exception toutefois de la propension du produit à générer une onde de chaleur : feu de bac, présence d'eau, produit suffisamment visqueux pour s'opposer au passage de la vapeur d'eau à la surface.

Il convient donc d'identifier les séquences accidentelles associées à un feu de bac dans l'analyse des risques et l'étude de dangers. Ces séquences peuvent dépendre des caractéristiques du produit ou des installations.

Il est important de noter que l'ampleur de ce phénomène dépend :

- ✓ de la viscosité du produit. Si le produit est peu visqueux, l'effet piston est plus faible car la vapeur d'eau fragmente la couche d'hydrocarbures liquide ;
- ✓ de l'épaisseur de la couche d'hydrocarbure liquide dont la température est supérieure à 100°C, qui dépend des propriétés de l'hydrocarbure.

### II.3.5. Description du modèle de boil over en couche mince

Le modèle proposé est basé sur des calculs successifs qui permettent de caractériser les différentes phases du phénomène :

- **Une première phase de combustion « classique » du liquide inflammable** qui se situe avant le contact entre le liquide inflammable à une température supérieure à 100°C et l'eau. Lors de cette phase, une fraction de l'énergie rayonnée par les flammes est transmise au liquide. Cette fraction conduit à l'évaporation du liquide qui va réalimenter les flammes et également préchauffer le liquide sur quelques centimètres. L'épaisseur préchauffée dépend de la nature du produit impliqué. Lors de cette phase, aucune projection ne survient. La durée de cette phase peut être estimée en divisant la hauteur de liquide présente au moment de l'inflammation par la vitesse de régression qui est une caractéristique du produit en feu ainsi que de la surface du bac en feu (la vitesse de régression diminue lorsque la surface augmente). A l'issue de cette phase, la grandeur importante est l'épaisseur de liquide inflammable dont la température est supérieure à 100°C.

## Chapitre II : le phénomène de boil over (boil over classique et boil over en couche mince)

---

- **La deuxième phase survient lorsque la couche de liquide dont la température est supérieure à 100°C arrive au contact de l'eau présente au fond du bac.** A cet instant, l'eau se vaporise brutalement et agit comme un piston en mettant en suspension la couche d'hydrocarbures située au-dessus d'elle. L'une des principales données de sortie de cette phase est la vitesse d'éjection du liquide, cette dernière dépendant de la quantité d'eau présente en fond de bac ainsi que de la composition du mélange (eau en phase vapeur, combustible en phase vapeur et liquide). La vitesse d'éjection varie entre 8 et 13 m/s et décroît sur les 10 premiers mètres. Cette phase d'éjection ne sert qu'à la mise en suspension du mélange (eau+hydrocarbure).
- **La troisième phase consiste en la combustion de l'hydrocarbure mis en suspension.** Cette phase est pilotée principalement par l'entraînement d'air au sein du jet. En effet, lors de la projection, le mélange devient rapidement trop riche en combustible et il est alors nécessaire que de l'air (oxygène) soit introduit pour observer la combustion du liquide après son évaporation. Ce modèle est issu d'un bilan thermodynamique prenant en compte l'air entraîné ainsi que le dégagement de chaleur résultant de la combustion de l'hydrocarbure en phase vapeur avec l'air entraîné. A noter que la vitesse ascensionnelle du mélange est pilotée par la différence de densité entre gaz brûlés et gaz frais.
- **La dernière phase est relative à l'évaluation des conséquences en termes d'effets thermiques sur l'environnement.** Compte tenu de la durée du phénomène (moins d'une minute), un calcul de dose est réalisé. [11]

### II.3.6.conclusion

Le boil over en couche mince est un modèle qui a été développé par l'INERIS lorsque cette compagnie faisait des essais pour certains produits (JET-A1, gazole, FOD), elle a trouvé qu'aucune onde de chaleur n'a été observée et de fait ces produits ne peuvent pas être le siège d'un boil-over classique. Donc pour que ce phénomène se réalise, il doit être visqueux et tout dépend des propriétés de l'hydrocarbure.

## **Chapitre II : le phénomène de boil over ( boil over classique et boil over en couche mince)**

---

### **II.3. conclusion**

On conclut que le boil over classique se réalise avec la présence d'une onde de chaleur contrairement au boil over en couche mince. Les deux types sont dangereux mais le boil over en couche mince n'est pas encore vu dans les zones de stockage des produits inflammables.

### III.1.Introduction

Le boil over classique représente des grands risques industrielles donc dans ce chapitre en va modéliser ce phénomène dangereux, avec des discrétisation des équations suivant d'une application numérique pour le brut léger et pour fuel oil.

### III.2.Modélisation du phénomène [12]

Le phénomène de boule de feu lorsqu'il se développe, est la partie la plus spectaculaire d'un boil over. Il peut également en être l'évènement le plus dangereux pour l'homme.

Les principales étapes de la modélisation des effets de la boule de feu formée lors d'un boil over classique sont les suivantes :

- Détermination de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu,
- Estimation des caractéristiques de la boule de feu,
- Détermination des effets du rayonnement de la boule de feu sur une personne exposée.

#### III.2.1.Quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu

Avant en doit calculé la vitesse de combustion de l'hydrocarbure ( $v_1$ ) est évaluée par une relation semi-empirique (Burgess & al. 1961) prenant notamment en compte la chaleur de combustion de l'hydrocarbure, sa chaleur de vaporisation et sa capacité calorifique :

##### III.2.1.1.La vitesse de combustion de l'hydrocarbure $v_1$

$$v_1 = 10^{-3} \times \frac{\frac{\Delta H_c}{\rho(T_M)}}{L_V + \int_{T_{SER}}^{T_{BUL}} C_p(T) dT} \quad (III.1)$$

Avec :

$$T_M = (T_{BUL} \times T_{SER})^{0,5}$$

$T_M$  : la température moyenne,

- $\Delta H_c$  : chaleur de combustion de l'hydrocarbure (J/kg),
- $\rho(T_M)$  : masse volumique de l'hydrocarbure à température  $T_M$  ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $L_V$  : chaleur latente de vaporisation de l'hydrocarbure (J/kg)
- $C_p$  : chaleur massique (J/kg K),
- $T_{SER}$  : température de service de l'hydrocarbure dans le réservoir (K),
- $T_{BUL}$  : température d'ébullition de l'hydrocarbure (K).

### III.2.1.2. La vitesse de propagation $v_2$

$$v_2 = H_{LIQ} / t_{BO} \quad (III.2)$$

- $H_{LIQ}$  : hauteur d'hydrocarbure liquide contenu dans le bac au moment où l'incendie se déclare (m),
- $t_{BO}$  : temps de déclenchement du boil over à partir du moment où l'incendie se déclare (s).

### III.2.1.3. Le temps de déclenchement du boil over

Le temps de déclenchement du boil over  $t_{BO}$  défini une expression simple, on ne tenant compte ni de l'évolution de la hauteur du liquide ni de celle de la température de l'onde de chaleur :

$$t_{BO} = \rho(T_{SER}) \times C_p(T_{SER}) \times H_{LIQ} \times (T_{WAV} - T_{SER}) / Q_0 \quad (III. 3)$$

- $\rho(T_{SER})$  : masse volumique de l'hydrocarbure à température  $T_{SER}$  ( $\text{kg/m}^3$ ),
- $C_p(T_{SER})$  : capacité calorifique à température  $T_{SER}$  ( $\text{J/kg K}$ ),
- $\Phi_0$ : fraction du flux radiatif de la flamme dans le feu de bac, qui réchauffe le contenu du bac depuis la couche supérieure jusqu'au fond, prise égale à  $60 \text{ kW/m}^2$ .

### III.2.1.4. La température de l'onde de chaleur $T_{WAV}$

Pour calculer la température de l'onde de chaleur  $T_{WAV}$  au moment où le boil over se produit, la démarche adoptée consiste à considérer la courbe de distillation de l'hydrocarbure considéré et à remarquer que ne participent à la boule de feu que les fractions dont la température d'ébullition est égale ou supérieure à la température  $T_{WAV}$  de l'onde de chaleur.

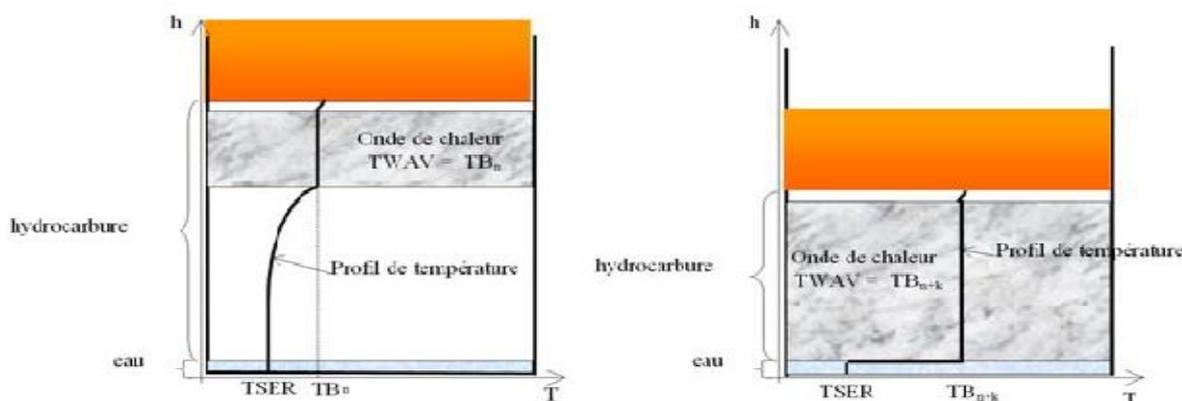
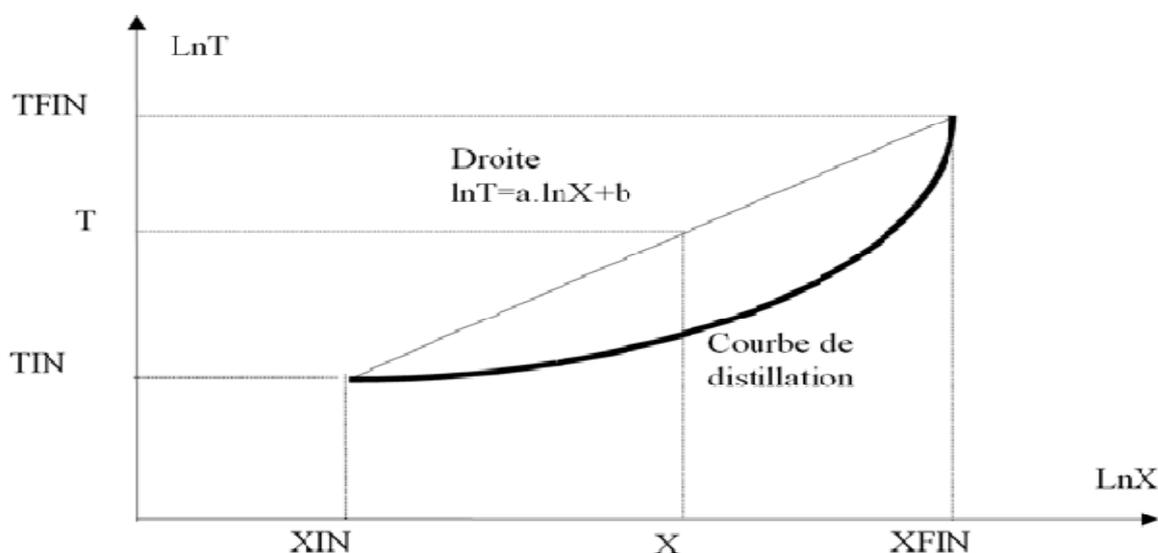


Figure III 1-a (temps  $t$ )

Figure III 1-b (temps  $t_{BO}$ )

Figure (III.1) : propagation de l'onde de chaleur [12].

A l'instant  $t = t_{BO}$ , la fraction en ébullition porte l'indice  $n+k$  et, en conséquence  $T_{WAV}(t_{BO}) = TB_{n+k} - \varepsilon$  (figure III 1-b). Dans ce qui suit, et de façon conservative, la différence  $\varepsilon$  sera négligée. Ensuite, il convient de caractériser la courbe de distillation de l'hydrocarbure impliqué. Cette courbe représente le pourcentage volumique cumulé d'hydrocarbures distillés en fonction de la température, lorsque celle-ci se trouve dans une plage comprise entre une température d'ébullition dite initiale  $T_{IN}$  (température d'ébullition la plus basse) et une température d'ébullition dite finale  $T_{FIN}$  (température d'ébullition la plus haute). En général, ces deux températures  $T_{IN}$  et  $T_{FIN}$  bornant la plage de températures d'ébullition correspondent respectivement à des fractions volumiques du produit distillé  $X_{IN} = 15\%$  et  $X_{FIN} = 85\%$  (figure III.2).



Figure(III.2): Courbe de distillation d'hydrocarbure – Approximation par une droite [12].

Par souci de simplification, et en restant majorant, le parti est pris d'assimiler ces courbes à des droites en coordonnées logarithmiques. Dans la mesure où ne participeront à la boule de feu que les fractions dont la température d'ébullition est supérieure ou égale à  $T_{WAV}$ , l'approche est prudente en ce sens qu'elle conduit à majorer la masse participant à la boule de feu. En effet, la figure 2 montre que pour une même température  $T_{WAV}$  la proportion de volume déjà vaporisé est moindre et qu'en conséquence la masse participant à la boule de feu est alors supérieure. Ainsi, en coordonnées logarithmiques, l'équation de la courbe de distillation est du type :

$$\ln T = a \times \ln X + b \quad (\text{III.4})$$

Où  $T$  : température du produit (K),  $X$  : fraction de produit vaporisé à cette température (%). C'est ainsi qu'au moment où le boil over se produit, la relation entre la température de l'onde de chaleur à l'interface hydrocarbure/fond d'eau  $T_{WAV}$  et la fraction d'hydrocarbure vaporisée à ce moment,  $X_{BO}$  sera la suivante:

$$\ln T_{WAV} = a \times \ln X_{BO} + b \quad (\text{III.5})$$

### III.2.1.5. la fraction d'hydrocarbure vaporisée $X_{BO}$

Or, au moment où le boil over se produit (à  $t_{BO}$ ), la fraction d'hydrocarbure vaporisée  $X_{BO}$  n'est autre que celle qui a été déjà consommée à la vitesse de combustion  $v_1$ , ramenée à la quantité totale de produit présente dans le bac au moment où l'incendie se déclare. Ceci se traduit par la formule suivante :

$$X_{BO} = (v_1 \times t_{BO}) / H_{LIQ} + X_{IN} \quad (\text{III.6})$$

C'est ainsi qu'en définitive  $T_{WAV}$  s'exprime en fonction de  $t_{BO}$ . Or, précédemment l'équation (III.3) donne une tout autre expression de  $t_{BO}$  fonction de  $T_{WAV}$ . Il convient donc d'effectuer un calcul itératif permettant de déterminer des valeurs de  $T_{WAV}$  et  $t_{BO}$  vérifiant simultanément ces deux équations.

Le temps nécessaire avant le déclenchement du boil over permet d'estimer la masse susceptible de participer à la boule de feu.

### III.2.1.6. La masse de vapeur $M_{VAP}$

La masse de vapeur  $M_{VAP}$  susceptible de participer à la boule de feu correspondra à une fraction volumique  $X_{VAP}$  égale à  $(1 - X_{BO})$  et son expression sera donc la suivante :

$$M_{VAP} = X_{VAP} \times M_{LIQ} = (1 - X_{BO}) \times M_{LIQ} \quad (\text{III.7})$$

$M_{LIQ}$  : Masse d'hydrocarbure contenue dans le bac au début de l'incendie (kg).

**III.2.1.7. Le volume de brut projeté**

L'expression du volume de brut projeté s'effectue comme suit :

$$V_{bp} = ((HB - HE) - (t_{BO} \times v1)) \times S \quad (III.8)$$

Avec :

$$S = \pi \times d^2 / 4 \quad (III.9)$$

**III.2.1.8. La masse de brut projeté**

La masse de brut projetée s'en déduit :

$$M = V_{bp} \times \rho_{TM} \quad (III.10)$$

**III.2.2. Calcul des caractéristiques de la boule de feu**

Le pouvoir émissif surfacique  $\Phi_0$  de la boule de feu est pris égal à 150 kW/m<sup>2</sup>. Cette valeur a été corroborée par des travaux expérimentaux qui, dans le pire des cas, ont conduit à mesurer une valeur de  $\Phi_0$  égale à 123 kW/m<sup>2</sup> (Broeckmann, 1992).

**III.2.2.1 La température de flamme  $T_{FLA}$** 

A partir de ce pouvoir émissif de boule de feu, la température de flamme  $T_{FLA}$  peut s'écrire sous la forme suivante :

$$T_{FLA} = [(\Phi_0 + \varepsilon \times \sigma \times T_{AMB}^4) / [\varepsilon \times \sigma]]^{1/4} \quad (III.11)$$

- $\varepsilon$ : coefficient d'émission ( $\varepsilon = 0,6$  pour les flammes de gaz),
- $\sigma$  : constante de BOLTZMANN, soit  $5,677.10^{-8}$  W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>,
- $T_{AMB}$  : température ambiante (K).

**III.2.2.2. La hauteur de brut à l'instant du déclenchement du boil over**

L'expression de cette hauteur est la suivante :

$$H_{t_{BO}} = HB - v1 \times t_{BO} \quad (III.12)$$

**III.2.2.3. La fraction d'hydrocarbures brûlée dans la boule**

Cette fraction s'exprime comme suit :

$$X = X_{VAP} \times LSI \quad (III.13)$$

**III.2.2.4. La concentration C d'hydrocarbure présent dans la boule de feu**

La boule de feu peut être considérée comme représentative d'une concentration homogène en vapeur d'hydrocarbure égale à la limite supérieure d'inflammabilité LSI.

Ceci signifie que, dans 1 m<sup>3</sup> de mélange hydrocarbure-air, se retrouve une masse de vapeur d'hydrocarbure égale à :

$$M_{VAP} = \rho_g(T_{FLA}) \times LSI \quad (III.14)$$

- $\rho_g(T_{FLA})$  : masse volumique des vapeurs d'hydrocarbure présent à TFLA (kg/m<sup>3</sup>),
- LSI : Limite Supérieure d'Inflammabilité (% vol).

Par conséquent, la concentration C d'hydrocarbure présent dans la boule de feu s'exprime :

$$C = \rho_g(T_{FLA}) \times LIS \quad (\text{kg d'hydrocarbure} / \text{m}^3 \text{ de mélange hydrocarbure-air}) \quad (III.15)$$

### III.2.2.5. Le volume V<sub>FB</sub> de la boule de feu

En considérant de façon majorante la masse totale de vapeur d'hydrocarbure générée sans tenir compte de la fraction brûlée, le volume V<sub>FB</sub> de la boule de feu se définit alors comme suit :

$$V_{FB} = M_{VAP}/C \quad (III.16)$$

### III.2.2.6. Le rayon de la boule de feu

R<sub>FB</sub> s'exprime donc par :

$$R_{FB} = ([3 \times V_{FB}]/[4 \times \pi])^{1/3} \quad (III.17)$$

### III.2.2.7. La durée de vie de la boule de feu t<sub>FB</sub>

Elle est estimée par la formule empirique de HIGH (Bagster, 1989), à savoir :

$$t_{FB} = 0,295(M_{VAP})^{0,32} \quad (III.18)$$

### III.2.2.8. La hauteur h<sub>FB</sub> du centre de la boule de feu

La hauteur h<sub>FB</sub> du centre de la boule de feu peut être calculée par les relations empiriques suivantes:

$$t = t_{FB} \times T_{FLA}^{10/3} / M_{VAP}^{1/3} \times 10^{10} \quad (III.19)$$

$$h_{FB} = ([68,571 \times t]/2,857 + t) \times (M_{VAP}/T_{FLA})^{1/3} + H_{EQU} \quad (III.20)$$

## III.2.3. Calcul des effets thermiques de la boule de feu

### III.2.3.1. Les effets létaux significatifs

L'expression des effets létaux significatifs est donnée par l'équation suivante :

$$\Phi_{\text{létal significatifs}}^{4/3} t_{FB} = 1800 \quad (\text{kw/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s} \quad (III.21)$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = \exp(5,622 - 0,75 \ln t_{\text{FB}}) \quad (\text{kW/m}^2) \quad (\text{III.22})$$

### III.2.3.2. Les effets létaux

Celle des effets létaux par la relation suivante :

$$\Phi_{\text{létal}}^{4/3} t_{\text{FB}} = 1000 \quad (\text{kw/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s} \quad (\text{III.23})$$

$$\Phi_{\text{létal}} = \exp(5,181 - 0,75 \ln t_{\text{FB}}) \quad (\text{kW/m}^2) \quad (\text{III.24})$$

### III.2.3.3. Les effets irréversibles

Et celle des effets irréversibles par :

$$\Phi_{\text{irrév}}^{4/3} t_{\text{FB}} = 600 \quad (\text{kw/m}^2)^{4/3} \cdot \text{s} \quad (\text{III.25})$$

$$\Phi_{\text{irrév}} = \exp(4,8 - 0,75 \ln t_{\text{FB}}) \quad (\text{KW/m}^2) \quad (\text{III.26})$$

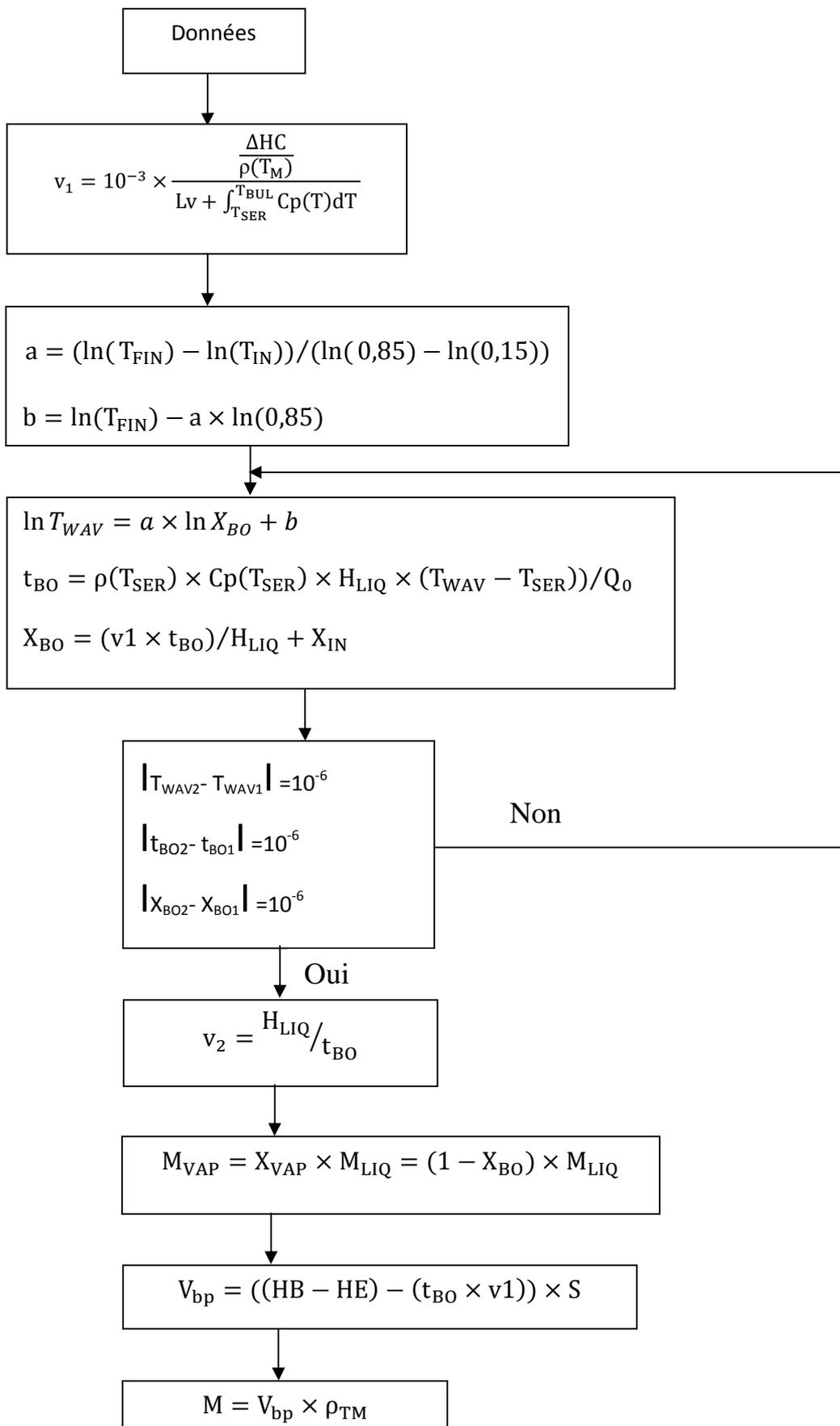
## III.3. l'application numérique

On a employé la méthode itérative pour résoudre le système d'équation avec langage de programmation ( Matlab), dont les données et l'organigramme (voir figure III.3) sont représentés comme suit :

Les données sont (voir annexe1)

$L_v = 2.9 \cdot 10^5$	chaleur latente de vaporisation de l'hydrocarbure (j/kg)
TSER=284.1	température de service de l'hydrocarbure dans le réservoir (k)
TBUL=535	température d'ébullition de l'hydrocarbure(k)
$\rho = 800$	densité du brut à 20°C en kg/m <sup>3</sup>
HR=16	la hauteur du réservoir en m
HB=15.30	hauteur du brut dans le réservoir en m
HE=0.40	hauteur de l'eau au fond de réservoir en m
LSI=0.055	limite supérieur d'inflammabilité
HLIQ=HB-HE	hauteur d'hydrocarbure liquide contenu dans le bac au moment où l'incendie se déclare (m)
Q=60000	fraction des flux radiatif de la flamme dans le feu de bac en kw/m <sup>2</sup>
MLIQ=5500000	Masse d'hydrocarbure contenue dans le dac au début de l'incendie (kg)
D=60	diamètre du bac en m

## L'organigramme de calcul



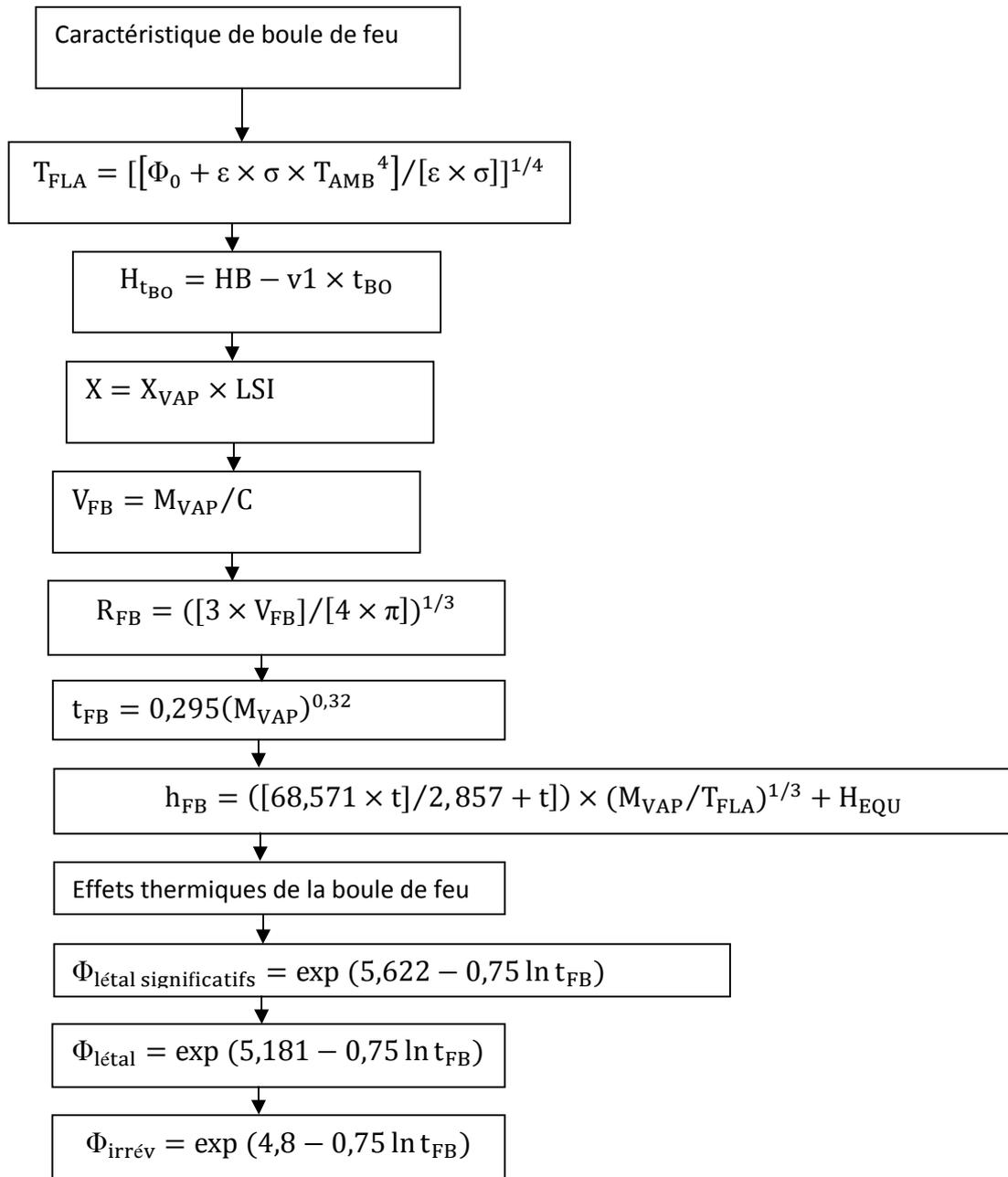


Figure III.3 : L'organigramme de calcul pour le boil-over classique

### III.3.1. Le boil-over classique avec le produit inflammable « brut léger »

#### III.3.1.1. Calcul de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu

§ La vitesse de combustion  $v_1$  :

$$v_1 = 10^{-3} \frac{\left(\frac{\Delta H_c}{\rho(T_M)}\right)}{L_V + \int_{T_{SER}}^{T_{BUL}} \left(\frac{1}{\rho(20) \times 10^{-3}}\right)^{0.5} \times (1,687 + 0,0033 \times (T - 273) \times 10^3) dT}$$

$$v_1 = 10^{-3} \frac{\left(\frac{43300000}{725,12}\right)}{292000 + \int_{284,1}^{535} \left(\frac{1}{\rho(20) \times 10^{-3}}\right)^{0.5} \times (1,687 + 0,0033 \times (T - 273) \times 10^3) dT}$$

$$v_1 = 6,71219 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m/s})$$

### § Calcul itératif de $X_{\text{BO}}$ et $t_{\text{BO}}$ et $T_{\text{WAV}}$

L'équation de la courbe de distillation de brut :

$$\ln T_{\text{WAV}} = a \times \ln X_{\text{BO}} + b$$

Avant en doit calculer a et b :

$$a = (\ln(T_{\text{FIN}}) - \ln(T_{\text{IN}})) / (\ln(0,85) - \ln(0,15))$$

$$a = 0.496225756480937$$

$$b = \ln(T_{\text{FIN}}) - a \times \ln(0,85)$$

$$b = 6.793602279409575$$

$$t_{\text{BO}} = \rho(T_{\text{SER}}) \times C_p(T_{\text{SER}}) \times H_{\text{LIQ}} \times (T_{\text{WAV}} - T_{\text{SER}}) / Q_0$$

$$X_{\text{BO}} = (v_1 \times t_{\text{BO}}) / H_{\text{LIQ}} + X_{\text{IN}}$$

D'après ces équations on obtient le tableau suivant :

$T_{\text{WAV}}$ (k)	$t_{\text{BO}}$ (s)	$X_{\text{BO}}$
414,999750	$5,054540438 \cdot 10^4$	0,377698438
414,9998001	$5,0545423689 \cdot 10^4$	0,3776985250
414,9998502	$5,054544299 \cdot 10^4$	0,37769861
414,999920	$5,05454623036 \cdot 10^4$	0,37769869904
414,999501	$5,054530784837 \cdot 10^4$	0,3776980024
414,999651	$5,054527155 \cdot 10^4$	0,377698065
415,000010	$5,0545500917 \cdot 10^4$	0,3776988729
415,000010	$5,0545500917 \cdot 10^4$	0,37769887291
415,000011	$5,0545500917 \cdot 10^4$	0,37769887293

Tableau (III.1) : Résultats de calcul de  $t_{\text{BO}}$  et  $T_{\text{WAV}}$  et  $X_{\text{BO}}$

Donc on a les résultats suivants :

$$X_{\text{BO}} = 0,3776988729$$

$$T_{WAV}=415,00001 \text{ k}$$

$$t_{BO} = 50545,500917 \text{ s}$$

§ La vitesse  $v_2$

$$v_2 = H_{LIQ}/t_{BO}$$

$$v_2 = 5500000/50545,500917$$

$$v_2 = 2,947839 \times 10^{-4} \quad \text{m/s}$$

§ La masse de vapeur  $M_{VAP}$

$$M_{VAP} = X_{VAP} \times M_{LIQ} = (1 - X_{BO}) \times M_{LIQ}$$

$$M_{VAP} = (1 - X_{BO}) \times M_{LIQ}$$

$$M_{VAP} = (1 - 0,3776988729) \times 5500000 = 3,422656 \cdot 10^6$$

$$M_{VAP} = 3,422656 \times 10^6 \quad \text{kg}$$

$$X_{VAP} = 1 - X_{BO} = 1 - 0,3776988729 = 0,6223011088$$

$$X_{VAP} = 0,6223011088$$

§ Le volume de brut projeté

Avant il faut calculer la surface du bac de stockage:

$$S = \pi \times d^2/4 \quad (\text{m}^2)$$

$$S = \pi \times 60^2/4 = 2827,35$$

$$S = 2827,35 \quad \text{m}^2$$

$$V_{bp} = ((HB - HE) - (t_{BO} \times v_1)) \times S \quad (\text{m}^3)$$

$$V_{bp} = ((15,30 - 0,4) - (50545,500917 \times 6,71219 \cdot 10^{-5})) \times 2827,35$$

$$V_{bp} = 32535,12731 \text{ m}^3$$

§ La masse de brut projetée

$$M = V_{bp} \times \rho_{TM}$$

$$M = 32535,12731 \times 725,12 = 23592019,96 \quad \text{kg}$$

### III.3.1.2 Calcul des caractéristiques de la boule de feu

§ La température de la flamme :

$$T_{FLA} = ([\Phi_0 + \varepsilon \times \sigma \times T_{AMB}^4]/[\varepsilon \times \sigma])^{1/4}$$

$$T_{FLA} = ([150000 + 0,6 \times 5,677 \times 10^{-8} \times 300^4] / [0,6 \times 5,67710^{-8}])^{1/4}$$

$$T_{FLA} = 1449,288 \quad \text{k}$$

§ La hauteur de brut à l'instant du déclenchement du boil over

$$H_{t_{BO}} = HB - v1 \times t_{BO}$$

$$H_{t_{BO}} = 15,30 - 6,71219 \times 10^{-5} \times 50545,500917 = 11,90728679$$

$$H_{t_{BO}} = 11,90728679 \quad \text{m}$$

§ La fraction d'hydrocarbures brûlée dans la boule

$$X = X_{VAP} \times LSI$$

$$X = 0,6223011088 \times 0,055 = 0,03422656198$$

$$X = 0,03422656198$$

§ La concentration C d'hydrocarbure présent dans la boule de feu

$$C = \rho_g(T_{FLA}) \times LIS$$

$$C = 6,686 \times 0,055 = 0,367730$$

$$C = 0,367730$$

§ Le volume  $V_{FB}$  de la boule de feu

$$V_{FB} = M_{VAP} / C$$

$$V_{FB} = 3,422656 \times 10^6 / 0,367730$$

$$V_{FB} = 9,30752508 \times 10^6 \quad \text{m}^3$$

§ Le rayon de la boule de feu

$$R_{FB} = ([3 \times V_{FB}] / [4 \times \pi])^{1/3}$$

$$R_{FB} = ([3 \times 9,30752508 \times 10^6] / [4 \times \pi])^{1/3}$$

$$R_{FB} = 279,90787 \quad \text{m}$$

§ La durée de vie de la boule de feu  $t_{FB}$

$$t_{FB} = 0,295(M_{VAP})^{0,32}$$

$$t_{FB} = 0,295(3,422656 \times 10^6)^{0,32}$$

$$t_{FB} = 36,377278367 \text{ s}$$

§ La hauteur  $h_{FB}$  du centre de la boule de feu

$$t = t_{FB} \times T_{FLA}^{10/3} / M_{VAP}^{1/3} \times 10^{10}$$

$$t = 36,377278367 \times 1449,288^{10/3} / (3,422656 \times 10^6)^{1/3} \times 10^{10}$$

$$t = 0,8315336686$$

$$h_{FB} = ([68,571 \times t] / [2,857 + t]) \times (M_{VAP} / T_{FLA})^{1/3} + H_{EQU}$$

$$h_{FB} = ([68,571 \times 0,8315336686] / [2,857 + 0,8315336686]) \times (3,422656 \times 10^6 / 1449,288)^{1/3} + 60$$

$$h_{FB} = 336,84769 \text{ m}$$

### III.3.1.3. Calcul des effets thermiques de la boule de feu

§ Les effets létaux significatifs

$$\Phi_{\text{létal significatifs}}^{4/3} t_{FB} = 1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = \exp(5,622 - 0,75 \ln t_{FB})$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = \exp(5,622 - 0,75 \ln 36,377278367)$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = 18,663361954855713 \text{ kW/m}^2$$

§ Les effets létaux

$$\Phi_{\text{létal}}^{4/3} t_{FB} = 1000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{létal}} = \exp(5,181 - 0,75 \ln t_{FB})$$

$$\Phi_{\text{létal}} = \exp(5,181 - 0,75 \ln 36,377278367)$$

$$\Phi_{\text{létal}} = 12,007870961885358 \text{ kW/m}^2$$

§ Les effets irréversibles

$$\Phi_{\text{irrég}}^{4/3} t_{FB} = 600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{irrég}} = \exp(4,8 - 0,75 \ln t_{FB})$$

$$\Phi_{\text{irrég}} = \exp(4,8 - 0,75 \ln 36,377278367)$$

$$\Phi_{\text{irrég}} = 8,203511942568911 \text{ kW/m}^2$$

### III.3.1.4. Présentation graphique

Les résultats obtenus ci-dessus sont représentés graphiquement comme suit :

Ø La température de l'onde de chaleur ( $T_{WAV}$ ) en fonction de la fraction d'hydrocarbure ( $X_{BO}$ )

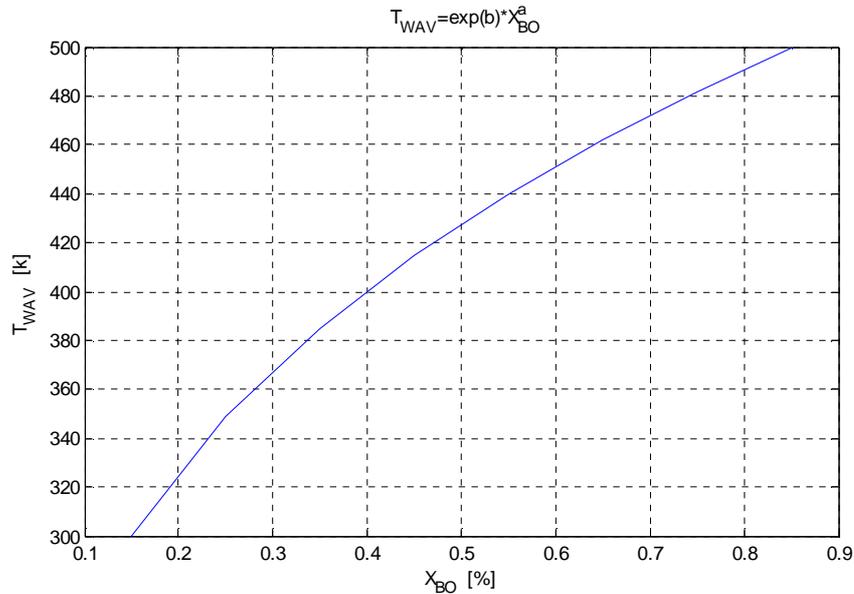


Figure (III.4a) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure

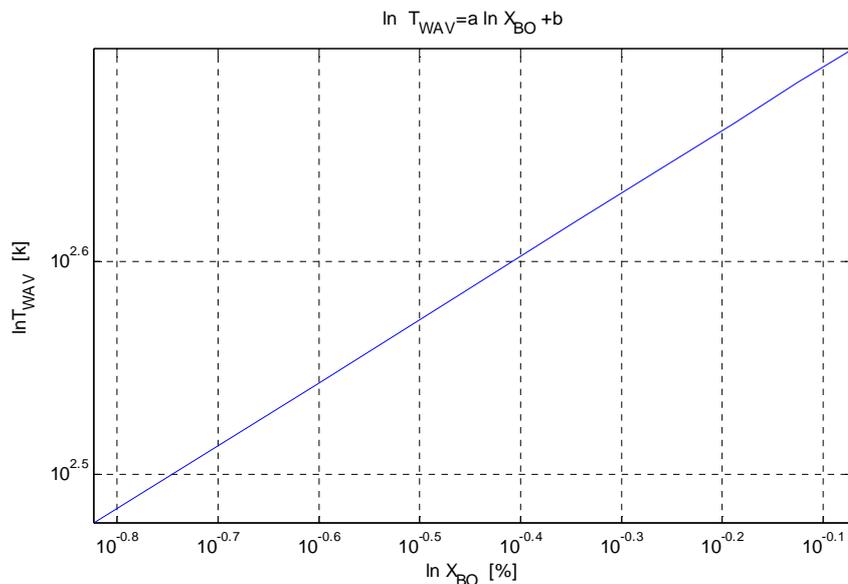


Figure (III.4b) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure avec échelle logarithmique

Figure (III.4) : l'onde de chaleur en fonction de la fraction d'hydrocarbure

La figure(III.4a) représente la relation de la température l'onde de chaleur ( $T_{WAV}$ ) et la fraction d'hydrocarbure ( $X_{BO}$ ), en remarque que les deux sont proportionnelle car l'augmentation de ( $X_{BO}$ ) implique l'augmentation de  $T_{WAV}$ .

La figure( III.4b) donne l'allure de loge d'onde de chaleur ( $\ln(T_{WAV})$ ) en fonction de loge de la fraction d'hydrocarbure ( $X_{BO}$ ), que représente une droit croissante telle que ne passe pas par l'origine.

Ø Le temps de déclenchement de boil-over classique ( $t_{BO}$ ) en fonction de la fraction d'hydrocarbure ( $X_{BO}$ )

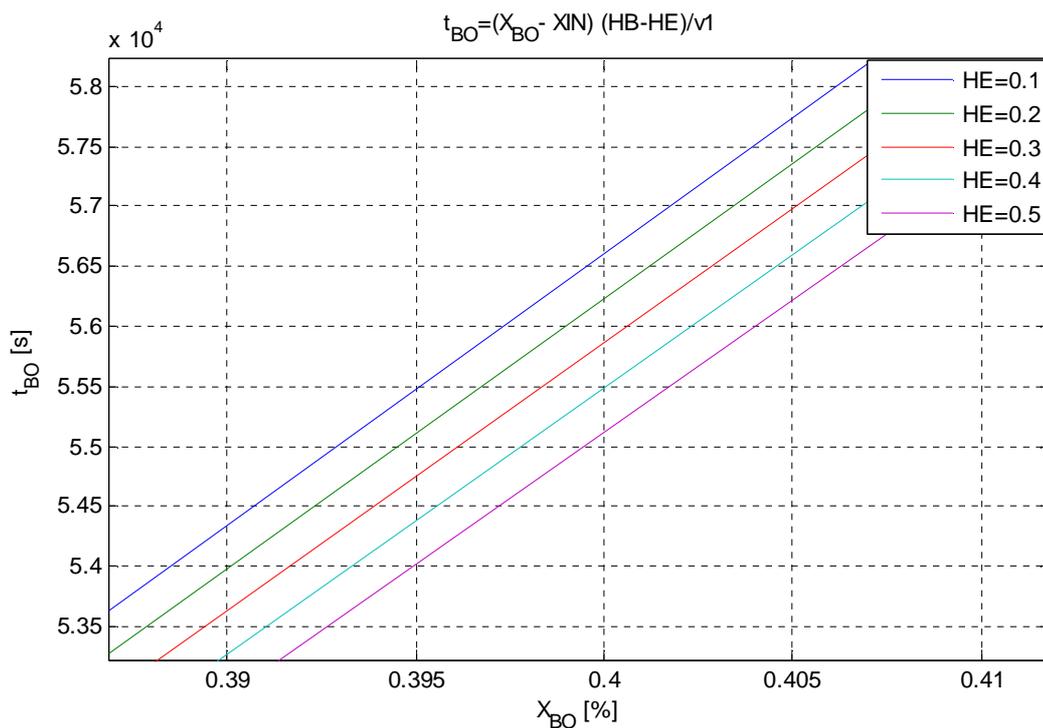


Figure (III.5) : courbe de temps de déclenchement du boil over en fonction de la fraction d'hydrocarbure.

Ce graphe montre la relation entre le temps de déclenchement et la fraction d'hydrocarbure qui se présentent sous forme des droites parallèles, en remarque que le temps de déclenchement et la fraction d'hydrocarbure sont aussi proportionnelle.

Avec HE est l'hauteur d'eau au fon du bac.

Ø Le temps de déclenchement de boil over en fonction de H

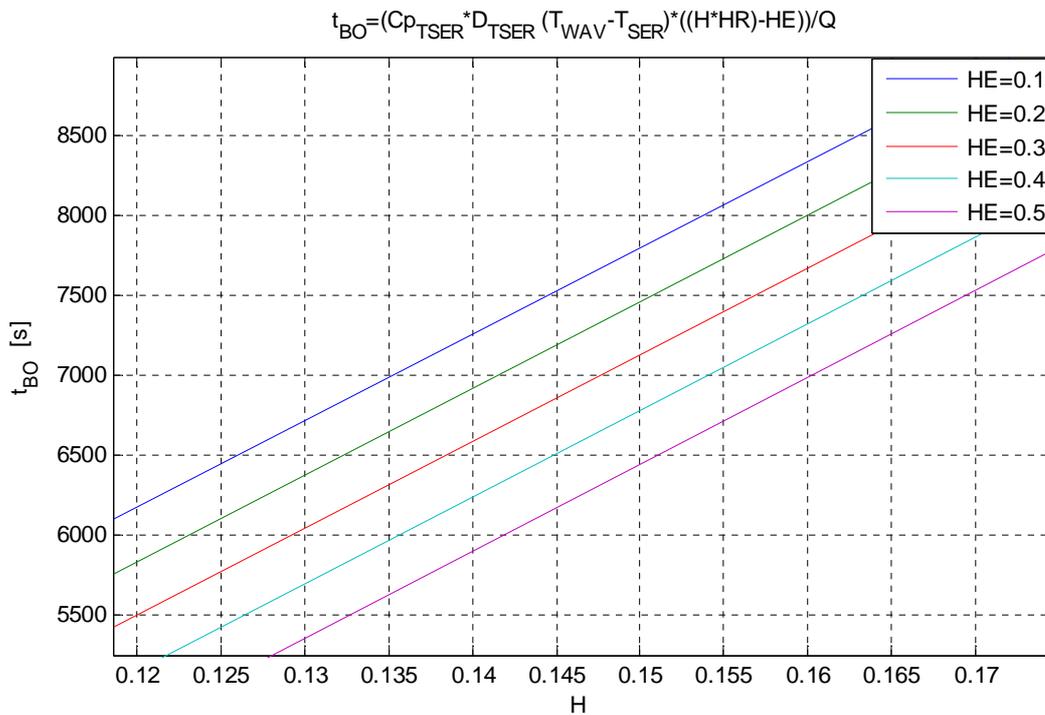


Figure (III.6) : le temps de déclenchement en fonction de H

D'après cette figure en conclure que le temps de déclenchement de boil over sera important lorsque H augmente, et H qui représente la fraction de l'hauteur brut sur l'hauteur de réservoir c'est-à-dire :

$$H = HB/HR$$

Telle que :

$$HB = H_{LIQ} + HE$$

$H_{LIQ}$  est l'hauteur d'hydrocarbure liquide contenu dans le bac au moment où l'incendie se déclare (m).

Ø Le temps de déclenchement de boil over en fonction de la température d'onde de chaleur

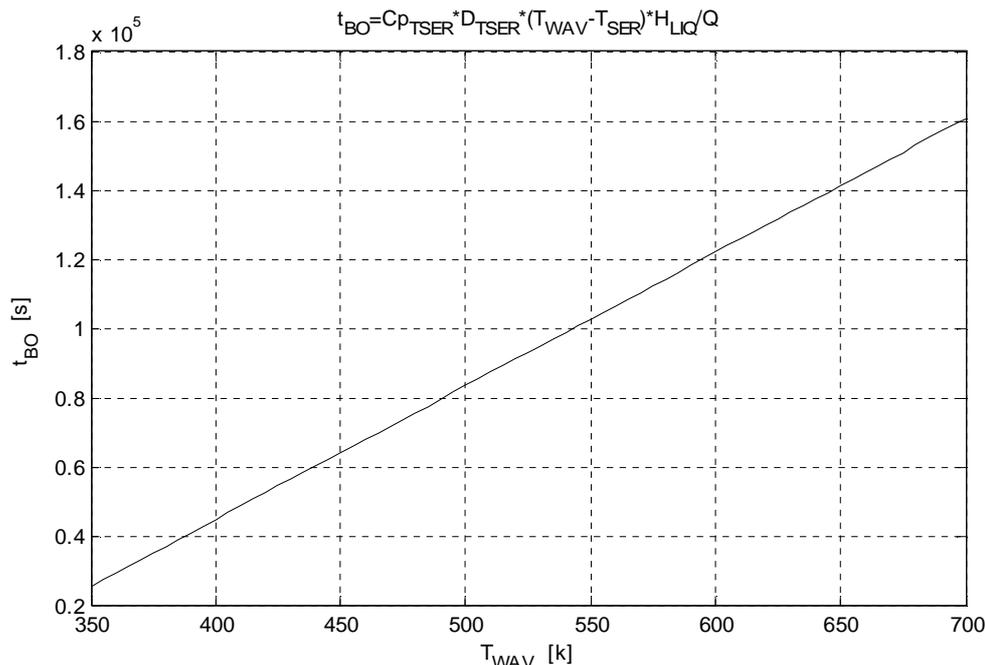


Figure (III.7) : le temps de déclenchement en fonction de la température d'onde de chaleur

L'allure de cette figure montre que l'augmentation de la température de l'onde de chaleur implique une augmentation de temps de déclenchement de boil-over.

### III.3.2. Le boil-over classique avec le produit inflammable « fuel-oil »

Ce sont tous les fuel-oils résiduels (lourds), y compris ceux obtenus par mélange, dont la viscosité cinématique est supérieure à 10 st à 80°C. Le point d'éclair est toujours supérieur à 50°C et la densité toujours supérieure à 0.90 kg/l.

**Fuel-oil à faible teneur en soufre :** fuel-oil lourd dont la teneur en soufre est inférieure à 1%.

**Fuel-oil à haute teneur en soufre :** fuel-oil lourd dont la teneur en soufre est de 1% ou plus.

#### III.3.2.1. Calcul de la quantité d'hydrocarbure participant à la formation de la boule de feu

§ La vitesse de combustion  $v_1$

$$v_1 = 10^{-3} \frac{\left( \frac{\Delta H_c}{\rho(T_M)} \right)}{L_V + \int_{T_{SER}}^{T_{BUL}} (-2,86 + 0,4125T^{0,25} - 117,1548T^{-0,75} + 16,4908T^{-0,5} + 0,1048T^{0,5} - 0,0057T^{0,75} + 930600,81T^{-3} + 0,0041T^1 - 0,00002T^2 + 593,177T^{-1} - 2854,887T^{-1,5})dT}$$

$$v_1 = 10^{-3} \frac{\left( \frac{40100000}{931,94} \right)}{860000 + \int_{300}^{544} (-2,86 + 0,4125T^{0,25} - 117,1548T^{-0,75} + 16,4908T^{-0,5} + 0,1048T^{0,5} - 0,0057T^{0,75} + 930600,81T^{-3} + 0,0041T^1 - 0,00002T^2 + 593,177T^{-1} - 2854,887T^{-1,5})dT}$$

$$v_1 = 5.1020379 \cdot 10^{-5} \quad (\text{m/s})$$

§ Calcul itératif de  $X_{\text{BO}}$  et  $t_{\text{BO}}$  et  $T_{\text{WAV}}$

L'équation de la courbe de distillation de brut :

$$\ln T_{\text{WAV}} = a \times \ln X_{\text{BO}} + b$$

Avant en doit calculé a et b :

$$a = (\ln(653) - \ln(453)) / (\ln(0,85) - \ln(0,15))$$

$$a = 0.2108179$$

$$b = \ln(653) - a \times \ln(0,85)$$

$$b = 6.5158390$$

$$t_{\text{BO}} = \rho(T_{\text{SER}}) \times C_p(T_{\text{SER}}) \times H_{\text{LIQ}} \times (T_{\text{WAV}} - T_{\text{SER}}) / Q_0$$

$$X_{\text{BO}} = (v_1 \times t_{\text{BO}}) / H_{\text{LIQ}} + X_{\text{IN}}$$

D'après ces équations on obtient le tableau suivant :

$T_{\text{WAV}}$ (k)	$t_{\text{BO}}$ (s)	$X_{\text{BO}}$
455,500109	$5,701361812 \cdot 10^4$	0,341071709
455,520112	$5,702095546 \cdot 10^4$	0,3410962938
455,530211	$5,7024625233 \cdot 10^4$	0,341108592
455,540102	$5,7028324699 \cdot 10^4$	0,341120990
455,552105	$5,7030119069 \cdot 10^4$	0,3411270041
455,553206	$5,703308927 \cdot 10^4$	0,341136958
455,553207	$5,703308965 \cdot 10^4$	0,341136959
455,5532071	$5,703308967 \cdot 10^4$	0,3411369596

Tableau (III.2) : Résultats de calcul de  $t_{\text{BO}}$  et  $T_{\text{WAV}}$  et  $X_{\text{BO}}$

Donc on a les résultats suivants :

$$X_{\text{BO}} = 0,3411369596$$

$$T_{\text{WAV}} = 455,5532071 \text{ k}$$

$$t_{\text{BO}} = 57033,08967 \text{ s}$$

§ La vitesse  $v_2$

$$v_2 = H_{LIQ} / t_{BO}$$

$$v_2 = 5500000 / 57033,08967$$

$$v_2 = 2.612518 \cdot 10^{-4} \quad \text{m/s}$$

§ La masse de vapeur  $M_{VAP}$

$$M_{VAP} = X_{VAP} \times M_{LIQ} = (1 - X_{BO}) \times M_{LIQ}$$

$$M_{VAP} = (1 - X_{BO}) \times M_{LIQ}$$

$$M_{VAP} = (1 - 0,3411369596) \times 5500000 = 3.600894 \cdot 10^6$$

$$M_{VAP} = 3.600894 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

$$X_{VAP} = 1 - X_{BO} = 1 - 0,3411369596 = 0.654708062264$$

$$X_{VAP} = 0.654708062264$$

§ Le volume de brut projet

Avant il faut qu'en calcul la surface du bac de stockage:

$$S = \pi \times d^2 / 4 \quad (\text{m}^2)$$

$$S = \pi \times 60^2 / 4 = 2827,35 \text{ m}^2$$

$$S = 2827,35 \text{ m}^2$$

$$V_{bp} = ((HB - HE) - (t_{BO} \times v_1)) \times S \quad (\text{m}^3)$$

$$V_{bp} = ((15,30 - 0,4) - (57033,08967 \times 5.1020379 \cdot 10^{-5})) \times 2827,35$$

$$V_{bp} = 33900,35096 \quad \text{m}^3$$

§ La masse de brut projeté

$$M = V_{bp} \times \rho_{TM}$$

$$M = 33900,35096 \times 911,733 = 30908091,167843$$

$$M = 30908091,167843 \quad \text{kg}$$

**III.3.2.2. Calcul des caractéristiques de la boule de feu**

§ La température de la flamme

$$T_{FLA} = ([\Phi_0 + \varepsilon \times \sigma \times T_{AMB}^4] / [\varepsilon \times \sigma])^{1/4}$$

$$T_{FLA} = ([150000 + 0,6 \times 5,677 \times 10^{-8} \times 300^4] / [0,6 \times 5,677 \times 10^{-8}])^{1/4}$$

$$T_{FLA} = 1449,28834 \quad \text{k}$$

§ La hauteur de brut à l'instant du déclenchement du boil over

$$H_{t_{BO}} = HB - v1 \times t_{BO}$$

$$H_{t_{BO}} = 15,30 - 5.1020379 \times 10^{-5} \times 57033,08967 = 12.39015012$$

$$H_{t_{BO}} = 12.39015012 \quad \text{m}$$

§ La fraction d'hydrocarbures brûlée dans la boule

$$X = X_{VAP} \times LSI$$

$$X = 0.654708062264 \times 0,055 = 0.03600894$$

$$X = 0.03600894$$

§ La concentration C d'hydrocarbure présent dans la boule de feu

$$C = \rho_g(T_{FLA}) \times LIS$$

$$C = 11,65 \times 0,055 = 0.640750000$$

$$C = 0.640750000$$

§ Le volume  $V_{FB}$  de la boule de feu

$$V_{FB} = M_{VAP} / C$$

$$V_{FB} = 3.600894 \cdot 10^6 / 0.640750000$$

$$V_{FB} = 5.61981169 \times 10^6 \quad \text{m}^3$$

§ Le rayon de la boule de feu

$$R_{FB} = [(3 \times V_{FB}) / (4 \times \pi)]^{1/3}$$

$$R_{FB} = [(3 \times 5.61981169 \times 10^6) / (4 \times \pi)]^{1/3}$$

$$R_{FB} = 236,57978524 \text{ m}$$

§ La durée de vie de la boule de feu  $t_{FB}$

$$t_{FB} = 0,295(M_{VAP})^{0,32}$$

$$t_{FB} = 0,295(3.600894.10^6)^{0,32}$$

$$t_{FB} = 36.972033433 \text{ s}$$

§ La hauteur  $h_{FB}$  du centre de la boule de feu

$$t = 36.972033433 \times T_{FLA}^{10/3} / M_{VAP}^{1/3} \times 10^{10}$$

$$t = 36,377278367 \times (1449,28834)^{10/3} / (3.600894.10^6)^{1/3} \times 10^{10}$$

$$t = 0.830971018$$

$$h_{FB} = \left[ \frac{68,571 \times t}{2,857 + t} \right] \times (M_{VAP} / T_{FLA})^{1/3} + H_{EQU}$$

$$h_{FB} = \left[ \frac{68,571 \times 0.830971018}{2,857 + 0,8315336686} \right] \times (3.600894.10^6 / 1449,288)^{1/3} + 60$$

$$h_{FB} = 341,38178879 \text{ m}$$

### III.3.2.3. Calcul des effets thermiques de la boule de feu

§ Les effets létaux significatifs

$$\Phi_{\text{létal significatifs}}^{4/3} t_{FB} = 1800 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = \exp(5,622 - 0,75 \ln t_{FB})$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = \exp(5,622 - 0,75 \ln 36.972033433)$$

$$\Phi_{\text{létal significatifs}} = 18.437353157 \text{ kW/m}^2$$

§ Les effets létaux

$$\Phi_{\text{létal}}^{4/3} t_{FB} = 1000 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{létal}} = \exp(5,181 - 0,75 \ln t_{FB})$$

$$\Phi_{\text{létal}} = \exp(5,181 - 0,75 \ln 36.972033433)$$

$$\Phi_{\text{létal}} = 11.8624585501 \text{ kW/m}^2$$

§ Les effets irréversibles

$$\Phi_{\text{irrév}}^{4/3} t_{FB} = 600 \text{ (kW/m}^2\text{)}^{4/3} \cdot \text{s}$$

$$\Phi_{\text{irrév}} = \exp(4,8 - 0,75 \ln t_{FB})$$

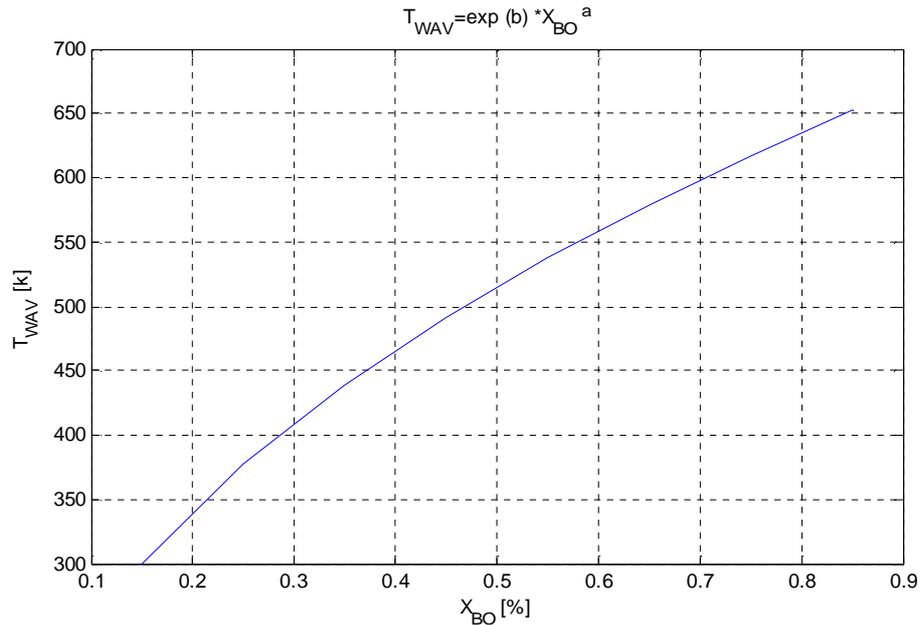
$$\Phi_{\text{irrév}} = \exp(4,8 - 0,75 \ln 36.972033433)$$

$$\Phi_{\text{irrév}} = 8.104169397 \text{ kW/m}^2$$

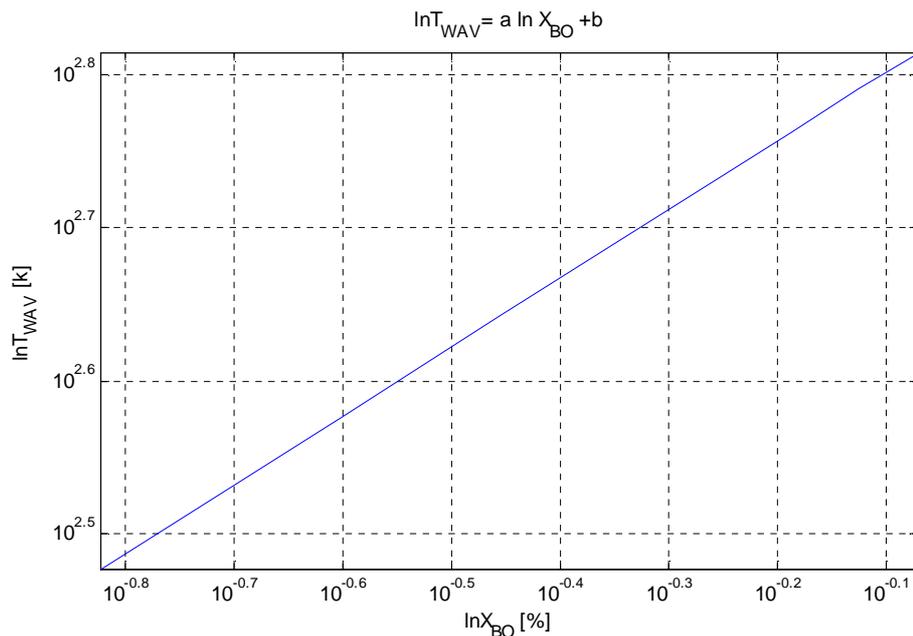
### III.3.2.4. Présentation graphique

Les résultats obtenus dans le calcul (fuel-oil) sont représentés par les figures suivantes (III.8, III.9, III.10 et III.11):

- Ø La température de l'onde de chaleur ( $T_{WAV}$ ) en fonction de la fraction de fuel oil ( $X_{BO}$ )



Figure(III.8.a) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil



Figure(III.8.b) : courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil avec échelle logarithmique

Figure(III.8) : l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil.

La figure (III.8.a) représente une courbe de l'onde de chaleur en fonction de la fraction de fuel oil, on remarque que l'augmentation de la fraction implique une augmentation de l'onde de chaleur. La figure(III.8.b) montre que la relation entre l'onde de chaleur et la fraction pour le fuel oil est une droite à l'échelle logarithmique, a et b sont des constante déjà calculés.

∅ Le temps de déclenchement de boil-over classique ( $t_{BO}$ ) en fonction de la fraction de fuel oil ( $X_{BO}$ ) :

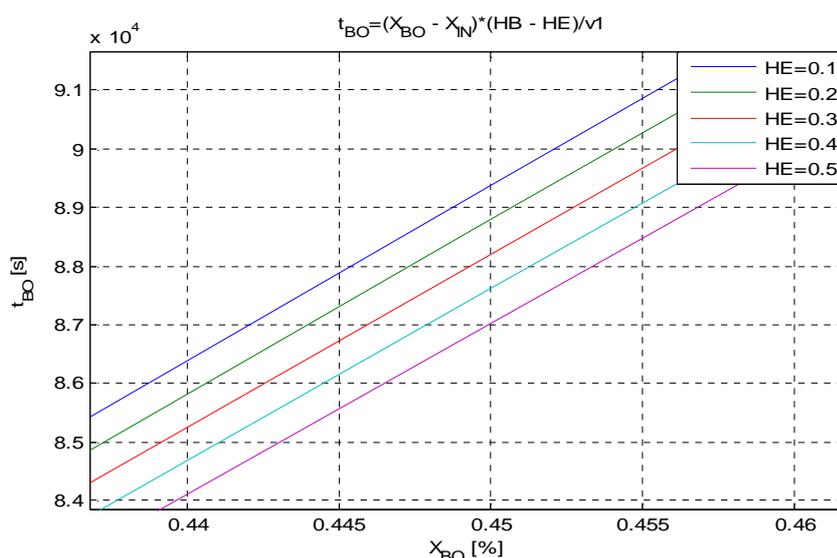


Figure (III.9) : courbe de temps de déclenchement du boil-over en fonction de la fraction de fuel-oil.

D'après cette figure (III.9), on peut dire que le temps de déclenchement  $t_{BO}$  et la fraction  $X_{BO}$  sont proportionnels, on plus en distingue que la hauteur d'eau au fond du bac joue un rôle très important sur le temps de déclenchement car la figure montre que pour  $HE=0,1m$  on aura un temps de déclenchement long. Donc, la quantité de l'eau au fond du bac qui caractérise le temps de déclenchement si le boil over ait lieu.

Ø Le temps de déclenchement de boil over en fonction de H :

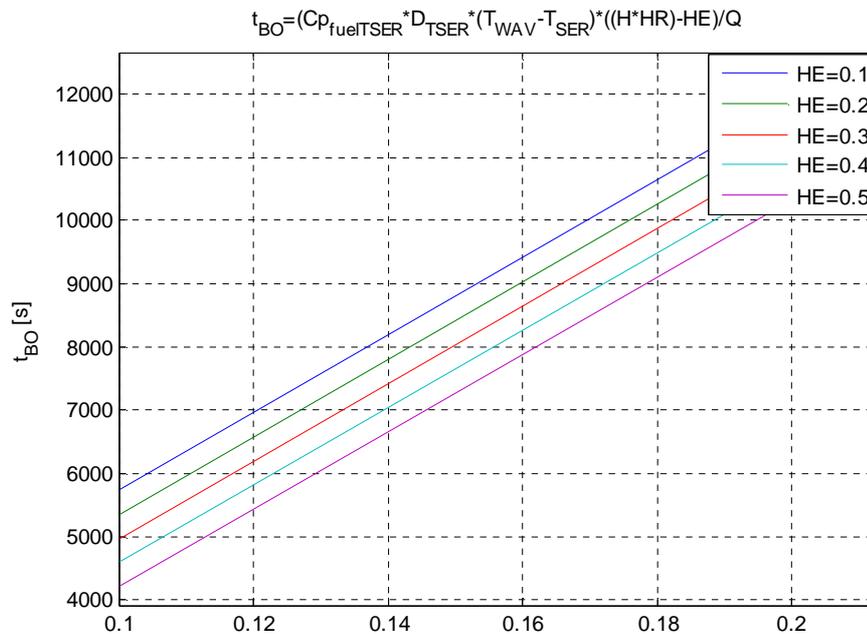


Figure (III.10): le temps de déclenchement en fonction de H pour le fuel-oil

Cette figure (III.10) donne l'allure de temps de déclenchement de boil-over en fonction de H qui représente la fraction de l'hauteur brut sur l'hauteur de réservoir c'est-à-dire :

$$H = HB/HR$$

Telle que :

$$HB = HLIQ + HE$$

$H_{LIQ}$  est l'hauteur d'hydrocarbure liquide contenu dans le bac au moment où l'incendie se déclare (m).

En remarque le temps de déclenchement sera grand lorsque H proche de 1.

Ø Le temps de déclenchement de boil-over en fonction de la température d'onde de chaleur

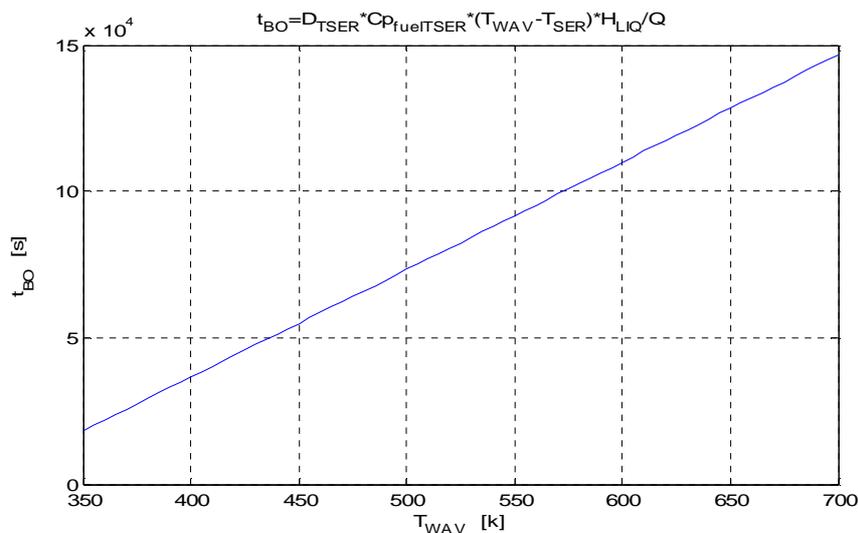


Figure (III.11): le temps de déclenchement en fonction de la température d'onde de chaleur pour le fuel-oil

La figure(III.11) montre que la relation entre le temps de déclenchement de boil-over et la température d'onde de chaleur est proportionnelle.

#### III.4. Conclusion

D'après ce chapitre on a déterminé les caractéristiques de phénomène de boil over classique pour :

- Le brut léger ;
- Le fuel-oil.

Les résultats obtenus montrent que ce phénomène du boil-over classique est très dangereux pour l'homme et s'il commence on ne peut pas l'arrêter. Le temps de déclenchement pour le boil-over classique est très long car on trouve ce temps supérieurs à 14h pour le brut léger et supérieurs à 15h pour fuel-oil, on a d'après l'INERIS, que le temps minimum pour le déclenchement du boil-over est de 4h, sans oublier que ce temps est en fonction de la température de l'onde de chaleur et aussi les résultats trouvent sur la boule de feu qui sera vu à l'explosion, son rayon est très important, donc en doit évité ce risque en respectant les normes de stockage des produits inflammable.

**IV.1. Introduction**

Les feux de réservoirs sont des accidents rares, mais quand ils se produisent ; ils peuvent constituer une menace significative de sûreté et ils sont extrêmement difficiles à commander. Ils présentent un vrai défi aux combattants du feu, aux compagnies pétrolières et à l'environnement.

En raison de leur rareté, il y a peu d'expérience pratique traitant ce genre de scénarios et par conséquent le manque d'efficacité dans l'extinction de ces incendies.

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.

Trois scénarios sont afférents au phénomène de boil over :

- a) Feu du bac avec création d'une onde de chaleur ;
- b) Feu de la cuvette de rétention contenant le réservoir et vaporisation d'un fond d'eau après un échange thermique de longue durée par rayonnement et conduction entre le foyer et le réservoir ;
- c) Feu du bac et de la cuvette de rétention cumulant les deux effets mentionnés ci-dessus.

**IV.2. Conditions nécessaires pour la naissance d'un boil over**

Pour qu'un boil over se produise, trois conditions doivent être réunies :

- 1) la présence d'eau à transformer en vapeur ;
- 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 de l'hydrocarbure ;
- 3) un hydrocarbure suffisamment visqueux pour que la vapeur créée par le contact de la zone chaude et du fond d'eau ne puisse pas traverser l'hydrocarbure facilement depuis le bas du réservoir.

Ces conditions entendent par conséquent limiter l'occurrence du phénomène à certains hydrocarbures tels le gazole, le Fuel oil, le brut, etc.

**IV.2.1.Présence d'eau**

La présence d'eau dans un bac en feu peut être liée notamment aux causes suivantes :

- l'hydrocarbure contient naturellement une fraction réduite d'eau susceptible de migrer par densité au fond du bac (décantation) ;
- 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 ;
- introduction d'eau de refroidissement ou d'extinction en cas de feu.

**IV.2. 2. Onde de chaleur ou zone chaude**

Dans le cas de la combustion d'un hydrocarbure caractérisé par une large plage de températures d'ébullition, les coupes légères à bas point d'ébullition remontent à la surface et alimentent le feu, tandis que les coupes plus lourdes à haut point d'ébullition, coulent vers le fond et forment un front chaud. Ce front chaud réchauffe les couches d'hydrocarbure froid de plus en plus profondes, tandis que le feu continue de brûler en surface. Il se forme ainsi, sous la surface du feu, une zone de température homogène dont l'épaisseur va croître au cours du temps, ce phénomène est dénommé « **onde de chaleur** ».

Les conditions nécessaires à la formation d'une onde de chaleur:

- a) Naissance d'un feu dans le réservoir atmosphérique concerné; ceci implique que le toit soit déjà détruit ou expulsé ;
- b) Vitesse de descente de l'onde de chaleur supérieure au taux de régression du foyer ;
- c) Combustion d'un hydrocarbure à plage d'ébullition suffisamment large.

**IV.2. 3. Hydrocarbure suffisamment visqueux**

Une fois le volume de vapeur d'eau formé par contact de la zone chaude avec l'eau située en pied de bac, ce volume de vapeur ne pourra agir à l'instar d'un piston que si l'interface vapeur en expansion/couche d'hydrocarbure liquide offre des conditions d'étanchéité suffisantes. Dans le cas contraire, la vapeur d'eau générée s'échappera sous forme de bulles à travers de l'hydrocarbure liquide et le phénomène résultant s'identifierait plutôt à un slop over qu'à un boil over.

Cette condition d'étanchéité se traduit physiquement par un critère sur la viscosité cinématique de l'hydrocarbure stocké à la température de 393 K (120 °C).

En outre, il a été déduit de l'analyse des accidents passés que la limite à retenir quant à la viscosité correspondrait à celle du kérosène. Etant donné que la viscosité cinématique du kérosène à 393 K est de 0,73 st, pour qu'il y ait occurrence d'un effet piston, la viscosité cinématique  $\nu_{HC}$  de l'hydrocarbure stocké devra être supérieure pour la même température de 393 K à cette valeur limite de 0,73 st.

**IV.2. 4. Hydrocarbures susceptibles de produire un boil over**

Les paragraphes précédents ont montré que les différentes conditions nécessaires à la naissance d'un boil-over impliquent certaines caractéristiques des hydrocarbures.

L'hydrocarbure doit principalement satisfaire deux critères :

- a) une plage de températures d'ébullition s'étendant 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 ;
- b) une viscosité cinématique supérieure à celle du kérosène à 393 K, soit  $\nu_{HC} > 0,73 \text{ st.}$

Ces deux critères sur les caractéristiques de l'hydrocarbure permettent de présager des types de produits pouvant être l'objet d'un boil-over.

**IV.3. Les stratégies de lutte contre l'incendie****IV.3. 1. Stratégie passive**

Aucune activité de lutte contre l'incendie :

- Laisser le contenu briller ;
- Évacuation de la zone si nécessaire.

Application de stratégie passive :

- Moyens humains et matériels très insuffisants ;
- Danger imminent ;
- Boil-over ;
- échec de réservoir ;

**IV.3. 2. Stratégie défensive**

Protège le personnel et les équipements exposés :

- Laisser le contenu du bac brûler en toute sécurité.

Application de la stratégie défensive :

- Feu de bac avec un toit flottant submergé obstruant de grandes parties ;
- Manque de ressources empêchant une stratégie ;
- offensive réussie.

**IV.3. 3. Stratégie offensive**

Vie est en danger imminent, alors une action d'extinction agressive focalisée de suppression du feu devrait appuyer le sauvetage.

- L'exposition probable des équipements non impliqués pourrait de manière significative augmenter le risque s'ils devenaient impliqués ;
- Si des moyens adéquats sont disponibles (personnel, équipement et matériaux) dans des délais de temps acceptable pour une extinction totale du feu .

**IV.4. Les préventions****IV.4.1. Préventions liées au stockage des hydrocarbures**

La prévention liée au stockage des hydrocarbures consiste à la réduction des risques à la source par l'instauration d'un programme de contrôles des constituants du réservoir et la mise sur place d'une série de mesures préventives pour l'amélioration des conditions de travail.

La prévention consiste aussi à imposer des règles dans les zones de stockage. Ces règles concernent en général le confinement et contrôle des déversements accidentels et les moyens de lutte contre l'incendie adapté aux risques.

**IV.4.2. Mesures prévention contre le risque explosion incendie**

- Mise à la terre des réservoirs ;
- Les réservoirs de stockage sont mis à la terre, une prise par 20m de circonférence et interconnectées entre elles.

**IV.4.3. Mesures de prévention générale contre l'incendie**

- Les toits des bacs doivent être inspectés à des intervalles fréquents. Toute présence de vapeurs inflammables à l'intérieur des caissons devra être signalée au responsable ;
- Les bacs doivent être équipés de reniflard adéquat pour régler la pression intérieure ; Les arrête-flammes doivent être contrôlés fréquemment ;
- Les orifices de trous de jauges et de trous d'homme doivent être maintenus fermés, lorsque leur ouverture n'est pas motivée par un but d'exploitation ou d'entretien ;
- Il n'est autorisé à descendre ou à marcher sur les toits flottants sans motif de service ; Lorsqu'il y a des concentrations de vapeurs d'hydrocarbures, le port d'un appareil ou masque respiratoire filtrant approprié est obligatoire ;
- Les réseaux de terre des parafoudres et ceux destinés à l'élimination de l'électricité statique sont séparés ;

**IV.4.4. Installation des liaisons équipotentielle**

- Des liaisons équipotentielles entre le toit, la robe, l'échelle, doivent être reliés électriquement entre eux afin d'éliminer les différences de potentielles ;
- Le personnel autorisé à monter sur les toits devra porter des chaussures sans clous ni ferrures. Seuls les outils ne produisant pas d'étincelles y sont autorisés ;
- Les récipients et les flacons utilisés pour l'échantillonnage du pétrole doivent être en cuivre ou en laiton ;
- Le pétrole répandu sur les toits doit être immédiatement nettoyé ;
- Les chiffons usagés ou imbibés d'hydrocarbures ne doivent pas être laissés sur les toits des réservoirs ou à l'intérieur des cuvettes de rétention ; ils doivent être déposés dans des récipients prévus à cet effet ;

- Pour s'éclairer, il ne devra être employé que les types de lampes étanches autorisées par le département ;
- Chaque fois qu'un bac de stockage est mis hors de service pour nettoyage, réparation ou pour modification, toutes les canalisations reliées à ces réservoirs doivent être déconnectées et obturées. Le service entretien doit s'assurer de l'isolement du réservoir ;
- Avant de commencer un travail sur les réservoirs protégés cathodiquement, un préavis raisonnable doit être donné au service corrosion qui devra couper la source de courant électrique et mettre à terre les bacs intéressés ;
- Avant d'entreprendre tout travail impliquant l'utilisation de feux nus, à l'intérieur du parc de stockage, une autorisation écrite devra être formulée par l'entrepreneur du travail à faire au responsable du département ;
- inspection des lieux où s'effectuent des travaux à chaud pour s'assurer que le travail se déroule conformément aux conditions spécifiées sur le permis de travail à chaud.

#### **IV.4.5. Mesures de prévention contre la corrosion**

La corrosion est un phénomène électrochimique qui aboutit à la dégradation des structures métalliques (rouille ou oxydation du métal). Les altérations se traduisent par des microfissures, cratères amincissement des parois des viroles .A long terme ces dégradations peuvent être à l'origine d'accidents majeurs, telle la rupture du bac.

Pour cela, la protection cathodique et les mesures de prévention suivantes sont à mettre en œuvre pour lutter contre la corrosion .Contrôle périodique préventif :

- Contrôle et mesures des épaisseurs de parois ;
- Contrôle des joints de soudures ;
- Contrôle des fonds de bac et des assises en béton ;
- Epreuves hydrostatiques.

#### **IV.4.6. Débordement ou avarie d'une capacité**

- Le débordement d'un réservoir, consécutif généralement à une fausse manœuvre, un défaut de surveillance, ou à l'expansion thermique, doit donner lieu à des mesures particulières, effectuées dans un ordre déterminé ;
- Arrêter le remplissage ;

- Mettre en fonctionnement, pendant quelques minutes le circuit de refroidissement, ou arroser à la lance le toit et paroi du réservoir ;
- Recouvrir l'huile, se trouvant dans la cuvette, de mousse ;
- Faire procéder au nettoyage de la cuvette de rétention ;
- En cas de fuite importante sur la paroi, procéder à la vidange du réservoir, et pomper parallèlement les hydrocarbures se trouvant dans la cuvette ;
- En cas de fuite par le fond du réservoir, procéder comme ci-dessus ou maintenir une garde d'eau à la partie inférieure du réservoir, en attendant la vidange ;

#### **IV.4.7. Mesures de prévention contre la pollution des sols et plan d'eau**

- Afin d'éviter tout pic de pollution faisant suite à de fortes pluies ou fuite de produit les zones de stockage, il est prévu un réseau de collecte raccordé à un ou plusieurs bassins de décantation ;
- Les eaux ainsi récupérées ne sont rejetées dans le milieu récepteur qu'après pré traitement. Si nécessaire, leur rejet pourra être étalé dans le temps afin de répondre aux exigences de la direction de l'environnement.

#### **IV.4.8. Systèmes de Protection des réservoirs**

- **Mousse**

Les réservoirs sont protégés par réseau de mousse. Les installations fixes de mousse doivent permettre de débiter un tapis de mousse de 20cm en 10 minutes sur la surface du joint annulaire.

- **Couronne de refroidissement**

Pour le refroidissement des réservoirs il est prévu des couronnes de refroidissement. Ces couronnes sont équipées de diffuseurs vissés et facilement démontables.

#### **IV.5. quelque accidents de boil-over**

##### **IV.5.1. Refineries D'Amoco (Milford Haven GB) - 1983**

- Incendie sur un bac à toit flottant, contenant 47000 t de carburant ;
- 1<sup>er</sup> boil-over a eu lieu, 02 heures après un 2<sup>ème</sup> boil-over.

Dégâts :

- 06 blessés parmi les pompiers ;
- Plusieurs dégâts matériels.

Cause :

- des escarbilles, générées par une torchère située à une 100m de cette zone, atteignent le toit flottant fissuré.

Intervention :

- 48 heures d'intervention ;
- protéger les bacs voisins et de refroidir le bac.



Figure (IV.1): Refineries d'Amoco (Milford Haven GB) – 1983 [14]

#### **IV.5.2. Raffinerie d'Orion (USA) - 2001**

Incendie sur bac de stockage d'essence (82,4m de diamètre)

Dégâts :

- Perte de brut ;
- Endommagement du toit flottant.

Cause :

- La foudre.

Intervention :

- 65 min ;
- Stratégie d'attaque bien préparée ;
- Système de refroidissement très tôt ;
- Moyens mobiles : haut débit et un emplacement judicieux.

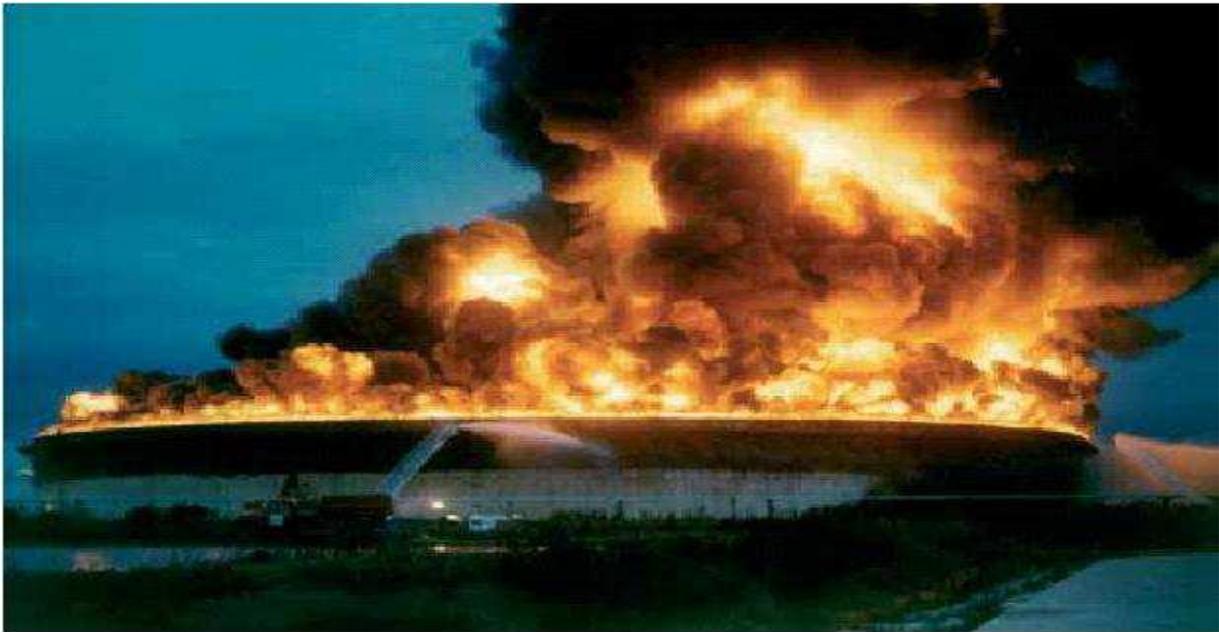


Figure (IV.2) : Raffinerie d'Orion (USA) – 2001 [14]

#### IV.5.3. Dépôt de carburant Buncefiled (GB) - 2005

- Plusieurs explosions se sont produites ;
- Un incendie sur plus de 20 cuves de stockage.

##### Dégâts

- 43 blessés ;
- Destruction presque totale du dépôt ;
- Atteinte sérieuse à l'environnement.

##### Cause :

- sur emplissage de bac ;
- Inflammation très loin du site (non identifiée).

##### Intervention :

- 60 heures de lutte acharnée ;
- Plusieurs équipes de pompiers ;
- Important moyens d'intervention. [14]



Figure(IV.3): Dépôt de carburant Buncefiled (GB) – 2 [14]

#### IV.5.4. Terminal de Stockage de Skikda RTE 2005

Un incendie sur le bac S106, puis bac adjacent le S105.

Dégâts :

- 02 morts et plusieurs blessés ;
- Plusieurs milliers de m<sup>3</sup> de brut brûlé et déversé ;
- 02 bacs complètement endommagés ;
- Perte de 07 camions d'intervention ;

Cause :

- Présence d'un nuage gazeux ;
- Source d'ignition (passage de véhicule).

Intervention :

- 08 jours d'intervention ;
- Aggravation de l'accident ;
- Le manque organisation des secours ;
- Manque de moyens d'intervention adéquats.



Figure (IV.4): Terminal de Stockage de Skikda RTE 2005 [14]

## IV.6. Précautions et consignes d'extinction des feux de bacs

### IV.6.1. Les Feux d'évent

#### Cas n°1 : flamme rouge et fumée noire

L'atmosphère est riche en HC

- Eteindre la flamme ;
- Ne pas refroidir ou envoyer de la mousse, ceci va faire pénétrer l'air.

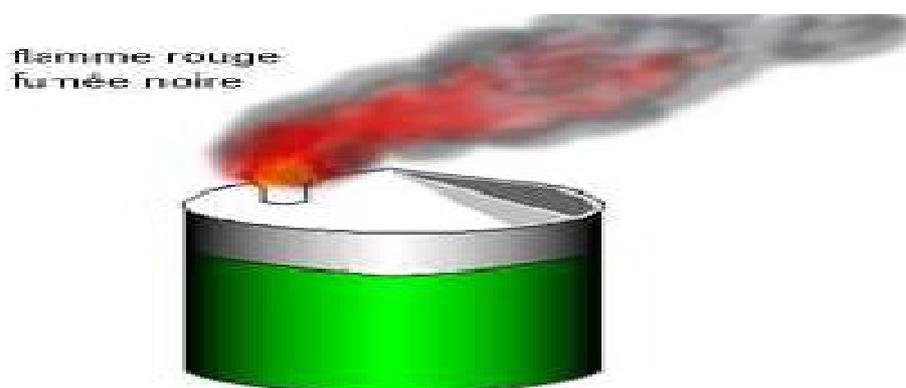


Figure (IV.5): flamme rouge et fumée noire [14]

**Cas n°2 : flamme bleu / verte**

- L'atmosphère est proche de la limite d'inflammabilité, risque d'explosion ;
- Envoyer du produit pour diminuer la phase gazeuse ;
- Ne pas refroidir ou envoyer de la mousse.

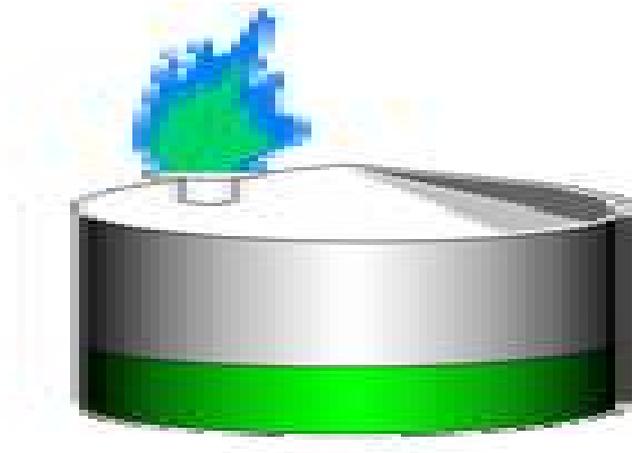


Figure (IV.6): flamme rouge et fumée noire [14]

**Cas n°3 : fumée noire sans flamme**

- Il y a combustion interne sans risque d'explosion ;
- envoyer de la mousse par les moyens fixes ;
- il faut refroidir le bac.



Figure (IV.7): Les Feux d'évent [14]

**IV.6.2 Les Feux de joint**

- L'extinction des feux de joint peut être complète à 100% si pas d'endommagement du toit ;
- Utilisation des moyens fixes d'extinction ;
- Les lances monitors sont déconseillées ;
- Difficulté d'atteindre le joint ;
- Risque de faire couler le toit.

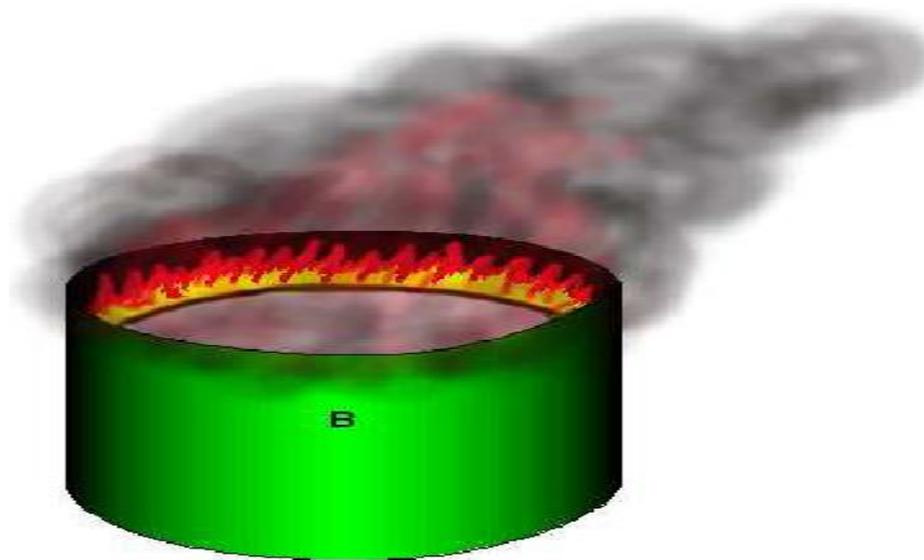


Figure (IV.8) : Les Feux de joint [14]

**IV.6.3 Feux de surface obstruée par un toit coulé**

Ces feux sont difficiles à éteindre.

- Éviter l'injection de mousse par le bas ;
- Envoyer la mousse par le haut ;
- Prévoir un supplément de mousse pour combler les zones obstruées.

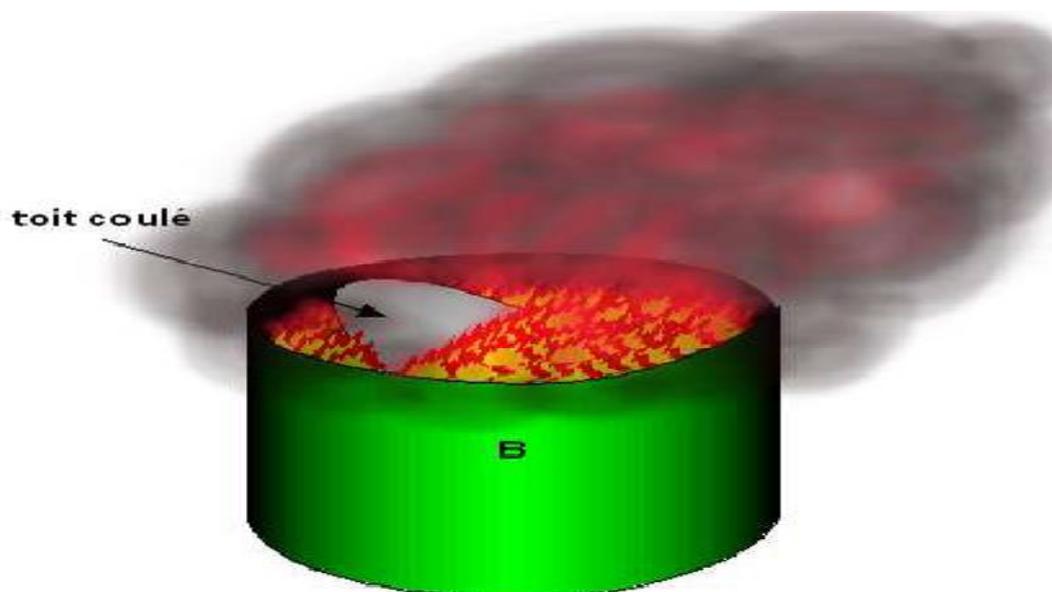


Figure (IV.9): Feux de surface obstruée par un toit coulé [14]

#### IV.6.4. Feux de pleine surface

Feux durs mais moins graves que les feux de bac avec un toit coulé.

- Par expérience, destruction des moyens fixes d'extinction ;
- Moyens Mobiles par le haut avec débit haut ;
- Injection de mousse par le bas.

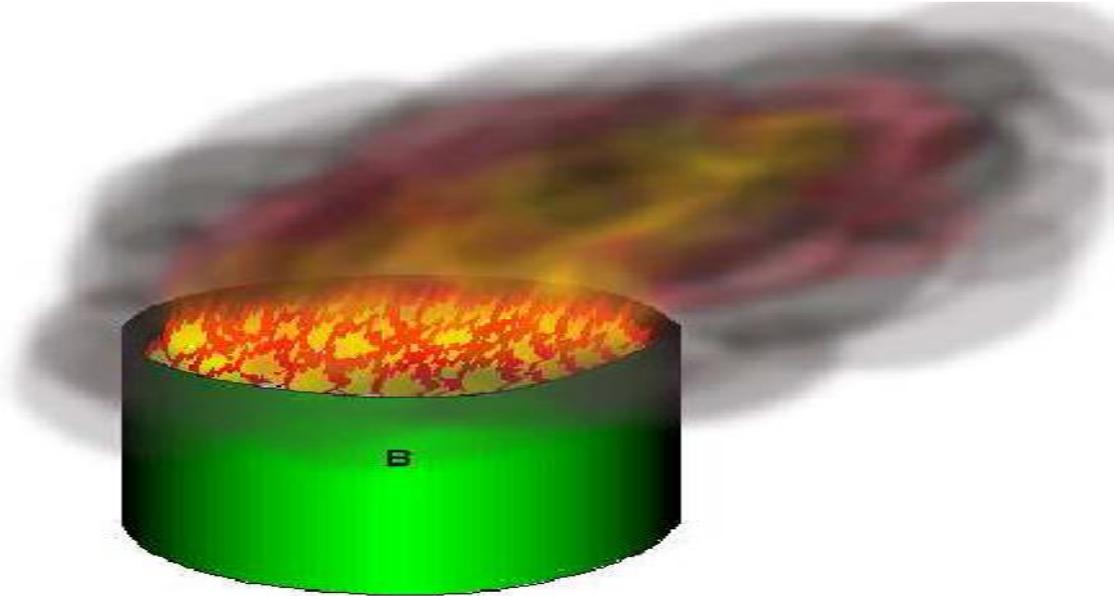


Figure (IV.10): Feux de pleine surface [14]

#### IV.6.5 Les feux de cuvette

- Contenir les hydrocarbures ;
- Envoyer la mousse sur les parois des réservoirs au canon, Les déversoirs en appoint ;
- Protéger les réservoirs les plus menacés ;
- bac en contact direct avec les flammes ;
- Produit stocké est sensible à la chaleur ;
- Contrôle et extinction de la cuvette de rétention avant l'extinction des feux de bac.

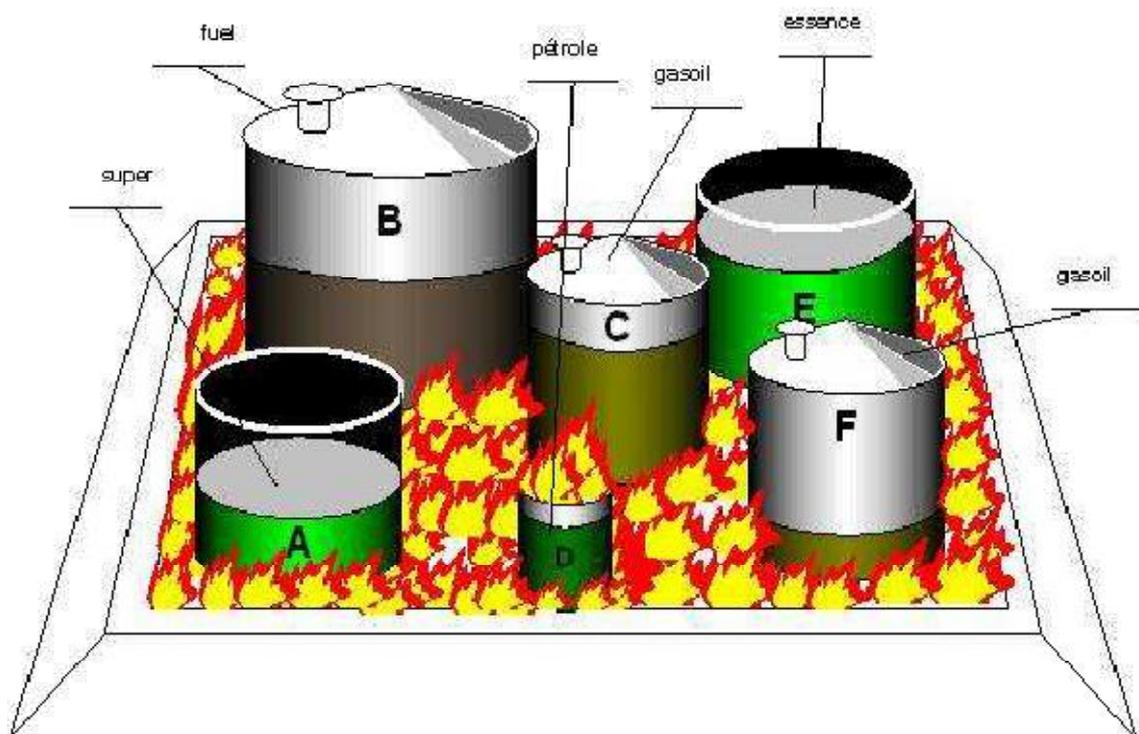


Figure (IV.11): Les feux de cuvette [14]

#### IV.7 Conclusion

Pour conclure, on peut dire que la politique de prévention doit avoir pour objectif de prémunir la naissance du feu et d'empêcher son développement ainsi que sa propagation.

Il s'agit principalement de prendre des mesures pour éviter les sources d'inflammations, instaurer des contrôles périodiques, de disposer de moyens de lutte contre l'incendie bien adaptées aux installations.

## Conclusion générale

---

Le boil over est un phénomène industriel dangereux et rare. S'il se réalise, il peut causer des dégâts très importants et pour éliminer ces risques on doit éviter la présence d'une onde de chaleur (source de chaleur). Par ailleurs, et plus fondamentalement, le pétrole brut doit être suffisamment visqueux pour que l'effet de piston se produise. Le cas échéant, la vapeur créée au contact de la zone chaude et de l'eau au fond du réservoir ne peut pas traverser facilement depuis le bas du réservoir. Ce qui explique que l'effet piston soit plus faible car la vapeur d'eau va fragmenter la couche du pétrole liquide. Ceci conduit à la formation de la boule de feu. Donc, si la viscosité est trop faible, il n'y aura pas d'effet piston rendant la réalisation du boil over impossible.

Nous avons présenté dans ce travail une étude numérique pour le boil over classique. La modélisation mathématique du risque industriel a été effectuée avec les équations citées dans le chapitre III. Ces équations sont résolues en se basant sur un langage de programmation Matlab.

Les effets de la température de l'onde de chaleur, le temps de déclenchement, les dimensions du bac de stockage (le diamètre et la hauteur), la fraction du produit, la viscosité du produit stocké et la couche d'eau située au fond du bac sont des caractéristiques du boil over classique.

Les différents résultats sont traduits sous forme de courbes pour deux ou trois caractéristiques du boil over classique. Ces différents résultats ont montré que :

- Ø L'augmentation de la température d'onde de chaleur conduit à une augmentation du temps de déclenchement ;
- Ø La fraction de pétrole brut léger ou fuel oil augmente avec l'augmentation d'onde de chaleur ;
- Ø Les effets thermiques de la boule de feu diminuent avec l'augmentation de la durée de vie de la boule de feu ;
- Ø Lorsque la masse de vapeur augmente, cela implique que le rayon de la boule de feu augmente aussi ;
- Ø Une diminution de la hauteur de pétrole à l'instant du déclenchement de boil over ;

## Conclusion générale

---

Ø La relation entre le temps de déclenchement et la fraction du pétrole est proportionnelle pour les différentes hauteurs de l'eau située au fond du bac de stockage.

Le boil over en couche mince est un modèle qui a été développé par l'INERIS. Ce modèle n'a pas pu être observé sur l'échelle industrielle jusqu'à aujourd'hui. Ce phénomène n'a aucune onde de chaleur car le produit se consomme à une même vitesse que la surface du liquide jusqu'au contact entre le combustible chauffé à plus de 100°C et la couche d'eau située au fond du bac qui provoque la vaporisation brutale de cette dernière. En prenant du volume elle joue le rôle du piston, ce qui conduit à la naissance du boil over en couche mince.

L'étude numérique pour le boil over en couche mince n'a pas été réalisée étant un phénomène en cours de recherche et les équations y afférentes à l'étude et aux essais de laboratoires n'ont pas été publiés pour la protection du droit à la propriété industrielle et commerciale des dits laboratoires et qui nécessiterait une durée d'étude plus longue.

- [1] Le raffinage pétrolier ; pétrole : origine, production et traitement, Planète-énergie.
- [2] Microsoft ® Encarta ® 2009. © 1993-2008 Microsoft Corporation.
- [3] Sergent-chef LESCOLEC, Centre de Secours de Divonne-les-Bains 404, Avenue des Voirons, 01220 – Divonne-les-Bains, page1, 09/09/02.
- [4] Jérémy Laxalde ; Analyse Des Produits Lourds Du Pétrole Par Spectroscopie Infrarouge ; Thèse Docteur De L'université De Lille, le 16 Janvier 2012.
- [6] [www.unctad.org](http://www.unctad.org).
- [7] Le pétrole et ses impacts sur l'environnement, [www.name.documents.com](http://www.name.documents.com).
- [8] pétrochimie, <http://www.totalfinaelf.com>.
- [9] Documents internes de l'institut des hydrocarbures (IHC) Bomardes.
- [10] ENACT (Entreprise National D'Agréage et de Contrôle Technique) , Etude de dangers du centre de stockage de transfert d'huile , HASSI BERKINE ,page32 ,28/07/2012.
- [11] Groupe de travail dépôts liquides Inflammables, les boil-over et autres phénomènes générant des boules de feu concernant les bacs des dépôts de liquides inflammables, version 01, Juin 2007.
- [12] Stéphane duplantier, ineris-direction des risques accidentels parc alata, bp2, 60550 verneuil en halatte, Boil-over classique et boil-over couche mince, - [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr).
- [13] [www.aria.developpement-durable.gouv.fr](http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr) Incendie dans un dépôt d'hydrocarbures du Port Édouard Herriot à Lyon (69), les 2 et 3 juin 1987
- [14] REMIN Amirouche, Les feux de bac risques et stratèges du lutte contre l'incendie, Ingénieur Sécurité Activité Amont, Direction Production, Direction Régionale Rhourde Nouss, mars 2007.
- [15] Sara McAlester | Jyh-Yuan Chen A. Carlos Fernandez-Pello, Frederick F. Ling  
Fundamentals of Combustion Processes, Springer New York Dordrecht Heidelberg  
London Editor-in-Chief, 2011.
- [16] Gordon J. Van Wylen –Richard E. Sonntag, thermodynamique Appliquée, éditions du renouveau pédagogique, Inc., Montréal (Québec), 1981.

## Annexe 1

---

Paramètre à connaitre	Brut léger	Fuel oil
Température d'ébullition (k)	535	544
Température d'ébullition initiale correspondant à une fraction vaporisée de 15% (k)	348	453
Température d'ébullition finale correspondant à une fraction vaporisée de 85% (k)	823	653
Température critique (k)	686	929 ,8
Pression critique (pa)	$1,86.10^6$	$1,53.10^6$
Masse volumique de la phase liquide à 288k ( $kg/m^3$ )	802	990
Masse volumique de la phase gaz à 300k ( $kg/m^3$ )	6,686	11,65
Chaleur latente de vaporisation à température d'ébullition (J/kg)	$2,92.10^5$	$8,6.10^5$
Chaleur de combustion (J/kg)	$4,33.10^7$	$4,01.10^7$
Limite supérieure d'inflammabilité (% volume)	0,055	0,055
Viscosité à 393 k (cst)	2	10

Source [12]

## Annexe 2

formula	fuel	M (kg/kmol)	Tb (°c)	Cp (kj/kg.k)
CH <sub>4</sub>	Methane	16,04	-161	2,21
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetylene	26,04	-84	1,6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Ethylene	28,05	-104	1,54
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Ethane	30,07	-89	1,75
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Propane	44,10	-42	1,62
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n- butane	58,12	-0,5	1,64
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Iso-butane	58,12	-12	1,62
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	n-pentane	72,15	36	1,62
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Iso-pentane	72,15	28	1,60
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	n-Hexane	86,18	69	1,62
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	Iso-Hexane	86,18	50	1,58
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	n-Heptane	100,02	99	1,61
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	n-octane	114,23	126	1,61
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	Iso-octane	114,23	114	1,59
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	n-nonane	128,6	151	1,61
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	n-decane	142,28	174	1,61
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	Iso-decane	142,28	171	1,61
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	n-dodecane	170,33	216	1,61
CH <sub>4</sub> O	Methanol	32,04	65	1,37
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	Ethanol	46 ,07	78	1,42
H <sub>2</sub>	hydrogen	2,02	-253	14,47

Source [15]

## Annexe 3

### L'équation de Cp de fuel [16]

Les équations des éléments constituant le fuel

$$CP_{CH_4} = -672,87 + 439,74\theta^{0,25} - 24,875\theta^{-0,75} + 323,88\theta^{-0,5}$$

$$CP_{C_2H_4} = -95,395 + 123,15\theta^{0,5} - 35,641\theta^{0,75} + 182,77\theta^{-3}$$

$$CP_{C_2H_6} = 6,895 + 17,26\theta - 0,6402\theta^2 + 0,00728\theta^3$$

$$CP_{C_3H_8} = -4,042 + 30,46\theta - 1,571\theta^2 + 0,03171\theta^3$$

$$CP_{C_4H_{10}} = 3,954 + 37,12\theta - 1,833\theta^2 + 0,03498\theta^3$$

$$CP_{H_2} = 56,505 - 702,74\theta^{-0,75} + 1165,0\theta^{-1} - 560,70\theta^{-1,5}$$

$$CP_{H_2O} = 143,05 - 183,54\theta^{0,25} + 82,75\theta^{0,5} - 3,6989\theta$$

Avec :  $\theta = T/100$  et T (K)

$$Cp_{fuel} = \frac{\sum_i m_i Cp_i}{\sum_i m_i}$$

$$\sum_i m_i = 196,4 \quad kg/kmol$$

L'équation de la chaleur calorifique du fuel :

$$\begin{aligned} Cp_{fuel} = & -2,86 + 0,1048T^{0,5} - 0,0057T^{0,75} - 209086,4T^{-2} + 16,4908T^{-0,5} + 0,0041T \\ & - 0,000109341T^2 + 930600,81T^{-3} - 117,1548T^{-0,75} + 593,177T^{-1} \\ & - 2854,887T^{-1,5} + 0,4125T^{0,25} \end{aligned}$$

L'équation de l'enthalpie du fuel :

$$\begin{aligned} h_{fuel} = & -2,86T + 0,33T^{1,25} - 468,619T^{0,25} - 32,98T^{0,5} + 0,069T^{1,5} - 0,0032T^{0,75} \\ & - 465300T^{-2} + 0,002T^2 - 0,00000066T^3 + 593,177 \ln T \\ & + 5709,774T^{-1,5} \end{aligned}$$