

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département de Génie Mécanique**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie Mécanique

**Thème :**

**Etude expérimentale de feux  
de bacs à échelle réduite**

**Proposé et dirigé par :**

A. Bouhdjar, M.R., CDER  
B. Benkoussas, M.C., ENP  
Ph. Bournot, Prof., U. Med. Marseille

**Etudié par :**

B.M. Zehraoui

Promotion 2006-2007

### ملخص :

هذا العمل دراسة تجريبية لاحتراق وقود سائل في أحواض صغيرة. الوقود السائل المستعمل هو التترابروبيلين المهدرج. لقد تمت قياسات لفقدان كتلة الوقود وقياسات للحرارة لمختلف الأقطار, ثم مناقشة سلوك اللهب و سرعة فقدان كتلة الوقود. قياسات للحرارة تمت على الواجهة الخارجية لجدار الحوض لوصف سلوك مختلف المواد المكونة للأحواض. قمنا بقياسات للسرعة من أجل تحديد التوزيع العمودي للسرعة في سحابة الدخان.

**كلمات مفتاحية:** لهب؛ احتراق في أحواض؛ سحابة دخان.

### Résumé :

Ce travail est une étude expérimentale de petits feux de bacs. Un combustible liquide est utilisé c'est le Tétra Propylène Hydrogéné (TPH). Des mesures de perte de masse du combustible et des mesures de température ont été réalisées pour différents diamètres. Le comportement du débit de perte de masse et de la flamme est discuté. Des mesures de température par thermographie infrarouge sur la paroi extérieure du bac sont effectuées pour caractériser le comportement de différents matériaux constituant les bacs. Des mesures de vitesse par LDV sont effectuées afin de déterminer la distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache.

**Mots Clés :** TPH ; Feu de bac ; Combustion ; Feu de nappe ; Thermographie infrarouge ; LDV ; Thermocouple ; panache.

### Abstract:

The present work is an experimental study of small scale pool fires. A liquid fuel is used. It is a Hydrogenated Tetra Propylene. Loss of fuel mass and temperature measurements have been realized for various diameters. Rate of loss of fuel mass and flame behaviour is discussed. Temperature measurements per infra-red thermography on the external wall of the pool are taken to characterize the behaviour of various materials of the pools. LDV velocity measurements have been realized in order to determine the distribution of the vertical speed component in the plume.

**Key Words:** Combustion; pool fire; infra-red thermography; LDV; Thermocouple; plume.

# **REMERCIEMENTS**

*Je remercie avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie Monsieur B. BENKOUSSAS et Monsieur A. BOUHDJAR pour m'avoir sélectionné pour ce stage, pour avoir cru en moi et pour leur soutien et leurs conseils.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Ph. BOURNOT pour m'avoir accueilli au sein de l'Institut de Mécanique de Marseille et pour m'avoir permis de réaliser ce stage dans de si bonnes conditions. Je le remercie pour ses conseils, l'encadrement dont j'ai bénéficié et la confiance qu'il m'a accordée.*

*Je tiens à remercier Caroline LUCHESI pour ces conseils, sa disponibilité et son aide tout le long de mon stage.*

*Merci aux membres du jury, Mr. S. LARBI et Mr. M. BOUBEKEUR d'avoir pris le temps et le soin de lire ce rapport.*

*Merci aux enseignants du département de Génie Mécanique qui ont participé à ma formation tout au long de ces trois ans.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à la mémoire de mon*

*Père;*

*A ma Mère, sans qui rien de cela n'aurait été*

*possible ;*

*A mon frère Lyes et à ma petite sœur Fatima ;*

*A ma famille et à tous mes amis.*

*Brahim Mehdi.*

# Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités.....</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction .....	5
1.2. La combustion .....	6
1.2.1. Définition .....	6
1.2.2. Triangle du feu .....	6
1.2.3. Différentes formes de combustion .....	7
1.3. Processus de combustion pour un feu de nappe .....	8
1.3.1. Combustibles liquides .....	8
1.3.1.1. Emission de vapeurs .....	9
1.3.1.2. Domaine d'inflammabilité .....	9
1.3.1.3. Energie d'inflammation.....	10
1.3.1.4. Condition d'inflammation du combustible liquide .....	11
1.3.2. Combustibles solides.....	11
1.4. La flamme .....	11
1.5. Transfert de chaleur.....	13
1.6. Puissance du foyer.....	14
1.7. Combustion du Tétra propylène hydrogéné (TPH).....	15
<b>Chapitre 2 : Etude des travaux antérieurs.....</b>	<b>16</b>
2.1. Transferts thermiques .....	17
2.2. Débit de perte de masse surfacique .....	20
2.2.1. Débit de perte de masse surfacique pour moyennes et grandes échelles .....	20
2.2.2. Etude du Débit de perte de masse surfacique pour les petites échelles.....	23
2.3. Profils de concentration, de vitesse et de température dans le panache .....	25
2.4. La hauteur de la flamme .....	30
2.5. Débit d'air entraîné par la flamme .....	32
<b>Chapitre 3 : Instrumentation .....</b>	<b>33</b>
3.1. Mesure de la température .....	34
3.1.1. Les thermocouples.....	34

3.1.1.1. Principe.....	34
3.1.1.2. Compensation logicielle (Software Compensation).....	36
3.1.1.3. Compensation matérielle (Hardware Compensation) .....	37
3.1.1.4. Composition d'un thermocouple .....	37
3.1.1.5. Différents types de thermocouples .....	38
3.1.1.6. Détermination de la température par un thermocouple .....	39
3.1.1.7. Les facteurs influençant la mesure .....	39
3.1.2. La thermographie infrarouge.....	40
3.1.2.1. Principe.....	40
3.1.2.2. Rayonnement thermique .....	40
3.1.2.3. Système de thermographie .....	41
3.1.2.4. Caméra thermique .....	41
3.1.2.5. L'étalonnage de la camera thermique .....	42
3.1.2.6. Courbe d'étalonnage .....	42
3.1.2.7. Fonctionnement d'un Bolomètre.....	44
3.1.2.8. Camera thermique utilisée pour nos essais .....	45
3.1.2.9. Logiciel de la caméra thermique .....	46
3.1.2.10. Facteurs d'influence .....	47
3.2. Mesure de vitesses par LDV (Laser Doppler Velocimetry).....	47
3.2.1. Principe de la Vélocimétrie Laser Doppler .....	47
3.2.2. Le volume de mesure .....	49
3.2.3. Détermination du sens de la vitesse .....	50
3.2.3. Les informations obtenues sur les vitesses.....	51
3.2.4. La sonde LDV utilisée pour notre étude .....	52
3.2.5. Les intérêts et les limites d'utilisation de la vélocimétrie laser.....	53
3.2.6. Facteurs d'influence .....	54
<b>Chapitre 4 : Résultats de l'étude expérimentale .....</b>	<b>56</b>
4.1. Effet des diamètres du dac sur le régime de brulage (étude paramétrique) .....	57
4.1.1. Dispositif expérimentale .....	57
4.1.2. Campagne D'essai.....	59
4.1.3. Calcul du débit de perte de masse .....	59
4.1.4. Résultats et interprétations .....	60
4.2. Changement des conditions d'essais .....	68
4.2.1. Immersion du bac dans de l'eau .....	68

4.2.1.1. Description de l'essai .....	68
4.2.1.2. Résultats et interprétations .....	69
4.2.2. Changement du matériau constituant le bac .....	71
4.2.2.1. Description de l'essai .....	71
4.2.2.2. Résultats et interprétations .....	72
4.2.3. Isolation du bac en acier avec du sable .....	74
4.2.3.1. Description de l'essai .....	74
4.2.3.2. Résultats et interprétations .....	75
4.3. Mesure des températures par thermographie infrarouge sur la paroi extérieure du bac	77
4.3.1. Dispositif expérimentale .....	77
4.3.2. Campagne d'essais .....	78
4.3.3. Détermination de l'émissivité des deux matériaux .....	79
4.3.4. Résultats et interprétations .....	82
4.4. Distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache .....	85
4.4.1. Dispositif expérimentale .....	85
4.4.2. Campagne d'essais .....	86
4.4.3. Résultats et interprétations .....	87
4.5. Conclusion.....	89
<b>Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>91</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>95</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>98</b>
Annexe A : procédé PUREX.....	99
Annexe B : Caractéristiques du combustible .....	99
Annexe C : Condition et résultats de l'étude d'A.Nakakuki [5] .....	100
Annexe D : Paramètres permettant d'estimer le débit masse surfacique de combustion (données de Babrauskas [9]) .....	102
Annexe E : Détermination de la température mesurée par un thermocouple.....	103
Annexe F : Exemple d'un fichier de statistiques (édité par le logiciel Laservec) d'une mesure LDV .....	105
Annexe G : Photographies des montages expérimentaux .....	106
Annexe H : Compléments des Résultats d'essais de l'étude paramétrique.....	109
Annexe I : Choix des points de mesure sur le logiciel ThermaCAM Researcher .....	110

# Liste des figures

Fig. 1.1 : schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue.....	6
Fig. 1.2 : triangle du feu.....	7
Fig. 1.3 : différentes formes de combustion. ....	8
Fig. 1.4 : domaine d'inflammabilité (représentation schématique) [1]. ....	10
Fig. 1.5 : représentation schématique de la flamme.....	12
Fig. 1.6 : mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme.....	13
Fig. 2.1 : conservation de l'énergie à la surface d'évaporation [4].....	17
Fig. 2.2 : schémas du modèle théorique de transfert de chaleur proposé par A. Nakakuki [5].....	19
Fig. 2.3 : evolution de la vitesse de combustion en fonction du diamètre pour différents produits [7].....	21
Fig. 2.4 : schéma descriptif du bac de combustible utilisé. ....	24
Fig. 2.5 : photographie de flamme pour l'essai D70_H3 lors des deux régimes, à t = 150 s (a) et à t =270 s (b) [11].....	25
Fig. 2.6 : évolutions temporelles de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour l'essai D90_H5[11].....	25
Fig. 2.7 : profil de température et de vitesse au centre du panache selon les observations de McCafrey 1979, Cox et Chitty 1980, Heskestad 1981, Kung et Stavrianidis 1983, Gengembre et al. 1984 [13]. ....	27
Fig. 2.8 : modèle simplifié de panache de fumée. ....	29
Fig. 3.1: schéma d'un thermocouple.....	35
Fig. 3.2 : soudure froide.....	35
Fig. 3.3 : compensation logicielle. ....	36
Fig. 3.4: composition d'un thermocouple gainé. ....	37
Fig. 3.5 : spectre des rayonnements électromagnétiques [21]. ....	40
Fig. 3.6. système de mesure thermographie [21].....	41
Fig. 3.7 : situation d'étalonnage.....	42
Fig. 3.8 : courbe d'étalonnage.....	43
Fig. 3.9 : situation de mesure simplifiée [21].....	44
Fig. 3.10 : bolomètres composites [21].....	45



Fig. 3.11 : camera thermique [22].....	45
Fig. 3.12 :dispositif de la LDV [23].....	48
Fig. 3.13 : volume de mesure.....	49
Fig. 3.14 : dimensions du volume de mesure.....	50
Fig. 3.15 : flèche permettant d’orienter la vitesse mesurée. ....	51
Fig. 3.16 : système LDV de la sonde compacte.....	52
Fig. 4.1 : dispositif expérimental. ....	58
Fig. 4.2 : vue schématique du dispositif expérimental avec système d’acquisition. ....	58
Fig. 4.3 : schéma descriptif du bac de combustible utilisé. ....	59
Fig. 4.4. : perte de masse pour l’essai D40_H5.....	60
Fig. 4.5 : photographie de la flamme pour l’essai.....	61
Fig. 4.6 : évolution temporelle de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour l’essai D100_H5.....	61
Fig.4.7 : évolution temporelle de température sur l’axe central de la flamme et du panache pour l’essai D80_H5. ....	62
Fig. 4.8 : évolutions temporelles des températures sur l’axe central de la flamme et du panache pour l’essai D120_H5. ....	62
Fig. 4.9 : évolutions temporelles des températures à l’intérieur et aux bords des bacs D80 et D120.....	63
Fig. 4.10 : évolutions temporelles des températures aux niveaux des bacs de diamètres 80 et 120 mm. ....	65
Fig. 4.11 : évolution temporelle des débits de perte de masse du combustible pour les différents diamètres.....	65
Fig. 4.12 : évolution du débit de perte de masse surfacique suivant le diamètre.....	67
Fig. 4.13 : dispositif d’isolation du bac à feu par de l’eau.....	69
Fig. 4.14 : évolution temporelle de la température sur l’axe central de la flamme et du panache pour l’essai avec une isolation avec de l’eau. ....	70
Fig. 4.15 : évolution de la température d’eau. ....	70
Fig. 4.16 : évolution de la perte de masse et du débit de perte de masse pour l’essai avec de l’eau.....	71
Fig. 4.17 : évolution temporelle de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour le bac en Pyrex <sup>®</sup> .....	72
Fig. 4.18 : photographie de la flamme à t= 400 s pour le bac en Pyrex <sup>®</sup> . ....	72

Fig. 4.19 : l'évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache. ....	73
Fig. 4.20 : évolution temporelle de la température du bac de 89 mm de diamètre en Pyrex® et le bac en acier de 80 mm de diamètre.....	74
Fig. 4.21 : dispositif d'isolation du bac à feu par le sable. ....	75
Fig. 4.22 : évolution de la perte de masse et du débit de perte de masse pour le cas du sable.	76
Fig. 4.23 : évolution temporelle de la température aux bords des bacs d'acier de 80 mm de diamètre avec et sans sable. ....	76
Fig. 4.24 : vue schématique du dispositif expérimental.....	78
Fig. 4.25 : représentation schématique du point de mesure de la température sur la paroi extérieure.....	79
Fig. 4.26 : choix du point de mesure.....	80
Fig. 4.27 : menu de réglage du logiciel ThermoCAM Researcher. ....	81
Fig. 4.28 : détermination de l'émissivité du bac en acier. ....	81
Fig. 4.29 : schéma de repartitions des points de mesure. ....	82
Fig. 4.30 : images thermographique des deux bacs à t =180s.....	82
Fig. 4.31: images thermographique des deux bacs à t =400 s. ....	83
Fig. 4.32 : évolution des températures pour les différentes hauteurs sur la paroi du bac en acier.....	83
Fig. 4.33 : évolution des températures pour les différentes hauteurs sur la paroi du bac en Pyrex. ....	84
Fig. 4.34 : vue schématique du dispositif expérimental de la mesure par LDV. ....	85
Fig. 4.35 : profils des vitesses dans les panaches pour les essais D89_1 et D89_2 à $Z_{mes}=650$ mm. ....	87
Fig. 4.36 : profils des vitesses dans les panaches pour les essais D89_1 et D89_2 à $Z_{mes}=650$ mm. ....	88
Fig. 4.37 : tracé du profil de vitesse axiale dans le panache pour l'essai D80_2 à $Z_{mes}=650$ mm. ....	89
Fig. A.1 : schéma du procédé PUREX. ....	99
Tab. C.1 : résumé des cas simulés durant l'étude d'A. Nakakuki. ....	100
Fig. C.1 : distribution de température sur la paroi intérieur du bac pour le cas I-2 et I-3. ....	100
Fig. G.1 : photographie du montage expérimental de l'étude paramétrique. ....	106
Fig. G.2 : photographie du montage expérimental avec le bac en Pyrex.....	106
Fig. G.3 : photographie du montage isolé avec du sable. ....	107

Fig. G.4 : photographie du montage avec caméra thermique. ....	107
Fig. G.5 : photographie du montage pour la mesure de vitesses. ....	108
Fig. H.1 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D40_H5. ....	109
Fig. H.2 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D60_H5. ....	109
Fig. H.3 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D100_H5. ....	110
Fig. I.1 : choix des points de mesures sur le logiciel ThermaCAM Researcher. ....	110

# Liste des tableaux

Tab. 2.1 : récapitulatif des essais réalisés en atmosphère libre.....	24
Tab.3.1 : caractéristiques de la sonde LDV utilisée [25].....	53
Tab. 4.1 : données d'essais de l'étude paramétrique. ....	59
Tab. 4.2 : résultats d'essai de l'étude paramétrique.....	66
Tab. 4.3 : comparatifs des hauteurs. ....	67
Tab. 4.4 : données d'essais pour les mesures thermographiques.....	79
Tab. 4.5 : données d'essais pour les mesures LDV. ....	86
Tab. C.1 : résumé des cas simulés durant l'étude d'A. Nakakuki. ....	100
Tab. C.2 : résultats de calculs des flux de chaleurs sur les parois du bac. ....	101
Tab. D.1. paramètres permettant d'estimer le débit masse surfacique de combustion.....	102
Tab. E.1. table de référence pour un thermocouple de type K (jonction de référence 0°C)...	103
Tab. E.2 : coefficients pour les thermocouples de type K pour n=9.....	104

# Nomenclature

## Lettres Latines

$D$  : Diamètre de la source du feu [m]

$T$  : Température [K]

$m''$  : Débit de perte de masse surfacique [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$m_{\infty}''$  : Débit masse surfacique pour une nappe de taille infinie [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$\dot{m}$  : Débit de perte de masse [kg/s]

$C_p$  : Chaleur spécifique [J/kg.K]

$h_{fg}$  : Chaleur latente de vaporisation [J/kg]

$\Delta H_c$  : Chaleur de combustion par unité de masse [J/kg]

$\Delta H_v$  : Chaleur de vaporisation au point d'ébullition [J/kg]

$\dot{Q}$  : Puissance de l'incendie [W]

$Q$  : Flux de chaleur [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$Q_c$  : Puissance convective du feu [W]

$r$  : Coefficient stœchiométrique

$y$  : Fraction massique

$Fr$  : Le nombre de Froude

$v$  : Vitesse moyenne de combustion du liquide [m/s]

$C_{xp}$  : Concentration en fumée dans le panache [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$S$  : Facteurs de dissymétrie

$F$  : Facteurs d'aplatissement

$g$  : Accélération gravitationnelle [= 9,81 m/s<sup>2</sup>]

$f_d$  : Fréquence de défilement des franges [Hz]

$A$  : Aire d'une surface [ $\text{m}^2$ ]

$h$  : Coefficient de convection [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$H, h$  : Hauteurs [m]

$V$  : Tension électrique [V]

$I$  : Courant électrique [A]

$I_t$  : Intensité turbulente

$Z_v$  : Hauteur virtuelle de la source [m]

## **Lettres Grecques**

$\alpha$  : Coefficient de Seebeck

$\rho$  : Masse volumique [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\Phi$  : Pouvoir émissif [ $\text{w/m}^2$ ]

$\sigma$  : 1/e de la largeur du profil de vitesse

$\lambda$  : Conductivité thermique [ $\text{W/m.K}$ ], ou bien Coefficient de la distribution Gaussienne

$\nu$  : Fréquence détectée [Hz]

## **Indices**

cd : Conduction (flux conductif)

cv : Convection (flux convectif)

rad : Radiatif

ref : Réflexion ou bien Référence

rr : Reradié

evap : Evaporation

sens : Sensible

f : Flamme

a : Fluide ambiant (l'air ou bien l'eau autour du bac)

l : Surface du carburant, carburant

s : Surfaces latérales du bac

t : Bord supérieur du bac

g : Gaz

c : Combustible

0 : Centre du panache

## **Abréviations**

HZLB : limite inférieure de la zone chaude

LDV : Laser Doppler Velocimetry

L.I.I : Limite Inférieure d'Inflammabilité

L.S.I : Limite Supérieure d'Inflammabilité

TPH : Tétra Propylène Hydrogéné

---

---

# **Introduction générale**

---

---

# *Introduction*

On dénombre en moyenne dans les installations nucléaires une déclaration de feu chaque deux ans. Dans la très grande majorité des cas, le feu est rapidement détecté et maîtrisé. Mais lorsqu'il n'en est pas ainsi, il peut causer d'importants dégâts dans les installations. On se rappelle à cet égard de l'incendie, du 19 octobre 1989 d'un groupe turbo-alternateur dans la centrale nucléaire de Vandellos en Espagne et de l'incendie dans le silo d'entreposage de l'établissement Cogema de La Hague, le 6 janvier 1981 qui a duré une journée.

Un incendie dans une installation nucléaire peut conduire à une dégradation du niveau de sûreté de l'installation, et menacer le confinement des matières radioactives. Ceci peut conduire à une catastrophe écologique comme il peut causer un dysfonctionnement des équipements de contrôle et serait fatal.

Les centres de traitement des déchets radioactifs disposent de stocks importants de Tétra Propylène Hydrogéné (TPH) qui est utilisé comme solvant dans le procédé de traitement des déchets PUREX (Plutonium and Uranium Recovery by Extraction) pour le tributyl-phosphate (TBP) où le plutonium et l'uranium sont séparés l'un de l'autre par réduction du plutonium. Une représentation schématique du procédé est disponible en annexe A.

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) mène des recherches sur la propagation des fumées lors d'un incendie dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement. Dans ce contexte, une approche expérimentale à échelle réduite sur des maquettes a été initiée en collaboration avec l'Institut de Mécanique de Marseille (IM2). Une des premières étapes de cette approche consiste à caractériser un feu de nappe



de petite dimension pouvant être utilisé ensuite pour simuler sur maquette un foyer d'incendie réel.

Pour atteindre l'objectif fixé, une première étude expérimentale est menée sur la loi de comportement du débit de perte de masse pour des feux de nappe de petite taille. Dans cette étude et pour l'ensemble des essais, deux régimes différents sont identifiés lors du brûlage : un premier régime caractérisé par une phase stationnaire puis un second régime instationnaire dans lequel le débit de perte de masse peut augmenter de façon significative jusqu'à l'extinction.

Dans le cadre de l'utilisation de ces feux de bac de petite taille sur les dispositifs expérimentaux à échelle réduite (maquette), les perspectives sont d'adapter le montage expérimental afin d'augmenter la durée de la période stationnaire et d'éliminer, si possible, le changement de régime brutal.

Le but de notre étude est en premier lieu de confirmer l'existence des deux régimes. Nous avons pour cela entrepris une étude paramétrique sur les diamètres où l'on a pu observer l'influence de ce dernier. Nous avons ensuite modifié les conditions d'essais pour tenter d'éliminer le deuxième régime et comprendre les causes d'apparition de ce dernier. Nous avons enfin entrepris une étude préliminaire sur les panaches.

Le travail réalisé est structuré de manière à comporter cinq chapitres repartis comme suit :

Le premier chapitre traite des généralités sur les feux de nappes, dans lequel des notions et des définitions qui se rapportent au domaine sont présentées.

Le second chapitre concerne les études antérieures. Le chapitre qui suit est dédié à l'instrumentation utilisée et à description des différents phénomènes physique mis en jeu pour la prise des mesures, de la température et de la vitesse.

La partie expérimentale qui regroupe l'ensemble des procédures, la description des dispositifs expérimentaux et les résultats figure au quatrième chapitre. Enfin le cinquième chapitre est une conclusion générale accompagnée de quelques perspectives.

---

---

# **Chapitre 1 : Généralités**

---

---

**1.1. Introduction**

**1.2. La combustion**

**1.3. Processus de combustion pour un feu de nappe**

**1.4. La flamme**

**1.5. Transfert de chaleur**

**1.6 Puissance du foyer**

### 1.1. Introduction

Le terme « feu de nappe », ou « feu de flaque », décrit un incendie résultant de la combustion d'une nappe de combustible liquide. Ce phénomène implique principalement la surface de la nappe en contact avec l'air.

Les dimensions et la géométrie de la nappe peuvent être tout à fait variables. Il convient ainsi de distinguer :

- les feux de réservoir ou bien les feux de bac : le feu est alors contenu dans une enceinte dont la surface est déterminée par les dimensions du réservoir ;
- les feux de cuvette (de rétention) : l'extension de la nappe peut alors être limitée par une cuvette de rétention dont le dimensionnement est imposé, notamment par les exigences réglementaires applicables au stockage ;
- les feux de flaque libre : en l'absence de moyens physiques prévus pour limiter l'extension de la nappe ou lorsque la cuvette de rétention n'est pas complètement envahie, l'extension de la nappe est alors principalement fonction des caractéristiques du terrain, des conditions météorologiques et des conditions de rejet du combustible.

La formation d'une nappe au sol peut être observée suite à l'épandage d'une substance liquide ou à la fusion de corps solides susceptibles de se liquéfier sous l'effet de la chaleur (exemple : certains plastiques, bitumes..).

D'une manière générale, le phénomène de combustion d'un produit intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé. Pour qu'un produit brûle, il faut donc qu'il émette des vapeurs inflammables. Pour les combustibles liquides, les vapeurs inflammables sont émises par évaporation de la phase liquide. Pour les combustibles solides, un processus plus complexe mettant en jeu notamment des réactions de décomposition, fusion ou pyrolyse est indispensable à l'émission de gaz ou distillats inflammables. La combustion a ainsi lieu en phase gazeuse dans la zone qualifiée de « flamme ». Une partie de l'énergie libérée par l'exothermicité de la réaction de combustion est cédée (rétrocession d'énergie) au combustible, entretenant ainsi l'émission de gaz inflammables. Le feu de nappe est donc un phénomène de combustion auto-entretenu. Ce mécanisme est représenté de manière très schématique dans la figure 1.1.

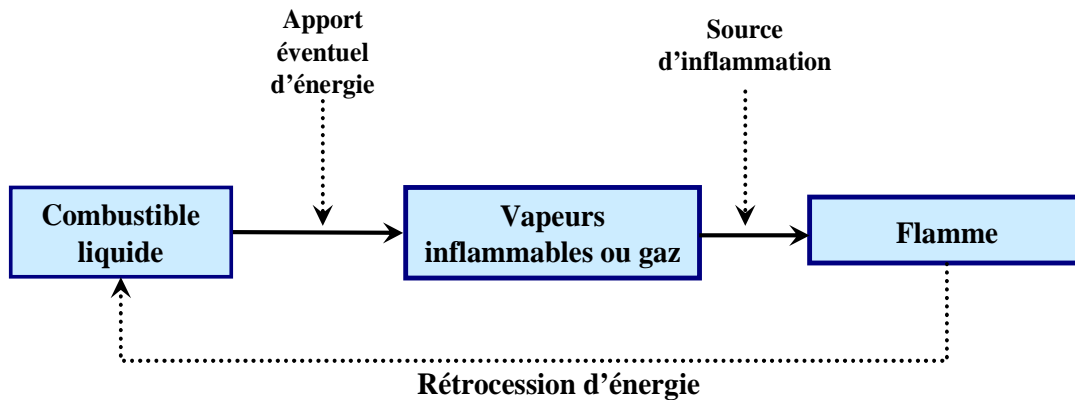


Fig. 1.1 : schéma du mécanisme de combustion auto-entretenue.

## 1.2. La combustion

### 1.2.1. Définition

La combustion est une réaction physico-chimique exothermique entre un comburant et un combustible, déclenchée par une énergie d'activation :

- le comburant (oxygène de l'air dans un incendie) joue le rôle d'oxydant,
- le combustible joue le rôle de réducteur.

La combustion est ainsi une réaction d'oxydo-réduction. Elle est notamment entretenue par la formation de radicaux libres, atomes ou groupes d'atomes électriquement neutres très instables donc très réactifs. Ces derniers participent fortement au développement des réactions de combustion et à la propagation des flammes [1].

### 1.2.2. Triangle du feu

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments: un combustible, un comburant, une énergie d'activation en proportion suffisante. On représente de façon symbolique cette association par le triangle du feu.

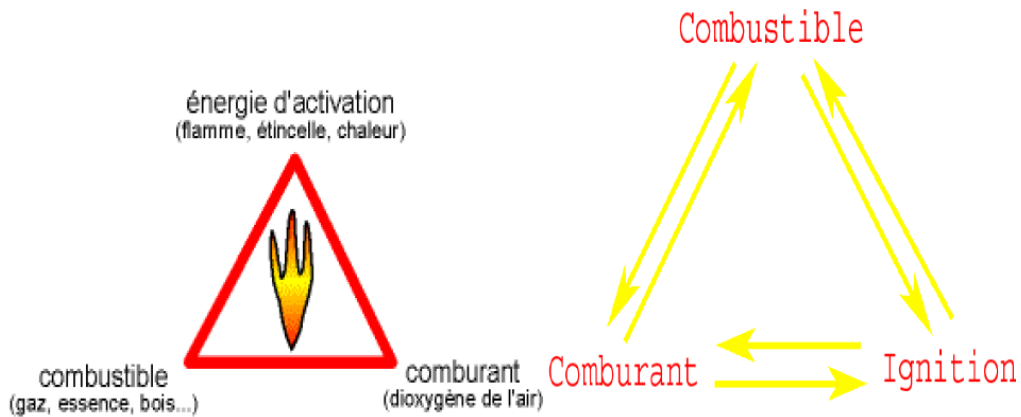


Fig. 1.2 : triangle du feu.

### 1.2.3. Différentes formes de combustion

Les différentes formes de combustion se caractérisent notamment par leur cinétique chimique :

- la combustion lente : elle se distingue par une absence de flamme et d'incandescence ainsi que par la faible exothermicité de la réaction. Cette combustion peut, sous couvert de modifications réactionnelles, se transformer en combustion vive et conduire à des feux de surface ;
- la combustion très vive et la combustion instantanée : ces types de combustions caractérisées par une vitesse de réaction très élevée ne relèvent pas a priori de l'étude des feux de nappe et ne seront donc pas abordés dans le présent document ;
- combustion vive : cette forme de combustion caractérise les feux de surface. Le feu de nappe est en effet une combustion vive, généralement accompagnée de l'émission de lumière et de chaleur. La vitesse d'émission de calories est relativement élevée ce qui entraîne une forte exothermicité de la réaction.

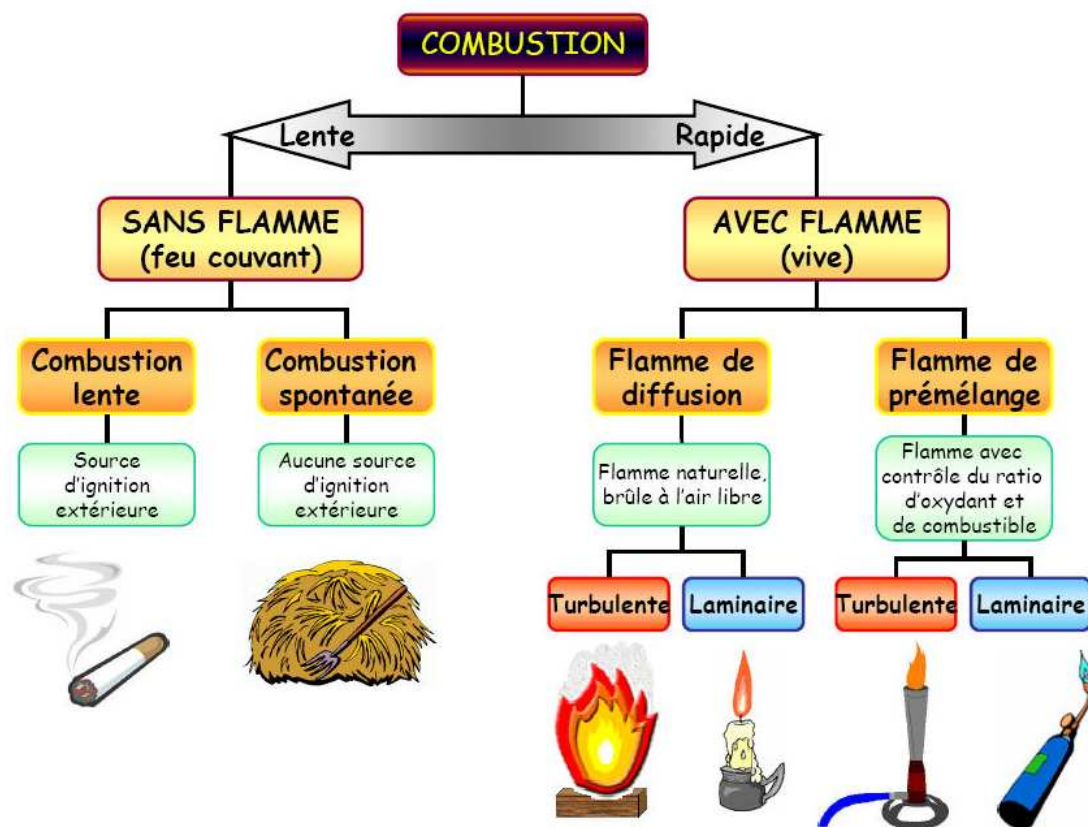


Fig. 1.3 : différentes formes de combustion.

### 1.3. Processus de combustion pour un feu de nappe

#### 1.3.1. Combustibles liquides

La combustion des produits liquides (par exemple les hydrocarbures liquides) intéresse les vapeurs émises par le produit réchauffé et non le liquide lui-même. De manière schématique, le combustible émet une certaine quantité de vapeurs à une température donnée. Cette émission de vapeurs conduit à la formation d'une zone riche en combustible au dessus de la nappe. Au fur et à mesure de son élévation, le combustible entraîne de l'air froid extérieur. Lorsque le mélange air-combustible se trouve dans le domaine d'inflammabilité et en présence d'une source d'inflammation, il s'enflamme. Les gaz brûlés sont ensuite évacués vers le haut tout en continuant à entraîner l'air ambiant.

L'essentiel de l'air entraîné (environ 90%) depuis la base de la flamme jusqu'à son sommet dilue les produits de la combustion tout en les refroidissant [2].

### 1.3.1.1. Emission de vapeurs

La propension d'un liquide à émettre des vapeurs inflammables peut être reliée à la valeur du point d'éclair de la substance incriminée, défini comme étant la température minimale à laquelle doit être porté un matériau, un produit pour que les vapeurs émises s'allument momentanément en présence d'une flamme, dans des conditions spécifiées [1].

Ainsi, certains liquides émettent suffisamment de vapeurs (par évaporation ou ébullition) à la température ambiante (cas de l'essence), d'autres (gasoil, fuel domestique) doivent être modérément réchauffés ; enfin pour ce qui concerne les combustibles plus lourds, l'élévation de température doit généralement être importante.

Il est également d'usage de parler de la volatilité des substances en vue de caractériser leur propriété à émettre des vapeurs à une température donnée. Parallèlement, la quantité de vapeurs émises par un liquide est notamment fonction de l'élévation de la température à laquelle il est soumis.

### 1.3.1.2. Domaine d'inflammabilité

L'inflammation du mélange gazeux composé des vapeurs de combustibles et de l'air est fonction de la concentration de vapeurs de combustibles dans l'air. Chaque produit possède ainsi un domaine d'inflammabilité spécifique, représenté de manière schématique dans la figure 1.4. Ce domaine est délimité par :

- la Limite Inférieure d'Inflammabilité (L.I.I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. En-dessous de cette limite, le mélange est trop pauvre en combustible (ou trop riche en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- la Limite Supérieure d'Inflammabilité (L.S.I) s'exprimant en % de gaz en volume dans l'air. Au-dessus de cette limite, le mélange est trop riche en combustible (ou trop pauvre en oxygène) pour que la flamme puisse se propager dans le milieu gazeux ;
- la courbe de condensation dans la partie gauche.



- la courbe d'auto-inflammation, qui correspond à une inflammation «spontanée» du mélange.

Il convient de signaler que les valeurs des L.I.I et L.S.I sont déterminées pour chaque produit de manière expérimentale. Il est ainsi souvent difficile de comparer les domaines d'inflammabilité de deux substances, ces derniers ayant pu être établis dans des conditions d'essais différentes. Les limites d'inflammabilité d'un produit sont entre autres fonction de la température et de la pression.

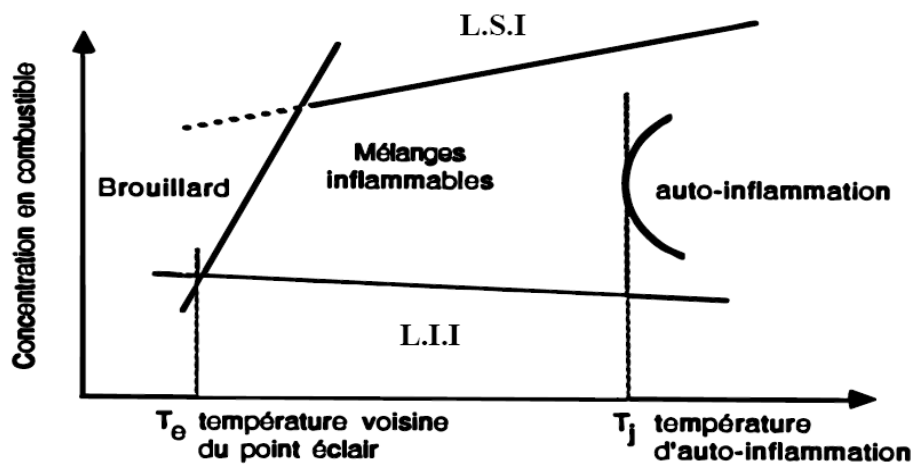


Fig. 1.4 : domaine d'inflammabilité (représentation schématique) [1].

### 1.3.1.3. Energie d'inflammation

Lorsque le mélange inflammable formé ne se trouve pas à sa température d'auto-inflammation, il est nécessaire de lui fournir une petite quantité d'énergie pour déclencher l'inflammation. Cette énergie, appelée énergie d'inflammation, peut être d'origine diverse (étincelles, flamme, foudre...) et varie selon les propriétés de la substance inflammable considérée.

L'énergie d'inflammation d'une substance dépend en outre de la concentration en gaz, vapeurs du mélange inflammable. Elle présente ainsi un minimum, l'énergie minimale d'inflammation, pour le mélange le plus susceptible de s'enflammer. L'énergie minimale d'inflammation correspond sensiblement à un mélange à la stœchiométrie.

#### 1.3.1.4. Condition d'inflammation du combustible liquide

Pour qu'il y ait inflammation d'un liquide combustible, il faut que les trois facteurs suivants soient réunis :

- une température  $T$  supérieure au point d'éclair, afin de disposer d'une quantité suffisante de vapeurs inflammables ;
- un mélange air-vapeurs dont la concentration se situe dans les limites d'inflammabilité ;
- une énergie d'inflammation suffisante.

Ces trois conditions s'appliquent d'ailleurs aussi bien :

- aux gaz, distillats dégagés par les combustibles solides et provenant de réactions de distillation ou pyrolyse,
- aux vapeurs dégagées par les combustibles liquides et provenant du phénomène d'évaporation.

#### 1.3.2. Combustibles solides

Pour un combustible solide, le processus d'inflammation suit globalement le même schéma que celui présenté pour les combustibles liquides. L'émission de vapeurs ou gaz inflammables reste toutefois plus complexe puisqu'elle met généralement en jeu des réactions de distillation, de pyrolyse, de fusion et éventuellement de sublimation.

#### 1.4. La flamme

La flamme est définie comme la zone où a lieu la combustion en phase gazeuse. La flamme peut ainsi être assimilée à un volume de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  ...), de combustible non brûlé et de suies résultants d'une combustion incomplète. Elle correspond sensiblement à la partie lumineuse de la zone de combustion.

Une flamme est composée essentiellement de trois parties :

- en partie basse, une zone dite « persistante » de géométrie quasi constante dans le temps et l'espace. Cette zone se distingue par des températures particulièrement élevées et en conséquence, un pouvoir émissif important ;

- dans le reste de la partie lumineuse, une zone qualifiée « d'intermittente » pour laquelle la position et la géométrie de la flamme varient fortement au cours du temps. Les températures associées sont sensiblement inférieures aux températures de la zone persistante ;

- en partie haute, la zone des fumées constituées des produits issus de la combustion.

Par ailleurs, les flammes peuvent être caractérisées par la façon dont se mélangent le combustible et le comburant (avec mélange préalable ou non de l'air et du gaz de combustion) et par le régime d'écoulement gazeux. Les quatre familles qui en découlent sont :

- les flammes de diffusion en régime laminaire,
- les flammes de diffusion en régime turbulent,
- les flammes de prémélange en régime laminaire,
- les flammes de prémélange en régime turbulent.

Dans le cas des feux de nappe de taille industrielle, il s'agit de flammes de diffusion en régime turbulent.

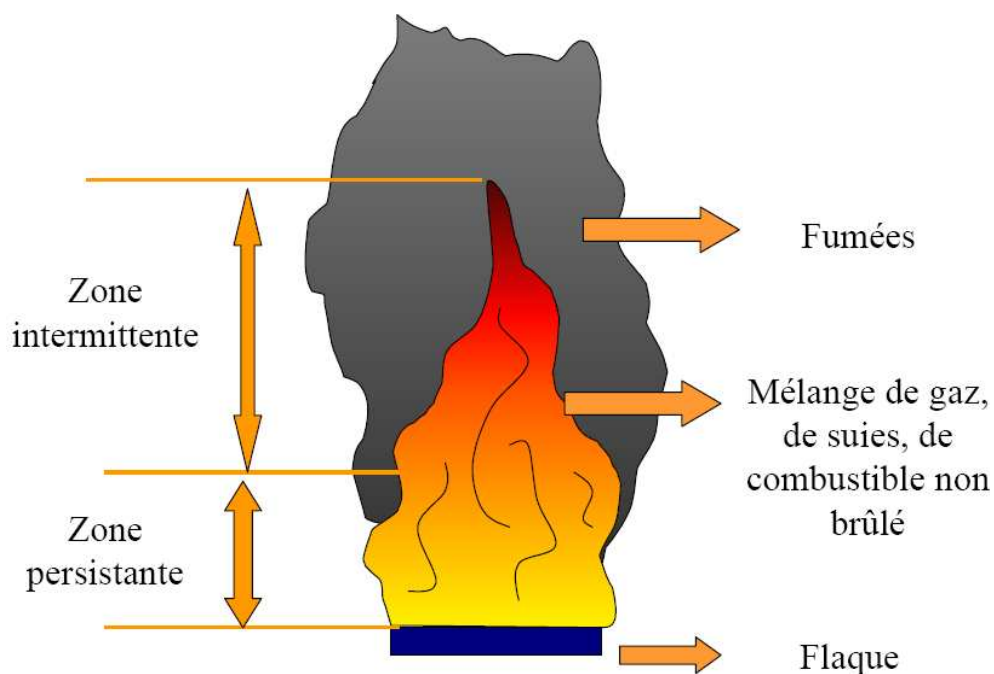


Fig. 1.5 : représentation schématique de la flamme.

### 1.5. Transfert de chaleur

Lorsque les réactions de combustion sont déclenchées, d'importantes quantités de chaleur sont libérées. Ceci est traduit par la notion de potentiel calorifique associé à un combustible, pondérée par le rendement de combustion qui définit le rapport entre la quantité de chaleur disponible théoriquement dans l'incendie et celle effectivement libérée.

La quantité d'énergie ainsi émise sous forme de chaleur est notamment transférée :

- vers l'environnement extérieur de la flamme pouvant ainsi entraîner une propagation de l'incendie,
- vers la nappe de combustible au sol. Cette rétro-cession d'énergie entretient l'émission de vapeurs inflammables.

Trois mécanismes fondamentaux du transfert de chaleur à partir de la flamme coexistent :

- la convection,
- la conduction,
- le rayonnement.

Ces différents mécanismes de transfert de la chaleur sont représentés de manière schématique dans la figure 1.6.

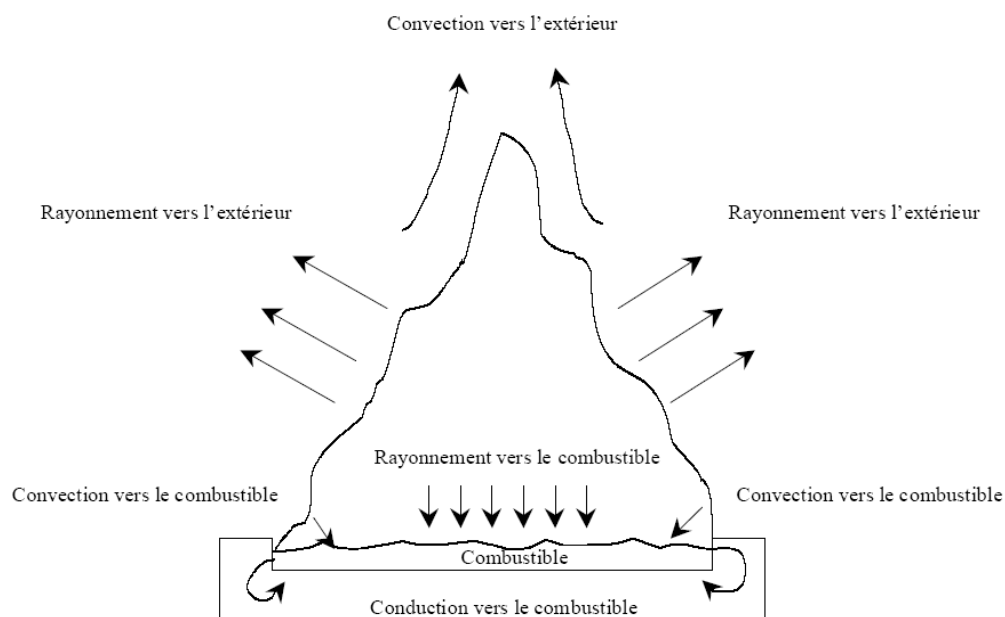


Fig. 1.6 : mécanismes de transfert de la chaleur dans la flamme.

Le dernier mode de transfert est le plus complexe, puisque il se produit par l'émission d'ondes électromagnétiques, (Longueur d'onde variant entre 0.1µm et 100 µm). La flamme est considérée comme un corps noir, c'est-à-dire qu'il absorbe toutes les radiations quelques soient leurs directions et leurs longueurs d'ondes. La composition des gaz formant le front de flamme contribuent à son émittance.

Le pouvoir émissif de la flamme s'écrit d'après la loi de Stéphane Boltzmann :

$$\Phi_0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_a^4) \quad [W / m^2] \quad (1.1)$$

Avec  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  désignent respectivement : constante de Stéphane Boltzmann, émissivité.

Pour les combustibles générant beaucoup de suies, l'émissivité tend vers l'unité, si les diamètres des bacs dépassent quelques mètres [1].

Dans le cas où le combustible considéré produit beaucoup de suies, qui forment un écran autour de la flamme, le pouvoir émissif s'écrit d'après Mudan et Croce [1]:

$$\Phi_0 = \Phi_{\max} \cdot e^{-S \cdot D} + \Phi_{\text{fumées}} \cdot (1 - e^{-S \cdot D}) \quad (1.2)$$

Avec  $\Phi_{\text{fumées}}$ ,  $\Phi_{\max}$ ,  $S$  désignent respectivement : pouvoir émissif des fumées, pouvoir émissif maximum des parties lumineuses de la flamme, coefficient expérimental pris égal à 0.12 m

### 1.6. Puissance du foyer

Physiquement la puissance de l'incendie doit traduire le dégagement de la chaleur au niveau de la source par unité de temps, conséquence d'une où plusieurs réactions chimiques successives. Elle s'exprime en fonction du débit de perte de masse (taux réactionnel) par l'équation :

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot PCI \quad [KW] \quad (1.3)$$

Avec  $\dot{m}$  : débit de perte de masse [kg/s].

$PCI$  : pouvoir calorifique inférieur [kJ/kg] .

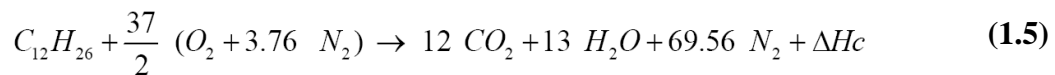
La puissance convectée par le feu produit par la combustion peut donc s'écrire, en prenant en compte la fraction de l'énergie rayonnée :

$$Q_c = \dot{m} \cdot PCI \cdot (1 - \chi_r) \quad (1.4)$$

Avec  $\chi_r$  : est la fraction rayonnée (qui est estimée en générale à 30%). Elle prend en compte l'effet d'écran que les fumées peuvent former. Cette fraction diminue avec les combustibles générant beaucoup de suies comme il a été constaté par Koseki [1] sur ses travaux pour différents bacs et différents combustibles.

### 1.7. Combustion du Tétrahydrofur (THF)

La réaction de combustion stœchiométrique s'écrit :



La combustion des alcanes donne souvent de l'eau et du gaz carbonique et une libération de chaleur. La chaleur de combustion vaut la somme des chaleurs de formations des réactifs et de produits. Elle est identique au pouvoir calorifique inférieur si on considère que la combustion est complète. Les propriétés du THF sont résumées en annexe B.

Le coefficient stœchiométrique oxygène/combustible « r » et les fractions massiques en combustion complète sont les suivantes :

$$r = \frac{\frac{37}{2} M_{O_2}}{M_{THF}} = 3,48$$

$$y_{CO_2} = \frac{4 M_{CO_2}}{M_{THF}} = 3,106$$

$$y_{H_2O} = \frac{4 M_{H_2O}}{M_{THF}} = 1,376$$

---

---

# **Chapitre 2 : Etude des travaux antérieurs**

---

---

**2.1. Transferts thermiques**

**2.2. Débit de perte de masse surfacique**

**2.3. Profils de concentration, de vitesse et de température dans le panache**

**2.4. Hauteur de la flamme**

**2.5. Débit d'air entraîné par la flamme**

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux récents travaux menés sur des feux de nappes qui traitent en particulier des transferts de chaleur et des différents paramètres qui caractérisent les feux de nappes tels que le débit de perte de masse, les modèles de panache et les hauteurs de flammes.

## 2.1. Transferts thermiques

Blinov et al. [3] ont étudié expérimentalement les feux de bacs et ont montré que le mode de brûlage du combustible dépend fortement du diamètre de bac utilisé. Deux principaux modes sont mis en évidence : pour des petits diamètres ( $D < 0,2$  m) le régime convectif prédomine alors que pour des bacs de plus grandes tailles, le régime radiatif est le plus important. Les bacs utilisés dans notre étude correspondent à un régime convectif.

Toujours d'après le même auteur, dans les feux de bac de petite échelle la chaleur rétrocedée de la flamme vers le carburant liquide est essentiellement conduite à travers les parois du bac pour être transmise par convection au carburant.

Kanury [4] a étudié la combustion des surfaces liquides. Il a négligé les effets radiatifs sur la surface du combustible liquide et a proposé le modèle qui se base sur le bilan d'énergie à l'interface d'évaporation schématisé sur la figure 2.1.

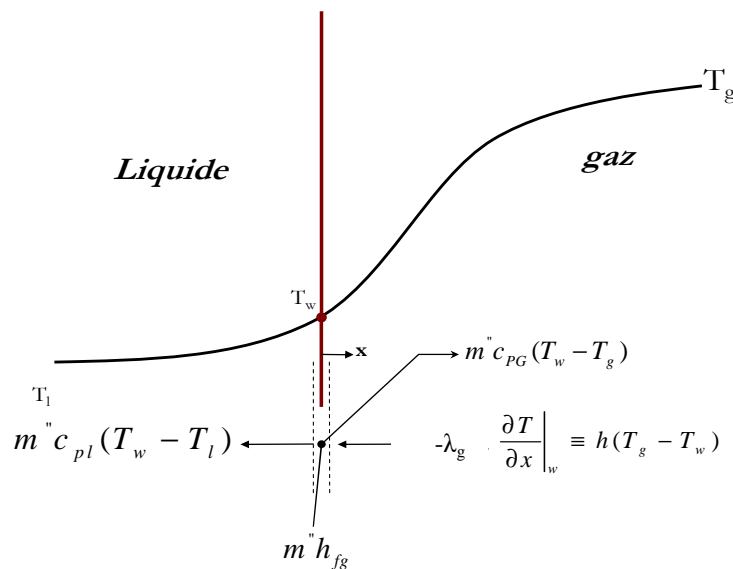


Fig. 2.1 : conservation de l'énergie à la surface d'évaporation [4].



La figure 2.1 schématise l'interface et les différents transferts d'énergies.

Le profil de température est obtenu avec la résolution des équations de conservation de l'énergie dans les deux phases.

Le bilan d'énergie à la surface d'évaporation s'écrit comme suit :

$$h(T_g - T_w) - \dot{m} C_{pg} (T_g - T_w) = \dot{m} (h_{fg} + C_{pl} (T_w - T_l)) \quad (2.1)$$

D'où l'on peut déduire le débit de perte de masse surfacique  $\dot{m}''$ .

A. Nakakuki [5], dans son étude théorique sur les transferts thermique dans les feux de bacs de moyenne échelle ( $D=0.559\text{m}$ ) qui est basé sur considération d'une couche isotherme chaude au dessous de la surface d'évaporation et d'une couche froide qui lui succède. Il propose le modèle de transferts thermiques schématisé sur la figure 2.2.

Il divise la partie du bac en contact avec le gaz en  $i$  anneaux, l'épaisseur du combustible liquide en deux zones qui sont respectivement une zone chaude située juste au-dessous de la surface d'évaporation et une zone froide située juste au-dessous de cette dernière. Son modèle est un modèle stationnaire, l'auteur suppose que l'épaisseur du combustible ne varie pas au cours du temps. Il simule plusieurs cas notamment en changeant les types de carburants, en faisant varier les différentes hauteurs et épaisseurs (épaisseur de la zone chaude, hauteur de la couche de gaz), en changeant l'épaisseur du bec et la nature du matériau constituant ce dernier et enfin en modifiant les conditions ambiantes notamment en refroidissant le bac à l'aide d'eau. Un résumé des différents cas simulé est disponible en annexe C.

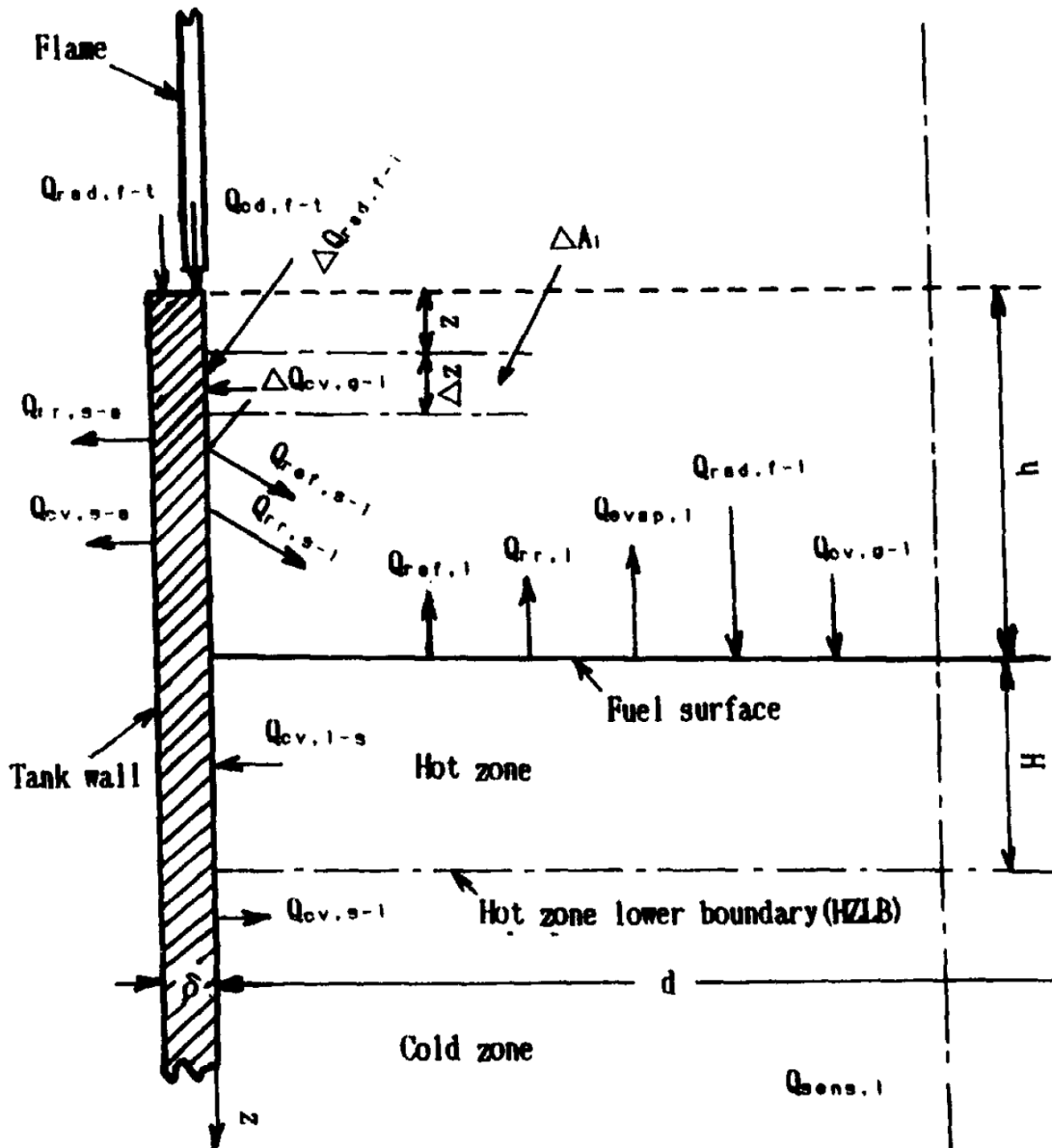


Fig. 2.2 : schémas du modèle théorique de transfert de chaleur proposé par A. Nakakuki [5].

Avec  $Q$ ,  $h$ ,  $H$ ,  $\delta$ ,  $d$ , désignent respectivement : flux de chaleur, épaisseur de la couche de gaz, épaisseur de la zone chaude, épaisseur du bac, diamètre intérieur du bac.

Il déduit du modèle deux équations en faisant un bilan sur le bac et sur la couche de carburant qui sont respectivement :

$$Q_{\text{rad},f-t} + Q_{\text{cd},f-t} + Q_{\text{rad},f-s} + Q_{\text{cv},g-s} + Q_{\text{cv},l-s} + Q_{\text{rr},l-s} + Q_{\text{ref},l-s} + Q_{\text{rr},a-s} + Q_{\text{cv},a-s} = 0 \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{rad},f-l} + Q_{\text{ref},l} + Q_{\text{cv},g-l} + Q_{\text{rr},s-l} + Q_{\text{ref},s-l} + Q_{\text{cv},s-l} + Q_{\text{sens},l} + Q_{\text{evap},l} + Q_{\text{rr},l} = 0 \quad (2.3)$$

A l'aide d'un programme (TRUMP3) utilisant la méthode des différences finies, il calcule la distribution des températures sur les parois extérieure et intérieure du bac pour les différents cas et il déduit les différents flux de chaleur. Des résultats sont disponibles en annexe C.

Il fait des conclusions intéressantes :

- La quantité de chaleur qui est échangée entre le carburant et le milieu ambiant à travers les parois du bac comparé à la quantité qui est directement cédée par la flamme vers le carburant est relativement importante.
- En utilisant de l'eau pour refroidir le bac, la quantité de chaleur qui est cédée par le carburant à travers les parois du bac est tellement importante qu'il en résulte la diminution de l'épaisseur de la zone chaude au profit de la zone froide.
- Les taux d'évolutions de l'épaisseur de la zone chaude, augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur du bac et de la conductivité thermique de celui-ci.

## 2.2. Débit de perte de masse surfacique

Le débit masse de combustion par unité de surface ou le débit de perte de masse surfacique,  $m''$ , représente la quantité de combustible participant à l'incendie par unité de temps et de surface de combustible. Le débit de perte de masse surfacique est un paramètre fondamental pour la caractérisation de la flamme dans un feu de nappe.

### 2.2.1. Débit de perte de masse surfacique pour moyennes et grandes échelles

Le débit de perte de masse est associé à la vitesse de combustion ou vitesse de régression linéaire de la nappe. Il est aussi défini comme la vitesse de diminution de l'épaisseur d'une nappe soumise à un feu.

Il est donné par :

$$m'' = \rho_c \times v \quad (2.4)$$

Le débit masse surfacique de combustion dépend naturellement des propriétés physicochimiques de la substance combustible, mais également du diamètre de la flaque et de l'alimentation du feu en oxygène.

Mudan [6] a montré que le débit masse surfacique de combustion tend vers une valeur constante pour des diamètres de feux importants. Ce constat est d'ailleurs corrélé par les travaux de Blinov et Kyudyakov [7], figure 2.3. Dans cette dernière en présente l'évolution de la vitesse de combustion en fonction du diamètre pour différents produits.

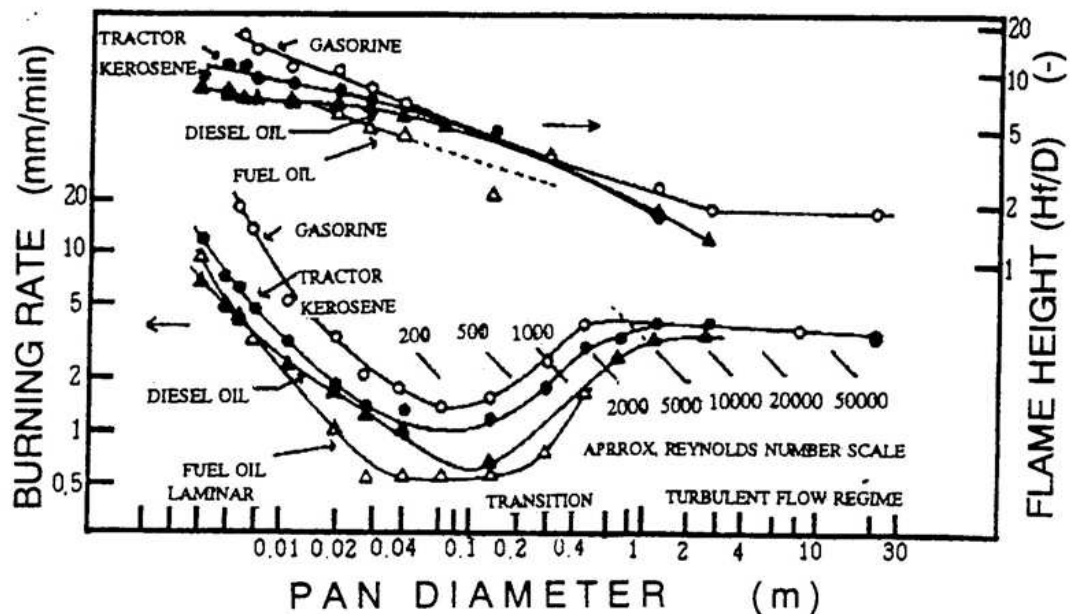


Fig. 2.3 : evolution de la vitesse de combustion en fonction du diamètre pour différents produits [7].

Afin d'estimer la valeur du débit masse surfacique de combustion, Babrauskas [8] propose la corrélation suivante :

$$m'' = m''_{\infty} \left( 1 - \exp^{-k \cdot \beta \cdot D} \right) \quad (2.5)$$

Avec  $m''_{\infty}$ ,  $k\beta$ ,  $D$ , désignent respectivement : débit masse surfacique pour une nappe de taille infinie ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ), coefficient d'extinction de la nappe ( $\text{m}^{-1}$ ), diamètre de la nappe (m).

Cette formule est cohérente avec les observations expérimentales citées ci-dessus dans la mesure où pour de grands diamètres, le débit masse surfacique de combustion tend vers une valeur fixe,  $m_{\infty}''$ .

Pour les alcools de faible masse moléculaire, Babrauskas propose d'utiliser la formule suivante :

$$m'' = m_{\infty}'' \quad \text{pour } D \geq 0,2 \text{ m} \quad (2.6)$$

Cette relation a été obtenue à partir de feux de petite taille (diamètre inférieure à 1 m). Les essais menés par le GESIP (groupe d'étude de sécurité des industries pétrolières) [9] tendent à montrer que, dans le cas de l'éthanol, l'approche de Babrauskas revient à sous-estimer fortement le débit masse surfacique de combustion. Les valeurs relevées lors de ces essais seraient de l'ordre de 60 g/m<sup>2</sup>s pour des feux de diamètre supérieur ou égal à 10 m.

En ce qui concerne les autres types de produits, la corrélation de Babrauskas donne un ordre de grandeur globalement correct pour le débit masse surfacique de combustion. Elle nécessite toutefois de connaître les valeurs de  $m_{\infty}''$  et  $(k\beta)$ , déterminées à partir d'essais sur des bacs de différents diamètres et de techniques mathématiques d'ajustement de courbes. Un tableau donnant les valeurs de  $m_{\infty}''$  et  $(k\beta)$  pour différentes substances est disponible en annexe D.

Il est clair que les valeurs de  $m_{\infty}''$  et  $(k\beta)$  ne sont pas toujours disponibles pour un produit donné. Cependant, conformément aux observations expérimentales relayées par la formule proposée par Babrauskas, il est raisonnable d'assimiler le débit masse surfacique de combustion au débit obtenu pour une nappe de taille infinie, pour des diamètres de nappe importants (supérieur à une vingtaine de mètres).

Ce dernier, noté  $m_{\infty}''$ , peut être estimé grâce à la corrélation proposée par Burgess et al [10] :

$$m_{\infty}'' = 10^{-3} \cdot \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v^*} \quad (2.7)$$

$$\Delta H_v^* = \Delta H_v + \int_{T_a}^{T_b} C_p dt \quad (2.8)$$

Avec  $T_b$ ,  $T_a$  désignent respectivement : température d'ébullition ( $^{\circ}\text{K}$ ), température ambiante ( $^{\circ}\text{K}$ ).

L'application de cette formule n'est pas toujours chose aisée compte tenu des paramètres d'entrée qu'elle nécessite. Par exemple, dans le cas de produits solides, la détermination du paramètre  $\Delta H_v^*$  peut s'avérer difficile, si ce n'est à l'aide des moyens expérimentaux particuliers.

**Remarque :** l'ensemble des études que l'on vient de voir ci-dessus ont été réalisées pour des feux de nappes d'échelles moyennes ( $D > 0.2\text{m}$ , où le régime de brulage est radiatif [3]) ou bien pour de grandes échelles (où l'on a un débit de perte de masse surfacique quasi constant) pour être directement appliquer sur le terrain, notamment à la protection anti incendie à l'échelle industrielle.

### 2.2.2. Etude du Débit de perte de masse surfacique pour les petites échelles

Pour les feux de nappes de petites dimensions (échelle du laboratoire) les travaux publiés sont très rares.

Pour étudier le comportement de ce type de feu, une étude préliminaire sur des feux de bacs de Tétra Propylène Hydrogéné (TPH) de petite taille a été entreprise à l'IM2 (Institut de mécanique de Marseille). Des mesures de perte de masse du combustible ont été réalisées pour différents diamètres de bacs et différentes hauteurs de combustible. Les expériences faites dans cette étude sont réalisées en atmosphère libre avec cinq bacs de diamètres différents ( $D = 30, 50, 70, 90, 110 \text{ mm}$ ) mais de même hauteur ( $H_b = 20 \text{ mm}$ ). Ces bacs sont fabriqués en acier ( $\rho_b = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\lambda_b = 50 \text{ W.m}^{-1}$ ), et sont constitués d'une collerette circulaire ( $e = 2 \text{ mm}$ ) soudée sur un disque ( $e = 2 \text{ mm}$ ) [11], figure 2.4.

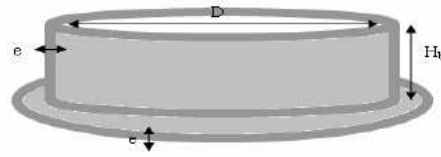


Fig. 2.4 : schéma descriptif du bac de combustible utilisé.

Différentes séries de tests sont réalisées. La première série est réalisée en faisant varier le diamètre du bac et en conservant la hauteur initiale de combustible ( $H_c = 5$  mm). Deux autres séries sont réalisées en faisant varier la hauteur initiale de combustible et en conservant un diamètre de bac, tableau 2.1.

Essais	D	Hauteur initiale de combustible $H_c$	Masse Initiale de combustible
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>g</i>
D30_H5	30	5	3,1
D50_H5	50	5	8,5
D70_H5	70	5	16,7
D90_H5	90	5	27,7
D110_H5	110	5	41,3
D70_H3	70	3	10
D70_H6	70	6	20,1
D70_H9	70	9	30,1
D70_H12	70	12	40,2
D70_H15	70	15	50,2
D50_H3	50	3	5,1
D50_H6	50	6	10,2
D50_H9	50	9	15,4
D50_H12	50	12	20,5
D50_H15	50	15	25,6

Tab. 2.1 : récapitulatif des essais réalisés en atmosphère libre.

Pour l'ensemble des essais, deux régimes différents ont pu être identifiés visuellement et quantitativement. A titre d'exemples, des résultats obtenus pour les essais D70\_H3 et D90\_H5 sont présentés en figure 2.5 et figure 2.6 [9]. Après allumage, une phase de mise en régime de courte durée est d'abord observée correspondant à une augmentation progressive du flux rayonné par la flamme vers la nappe. Une phase quasi-stationnaire (q-s) apparaît ensuite au cours de laquelle le débit de perte de masse est quasi-constant. Lors de cette première étape (Régime 1, figure 2.6), la flamme reste de petite taille (figure 2.5 (a)). Une seconde phase, instationnaire, est ensuite visualisée : la flamme s'étire, sa hauteur augmente ainsi

que le débit de perte de masse du combustible jusqu'à l'extinction du feu (figure 2.5 (b) et Régime 2, figure 2.6). Lors du régime 2, la formation d'un volume significatif de gaz entre la surface liquide et la base de la flamme a pu être observée : la flamme se situe au-dessus du bac puis tend à s'accrocher aux bords de celui-ci, contrairement à son comportement lors du régime 1 où elle reste à l'intérieur du bac.

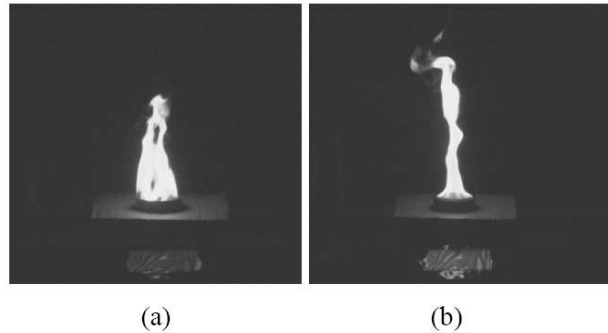


Fig. 2.5 : photographie de flamme pour l'essai D70\_H3 lors des deux régimes, à  $t = 150$  s (a) et à  $t = 270$  s (b) [11].

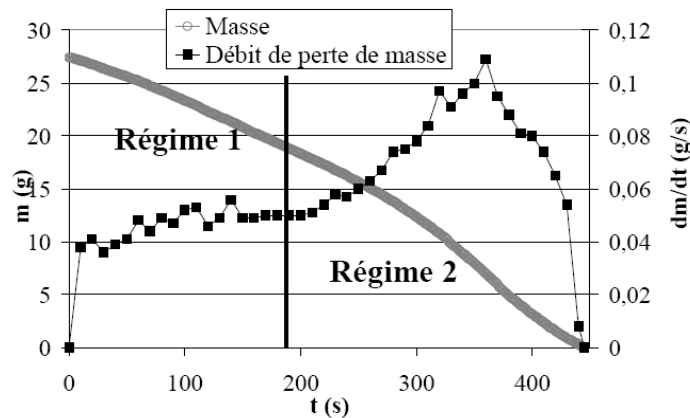


Fig. 2.6 : évolutions temporelles de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour l'essai D90\_H5[11].

### 2.3. Profils de concentration, de vitesse et de température dans le panache

Les connaissances sur le comportement des panaches de fumée d'incendie sont essentiellement basées sur des observations et de l'analyse dimensionnelle complétée par quelques modèles analytiques.

Dans la majorité des feux, les flammes sont turbulentes et leur panache également. Pour se donner un ordre d'idée, citons l'exemple d'une bougie ordinaire :



elle possède une flamme laminaire et un panache de fumée laminaire jusqu'à une hauteur de 200 ou 300mm, où la transition au régime turbulent se produit.

Des expériences de feu de petits bacs d'heptane avec substrat d'eau ont montré que l'extrémité de la flamme présentait une turbulence pour un diamètre de bac atteignant approximativement 30mm pour une puissance de 300W et une hauteur de flamme de 120mm.

Heskestad en 1986 a mis en évidence, que pour qu'un panache soit considéré d'une turbulence pleinement développée, un diamètre de feu minimum de 300mm est nécessaire (pour une puissance d'au moins 10KW).

Morton en 1965 a développé un modèle théorique pour la distribution de température [12], le profil de vitesse et le profil du panache (concentration). Ces relations ont été améliorées par Heskestad (1984) grâce à des travaux expérimentaux. Les mesures de Heskestad effectuées sur des panaches de feux en laboratoire, lui ont permis de calculer les coefficients numériques pour les relations de Morton. Il obtint ainsi :

$$b_{\Delta T} = 0.12 (T_0 / T_a)^{1/2} (z - z_v) \quad (2.9)$$

$$\Delta T_0 = 9.1 \left[ T_a / (g C_p^2 \rho_a^2) \right]^{1/3} Q_c^{2/3} (z - z_v)^{-5/3} \quad (2.10)$$

$$u_0 = 3.4 \left[ g / (C_p \rho_a T_a) \right]^{1/3} Q_c^{1/3} (z - z_v)^{-1/3} \quad (2.11)$$

Ici, l'indice « 0 » indique le centre du panache (supposé axisymétrique), et les symboles affectés de l'indice « a » désignent une propriété du fluide ambiant ;  $b_{\Delta T}$  est le rayon du panache où l'augmentation de la température vaut  $1/2\Delta T_0$  ;  $\Delta T_0$  et  $T_0$  sont respectivement l'élévation de température et la température au centre du panache .

$$\Delta T_0 = T_0 - T_a \quad (2.12)$$

George et al. (1977) ont calculé les coefficients précédents, à partir de mesures expérimentales sur un panache thermique (non réactif et dominé par les effets de flottabilité) émis par une buse. Ils ont obtenu les coefficients : 0.104 pour  $b_{\Delta T}$ , 9.1 pour  $\Delta T_0$  et 3.4 pour  $u_0$ .

Plus récemment, Papanicolaou et List (1988), Shabbir et George (1994), Dai et al. (1994) ont obtenu des résultats similaires.

Ainsi, nous pouvons en déduire que le comportement d'un panache thermique émis par un feu et émis par une buse peut être décrit par le même modèle, à la condition que le panache soit dominé par les forces de flottabilité.

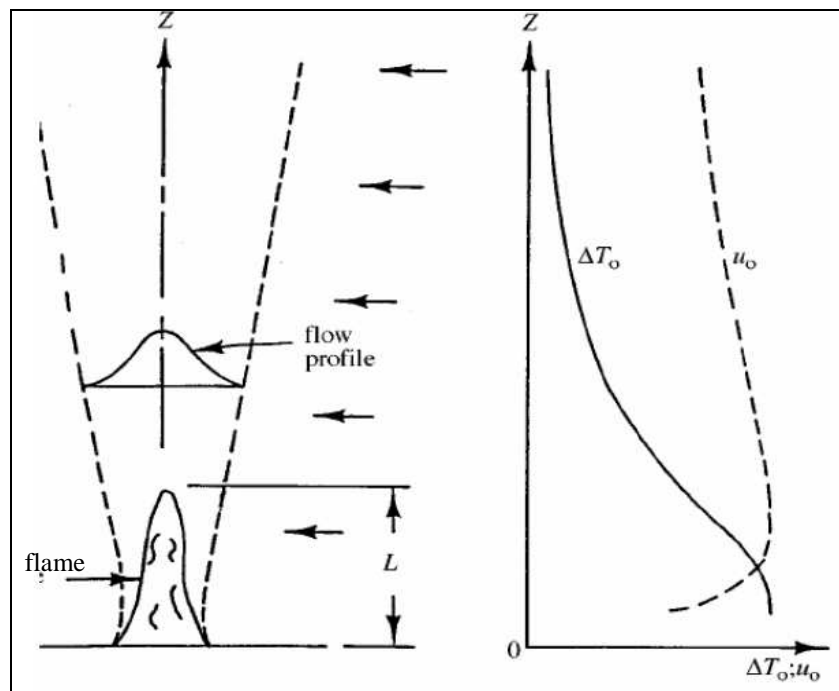


Fig. 2.7 : profil de température et de vitesse au centre du panache selon les observations de McCafrey 1979, Cox et Chitty 1980, Heskestad 1981, Kung et Stavrianidis 1983, Gengembre et al. 1984 [13].

La figure 2.7 illustre, d'après des résultats expérimentaux, les variations de température et de vitesse dans le panache. On voit que la température décroît rapidement pour une hauteur supérieure à celle de la flamme, sous l'effet de la dilution par l'air frais entraîné et des transferts thermiques. La vitesse décroît

également à partir d'une certaine hauteur à cause de l'élargissement du panache et de la dissipation visqueuse.

Dans le but de simplifier les équations, Davis et Reneke [13] supposent une distribution gaussienne des profils radiaux de vitesse et de concentration de fumée dans un panache d'un feu issu d'une source circulaire. Ainsi, ils écrivent :

$$C_{xp}(r, z) = C_{xp0}(z) e^{-\left(\frac{r^2}{\lambda^2 \sigma^2}\right)} \quad (2.13)$$

$$u_z(r, z) = u_{zm}(z) e^{-\left(\frac{r^2}{\sigma^2}\right)} \quad (2.14)$$

Avec :  $C_{xp}$  : concentration en fumée dans le panache ( $\text{Kg/m}^3$ ) ;

$C_{xp0}$  : concentration en fumée au centre du panache ( $\text{Kg/m}^3$ ) ;

$u_z$  : vitesse ascendante des gaz dans le panache (m/s) ;

$u_{zm}$  : vitesse ascendante des gaz au centre du panache (m/s) ;

$r$  : distance radiale à partir du centre du panache (m) ;

$\sigma \lambda$  : 1/e de la largeur du panache ;

$\lambda$  : coefficient de la distribution Gaussienne ;

$\sigma$  : 1/e de la largeur du profil de vitesse.

En utilisant des corrélations développées par Heskestad (1984), Davis et Reneke proposent des relations pour le profil de température [13], de vitesse et de concentration au centre du panache d'une fumée :

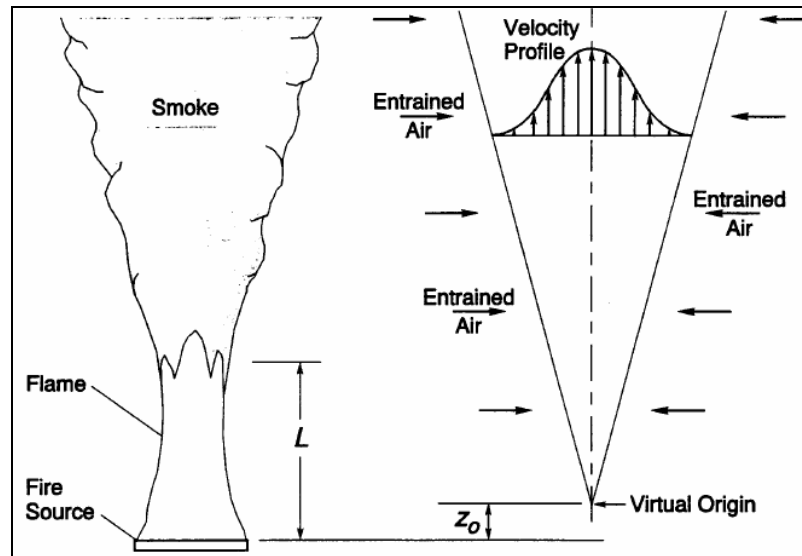


Fig. 2.8 : modèle simplifié de panache de fumée.

$$\frac{T(z)}{T_a} = 1 + \frac{25}{293} \frac{(1 - \chi_r)^{2/3} \dot{Q}^{2/3}}{(z - z_v)^{5/3}} \quad (2.15)$$

$$u_{zm}(z) = \frac{1.03(1 - \chi_r)^{1/3} \dot{Q}^{1/3}}{(z - z_v)^{1/3}} \quad (2.16)$$

$$C_{sp0}(z) = \frac{27.8 \dot{m}_s}{(1 - \chi_r)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} \frac{T(z)}{T_a} (z - z_v)^{5/3}} \quad (2.17)$$

$$z_v = 1.02D + 0.083 \dot{Q}^{2/5} \quad (2.18)$$

Avec  $\dot{m}_s$ ,  $\chi_r$ ,  $z_v$ , désignent respectivement : débit de fumée (Kg/s), fraction de l'énergie radiative, hauteur virtuelle (d'une source ponctuelle) (m), figure 2.8.

### 2.4. La hauteur de la flamme

La hauteur de flamme est définie comme la hauteur à laquelle le mélange de gaz n'est plus réactif.

Les principales corrélations, développées à partir d'essais et décrites dans la littérature, sont présentées ci-dessous.

#### - Corrélation de Thomas [14]

Dans des situations sans vent, la hauteur de flammes d'un feu de nappe peut être calculée à partir de la corrélation de Thomas, obtenue de feux de bûchers de bois. Elle reste valide pour les feux dont le rapport  $L/D$  reste compris entre 3 et 10. Cette corrélation est d'un usage répandu et elle est souvent extrapolée faute de mieux à des incendies d'hydrocarbures par exemple.

$$L = 42 \times D \left( \frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0.61} \quad (2.19)$$

Notons ici que le terme  $\left( \frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)$  peut également s'écrire comme suit :

$$\left( \frac{\rho_c \times v}{\rho_a \sqrt{g \cdot D}} \right) = \frac{\rho_c}{\rho_a} \times \sqrt{Fr} \quad (2.20)$$

Avec  $Fr = \frac{v^2}{g \cdot D}$  : le nombre de Froude ;

#### - Corrélation de Moorhouse [15] :

Cette corrélation a été établie à partir d'essais réalisés en l'absence de vent, sur des grands feux de gaz naturel liquéfié, dont le rapport  $L/D$  reste compris entre 1 et 3:

$$L = 6,2 \times D \times \left( \frac{m''}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0.254} \quad (2.21)$$

La remarque effectuée relativement à la corrélation de Thomas quant au nombre de Froude, reste ici encore valable.

- **Corrélation de Stewart** [16] :

Stewart propose la corrélation suivante tirée de données disponibles dans la littérature et d'essais sur des jets de gaz enflammés.

$$L = 14,73 \times D \times \left( \frac{\omega \left( r + \frac{\omega}{\rho_c} \right)}{(1-\omega)^5} \right) \left( \frac{m''}{\rho_a \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0,4} \quad (2.22)$$

avec  $\omega$  : expansion volumique inverse ;

$r$  : rapport stœchiométrique air/combustible.

De la même manière que pour la corrélation de Thomas, le rapport  $L/D$  peut être directement relié au nombre de Froude,  $Fr$ .

- **Corrélation de Heskestad** [12] :

C'est une corrélation relativement récente (1984). Elle possède le domaine de validité le plus important que ce soit en terme de produit ou de type de feu.

$$L = \left( -1,02 + 15,6N^{\frac{1}{5}} \right) \times D \quad (2.23)$$

$$N = \frac{C_{pa} T_a}{g \Delta H_c} \left( \frac{\eta_{comb} \dot{m}}{\rho_a} \right)^2 \frac{r_s^3}{D^5} \quad (2.24)$$

$$r_s = 137,87 \frac{x + y/4 + z/2}{12x + y + 16z} \quad (2.25)$$

avec  $C_{pa}$  : capacité calorifique du gaz de référence (air) (J/kg.K) ;

$r_s$  : rapport stœchiométrique air/combustible.

Cette relation est valable pour des valeurs de  $N$  comprises entre  $10^{-5}$  et  $10^{+5}$ , pour un hydrocarbure liquide de formule brute  $C_xH_yO_z$ . Le rendement  $\eta_{comb}$  tient compte du fait qu'une partie du produit ne participe pas à la combustion. D'après

des mesures réalisées par Tewarson, cité par Drysdale [17], ce rendement peut varier entre 0,35 et 0,99, avec une valeur moyenne de 0,7.

En revanche, Bagster et Pitblado [18] donnent une valeur plus élevée comprise entre 0,90 et 0,95. Il semble donc que le rendement ne peut pas être connu de façon précise, et que seul un ordre de grandeur est utilisable.

Heskestad propose une formule simplifiée qui constitue une approximation raisonnable de cette corrélation pour les combustibles les plus courants dans des conditions atmosphériques classiques.

$$L/D = -1,02 + 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} / D \quad (2.26)$$

La corrélation d'Heskestad peut également être reliée au nombre de Froude,  $Fr$ .

Des expériences réalisées sur des grands feux de nappe de kérosène, d'essence et de gazole (Hofmann [19]) ont montré que le rapport  $L/D$  tend vers la valeur constante égale à 1,7.

### 2.5. Débit d'air entraîné par la flamme

Le débit de matière issue de la source du feu ne représente que 1% du débit de fumée total au niveau de la pointe de la flamme (Heskestad 1986). Le débit massique d'air entraîné dans le panache s'exprime par :

$$\dot{m}_{ent} = G \left[ \frac{(g\rho_a^2)}{CpT_a} \right]^{1/3} Q_c^{1/3} (z - z_v)^{5/3} \left[ 1 + \frac{JQ_c^{2/3}}{(g^{1/2}Cp\rho_a T_a)^{2/3} (z - z_v)^{5/3}} \right] \quad (2.27)$$

Avec  $G=0.196$  et  $J=2.9$ .

$Q_c$  est la puissance convective du feu, donnée en KW.

---

---

# **Chapitre 3 : Instrumentation**

---

---

**3.1. Mesure de la température**

**3.2. Mesure de la vitesse par LDV**



*Cette partie a pour but de décrire les moyens expérimentaux et les phénomènes physiques mise en jeu pour la mesure de certaines grandeurs notamment la température et la vitesse. La mesure de la température est effectuée à l'aide des thermocouples et la thermographie infrarouge et pour celle de la vitesse à l'aide de la LDV (Laser Doppler Velocimetry).*

### **3.1. Mesure de la température**

#### **3.1.1. Les thermocouples**

Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de la température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. Leur principal défaut est leur précision, il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une erreur inférieure à 0,1-0,2°C. La mesure de la température par des thermocouples est basée sur l'effet Seebeck.

##### **3.1.1.1. Principe**

Un thermocouple est constitué de deux fils conducteurs ou semi-conducteurs de caractéristiques différentes, soudés en un point. L'expérience montre que le circuit électrique formé par ces deux conducteurs est parcouru par un courant  $I$ . Ce phénomène appelé Effet Seebeck, résulte de la coexistence de deux effets: l'effet Peltier et l'effet Thomson.

Les forces électromotrices (f.é.m) de Peltier existent au contact de deux conducteurs différents et les f.é.m de Thomson apparaissent dans un conducteur homogène dont une extrémité A est maintenue à une température  $T_A$  et l'autre à une température  $T_B$ .

En théorie, lorsqu'un conducteur électrique subit un gradient de température, l'énergie reçue crée un mouvement d'électrons générant une force électromotrice (f.é.m.). La valeur et le sens dépendront du matériau conducteur, de l'amplitude et de la direction du gradient de température. La tension résultante aux extrémités de ce conducteur sera la somme des f.é.m produites tout le long du conducteur.

Dans la pratique, cette mesure sur un conducteur unique n'est pas réalisable, car elle est trop faible. Si on place deux conducteurs composés de métaux de caractéristiques thermoélectriques très différentes reliés entre eux par une extrémité nous pouvons alors obtenir des valeurs amplifiées de f.é.m. Elles sont mesurables par l'application d'un gradient de température à partir du point de jonction de mesure (aussi appelé soudure chaude). Ce type de circuit thermoélectrique est appelé "thermocouple" il est schématisé sur la figure 3.1.

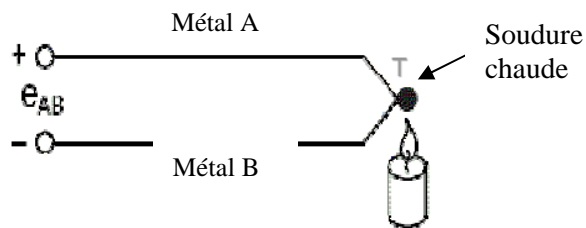


Fig. 3.1 : schéma d'un thermocouple

La prise direct des mesures aux bornes du thermocouple n'est pas possible car le fait de le connecter sur un appareil de mesure crée de nouvelles jonctions par liaisons entre les fils du thermocouple et les bornes (en cuivre ou en laiton) de l'appareil.

Une première solution est d'ajouter au circuit un deuxième thermocouple de même nature que le premier, dont la soudure de mesure est plongée dans un bain de glace. Cette nouvelle jonction est appelée jonction de référence ou soudure froide [20], telle que représentée sur la figure 3.2.

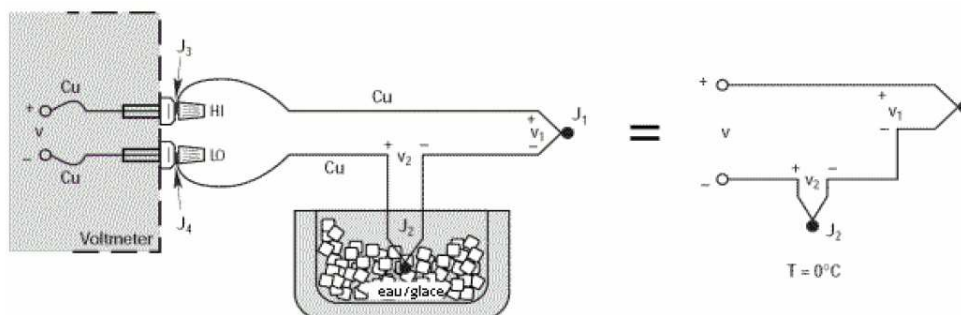


Fig. 3.2 : soudure froide.

Bien que cette solution soit efficace mais elle présente deux inconvénients majeurs :

- la nécessité de disposer de deux thermocouples au lieu d'un seul.
- la nécessité de constituer un mélange eau/glace à la température de 0°C.

Pour cette raison, il existe deux techniques pour la compensation de soudure froide : la compensation matérielle et la compensation logicielle. Ces deux techniques nécessitent la mesure de la température de la jonction de référence par un capteur à lecture directe.

### 3.1.1.2. Compensation logicielle (Software Compensation)

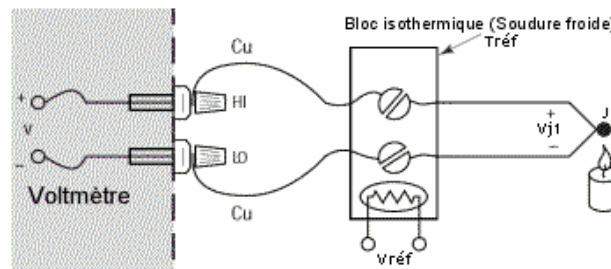


Fig. 3.3 : compensation logicielle.

Le bain de glace est remplacé par un bloc isothermique à température  $T_{\text{réf}}$ . La température de ce bloc est mesurée par une thermistance dont la valeur ohmique est fonction de cette température. Les étapes à suivre pour la détermination de la température de la jonction J1 (soudure chaude) sont :

- La détermination de  $V_{\text{réf}}$  à partir de la thermistance.
- La détermination de la tension  $V_{J1}$  au borne de la jonction J1 en sachant que

$$V = \alpha (T_{\text{réf}} + T_{J1}) = V_{\text{réf}} + V_{J1} \quad (3.1)$$

Avec  $\alpha$  : coefficient de Seebeck

- La conversion de la tension  $V_{J1}$  en température.

Cette méthode est appelée compensation logiciel parce qu'elle procède par calcul pour compenser la soudure froide. Le capteur de température du bloc isothermique

(contenant la liaison entre les bornes du thermocouple et celles de l'appareil de mesure à température ambiante) qui est représenté sur la figure 3.3 peut être une sonde platine, une thermistance ou un capteur de température en circuit intégré.

### 3.1.1.3. Compensation matérielle (Hardware Compensation)

La compensation matérielle consiste à insérer un dispositif tel qu'une pile ou une source de tension variable pour annuler la tension de décalage produite par la soudure froide. La source de tension variable génère une tension de compensation suivant la température ambiante, et ajoute ainsi la tension correcte pour annuler les signaux thermoélectriques indésirables. Lorsque que la soudure froide est compensée, le seul signal mesuré par un système d'acquisition de données est la tension provenant de la jonction du thermocouple.

### 3.1.1.4. Composition d'un thermocouple

Un thermocouple gainé est constitué de différents éléments :

- les matériaux thermoélectriques ;
- la gaine et l'isolant ;
- la soudure chaude ;
- le câble d'extension et le type de raccord ou de connecteur qui permet de relier le thermocouple à l'appareil de mesure.

Plus concrètement, un thermocouple est schématisé de la manière suivante :

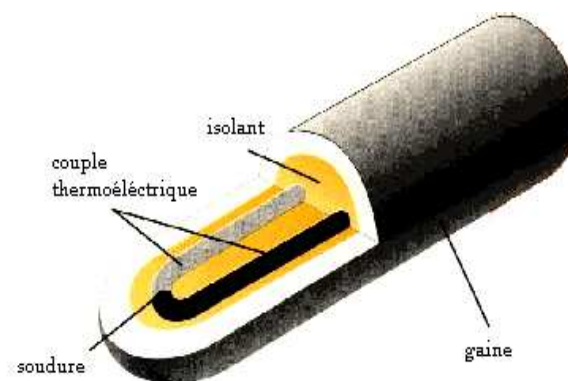


Fig. 3.4: composition d'un thermocouple gainé.

### 3.1.1.5. Différents types de thermocouples

Il existe différents types de thermocouples, correspondant chacun à une gamme de température ou à une plus ou moins grande précision. Leurs propriétés peuvent également dépendre du type d'isolation (gaine) utilisée pour les fils métalliques. La liste suivante, non exhaustive, donne les références de quelques-uns de ces thermocouples :

- Type K : Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium) ;

Le thermocouple de type K est le plus standard. Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200 °C à 1200 °C. Il est également bon marché.

- Type E : Chromel / Constantan (alliage cuivre + nickel) ;

Ce thermocouple est intéressant pour la mesure de températures basses. Il a également l'avantage de ne pas avoir de réponse magnétique.

- Type N : Nicrosil (alliage nickel + chrome + silicium) / Nisil (alliage nickel + silicium) ;

Sa bonne stabilité et sa bonne résistance aux températures élevées et à l'oxydation rendent ce thermocouple intéressant pour les mesures à hautes températures.

- Type J : Fer / Constantan (alliage cuivre + nickel) ;

Fonctionne bien dans le vide mais n'est pas recommandé pour les basses températures.

- Type T : Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel) ;

Particulièrement adapté pour une utilisation à basse température comme pour des applications cryogéniques.

- Type R : Platine-Rhodium (13%) / Platine ;

Adapté aux températures élevées.

- Type S : Platine-Rhodium (10%) / Platine ;

Adapté aux températures élevées.

- Type B : Platine-Rhodium (30%) / Platine-Rhodium (6%).

Adapté aux températures élevées, utilisé en grande partie en verrerie industrielle.

Dans notre étude nous avons utilisé les thermocouples de type K.

### 3.1.1.6. Détermination de la température par un thermocouple

Après l'utilisation de l'une des compensations décrites dans les paragraphes précédents. La tension mesurée est convertie en température. La relation entre celle-ci et la tension n'est pas linéaire.

Pour déterminer la température mesurée par le thermocouple, deux méthodes sont envisagées. L'une repose sur l'utilisation d'une table de référence (un exemple est disponible en annexe E) donnant des températures pour une jonction de référence à 0°C. Ces tables sont entrées dans un ordinateur, mais cela entraînerait de très gros fichiers de données et des temps de recherche prohibitifs.

L'autre méthode consiste à utiliser des fonctions polynomiales de puissances croissantes telles que:

$$T = \sum_{i=0}^n C_i \cdot V^i \quad (3.2)$$

Avec: T, V, C, n, désignent respectivement, la température, la tension du thermocouple, les coefficients uniques pour chaque thermocouple et l'ordre maximum du polynôme.

Les coefficients pour un thermocouple du type K sont donnés en annexe E.

### 3.1.1.7. Les facteurs influençant la mesure

Durant tous nos essais nous nous sommes intéressé à la mesure des températures sur l'axe central de la flamme et du panache de fumées et nous avons aussi mesurée les températures des parois externes des bacs.

Pour la mesure de la température dans la flamme et dans le panache de fumées on a pu remarquer une accumulation de suies sur les thermocouples au cours du temps qui modifie le diamètre de celui-ci et peut changer ses propriétés.

Pour la mesure des températures sur les parois, on a utilisé des thermocouples adhésifs. L'échauffement de l'adhésif au cours du temps provoque une diminution de la pression de contact avec la paroi ce qui peu conduire à

diminuer la surface de la jonction en contact avec le bac et fausser par conséquent la mesure.

### 3.1.2. La thermographie infrarouge

#### 3.1.2.1. Principe

La thermographie infrarouge est une technique de mesure spatio-temporelle des flux surfacique de rayonnement en provenance d'une scène thermique. La représentation de l'image thermique est alors obtenue par le relevé des rayonnements électromagnétiques émis par la scène. Ces rayonnements, qui portent l'information sur l'état thermique, sont communément appelés rayonnements thermiques. D'après la norme française NF A 09-400, la thermographie est la technique qui permet d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène thermique observée dans un domaine spectral déterminé [21].

#### 3.1.2.2. Rayonnement thermique

Le processus d'émission d'un flux de rayonnement thermique résulte de l'agitation moléculaire interne de la matière. Cette agitation est accélérée par l'élévation de la température, ce qui favorise le déplacement des particules porteuses de charges électriques, responsable de la génération des rayonnements.

Le rayonnement thermique couvre approximativement la gamme de 0,1 à 1 000  $\mu\text{m}$ .

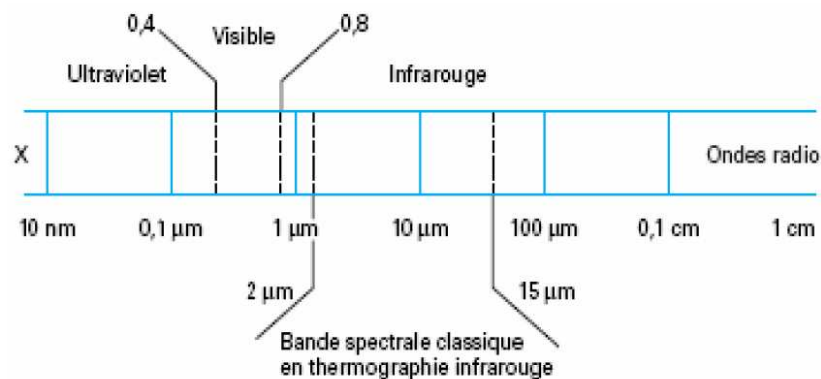


Fig. 3.5 : spectre des rayonnements électromagnétiques [21].

Sur la figure 3.5, il est représenté la bande spectrale de la thermographie infrarouge qui s'étend entre 2  $\mu\text{m}$  et 15  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.2.3. Système de thermographie

Le système de mesure thermographique est composé d'un ensemble d'équipements capable d'effectuer des mesures de température.

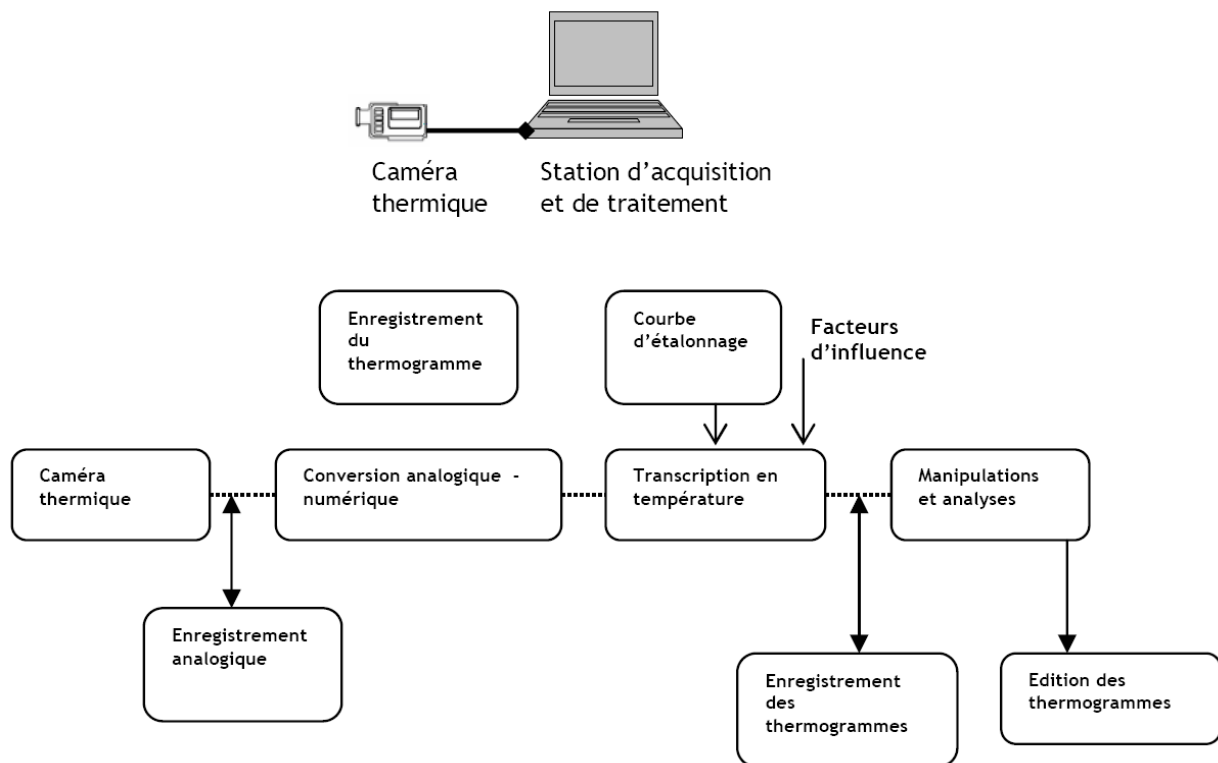


Fig. 3.6 : système de thermographie [21].

Il se compose d'une caméra thermique et d'une station d'acquisition et de traitement. Cette station intègre principalement les fonctions d'enregistrement, de conversion, d'analyse et de transcription en température. Une représentation du système est schématisée sur la figure 3.6.

### 3.1.2.4. Caméra thermique

La caméra thermique est un radiomètre à balayage spatial. Le radiomètre est défini comme l'appareil de mesure du flux de rayonnement. La méthode de mesure



est une méthode directe : la valeur d'une grandeur caractéristique de l'élément détecteur de la caméra est une fonction de la valeur du flux que reçoit cet élément ; la température du corps observé en est déduite par calcul.

### 3.1.2.5. L'étalonnage de la camera thermique

Pour étalonner un appareil de mesure on doit se procurer un étalon qui nous sert de référence pour la grandeur mesurée. Pour la caméra thermique, la référence est le corps qui a une émissivité égale à l'unité. En effet, la caméra thermique est étalonnée sur un corps noir à courte distance et dans des conditions maîtrisées de laboratoire. On peut ensuite l'utiliser pour mesurer le rayonnement émis par des corps réels dans des conditions pouvant être quelconques, sur site.

L'étalonnage consiste à enregistrer le signal issu de la camera pour une ouverture de diaphragme donnée, face à un corps noir de laboratoire placé à une température  $T$  variable [21].

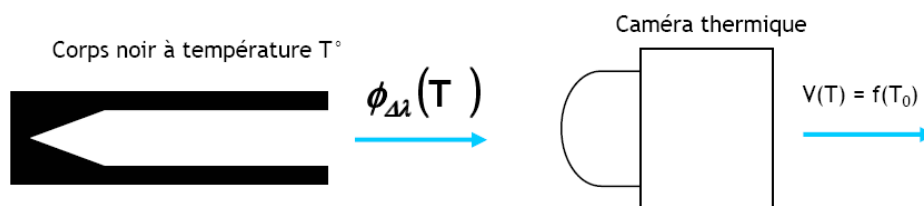


Fig. 3.7 : situation d'étalonnage.

### 3.1.2.6. Courbe d'étalonnage

Le signal analogique délivré par la caméra est exploité afin de remonter à la distribution thermique du corps observé dont il faut déterminer sa température.

Pour la situation d'étalonnage, la concordance entre l'amplitude du signal et la température du corps noir est établie expérimentalement, il s'agit de la courbe d'étalonnage, figure 3.8. Cette courbe dépend du réglage des éléments de la caméra tel que l'objectif, le filtre spectral, l'ouverture du diaphragme, etc...

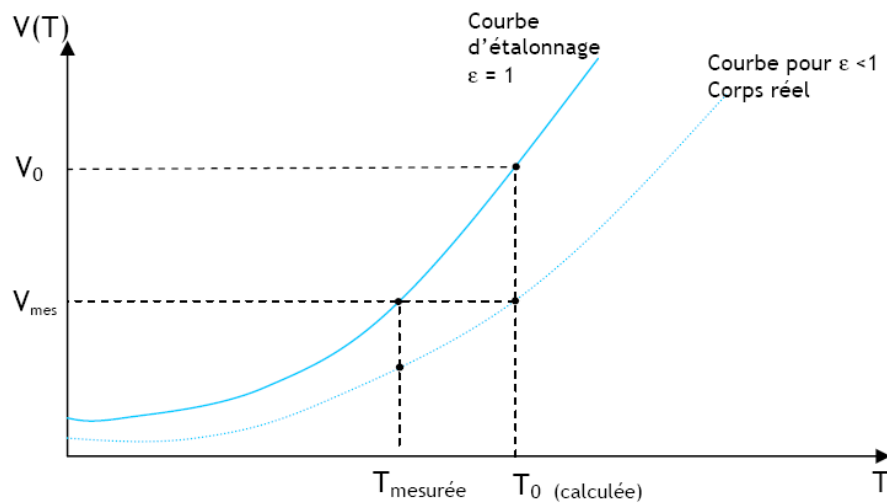


Fig. 3.8 : courbe d'étalonnage.

L'amplitude du signal issu de la caméra thermique est une fonction de la température du corps noir observé

La tension mesurée s'écrit comme suit :

$$V_{mes} = \epsilon V_0 + (1-\epsilon)V_e(T_a) \quad (3.3)$$

Avec  $\epsilon$  : L'émissivité du corps réel

$V_0$  : tension calculée pour un corps noir

$V_e(T_a)$  : tension fournie à la température de l'environnement.

En supposant que l'objet observée est placée dans un environnement de température uniforme  $T_a$  et en supposant que l'émissivité du corps est constante sur une bande spectrale à une température  $T_0$ , la température apparente est exprimé avec la relation :

$$T_{mesurée}^4 = \epsilon T_0^4 + (1-\epsilon) T_a^4 \quad (3.4)$$

La température  $T_{mesurée}$  est appelée « température apparente du corps noir », c'est celle qu'aurait un corps noir placé dans le vide et donnant la même tension que l'objet analysé.

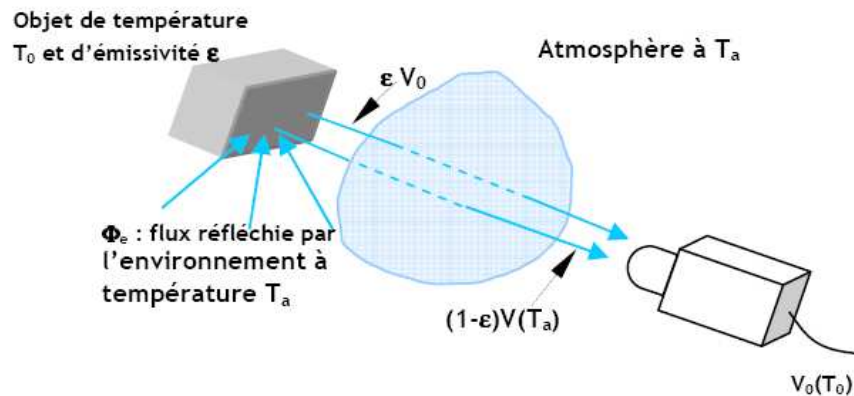


Fig. 3.9 : situation de mesure simplifiée [21]

La température  $T_0$  est calculée par la mesure de rayonnement, la courbe d'étalonnage et les grandeurs d'influence (émissivité, flux réfléchi par l'environnement,...).  $T_0$  est donc la température de l'objet observé par la caméra [21]. En supposant que le milieu entre la caméra et l'objet est un milieu parfaitement transparent, la valeur mesurée résulte de la superposition de deux phénomènes, figure 3.9 :

- La réflexion d'une partie du flux de rayonnement émit par l'environnement sur le corps à mesurer.
- Le rayonnement du corps lui-même.

### 3.1.2.7. Fonctionnement d'un Bolomètre

Les bolomètres sont des détecteurs dont le principe général est de convertir l'énergie du rayonnement incident en chaleur pour élever la température d'un corps muni d'un thermomètre. Ils ont été historiquement introduits pour la mesure du rayonnement électromagnétique dans le domaine du proche infrarouge avec les travaux d'Herschel au début du XX<sup>ème</sup> siècle.

Les bolomètres modernes découplent en général la fonction d'absorption de l'énergie et celle de la mesure de température (bolomètres composites).

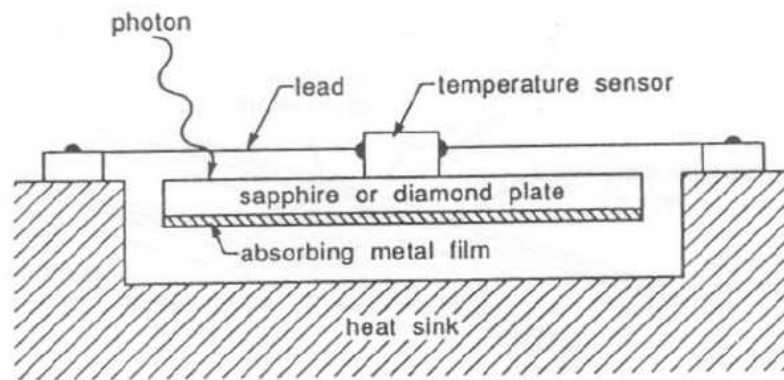


Fig. 3.10 : bolomètres composites [21]

L'absorbeur est suspendu par des fils de Nylon ou de Kevlar, ou simplement par les liaisons électriques du thermomètre. L'absorbeur est déposé sur un substrat de saphir ou de diamant (faible chaleur spécifique grâce à une haute température de Debye). Le thermomètre est ensuite rapporté sur le substrat; il s'agit dans la plupart des applications à haute sensibilité de cristaux NTD-Ge. Un soin particulier est apporté pour ne pas ajouter de matériaux qui pénaliseraient l'inertie thermique du détecteur à basse température (colles, soudure). Ils peuvent couvrir l'intégralité du spectre électromagnétique. Cependant, les technologies mises en œuvre spécialisent chaque type de bolomètre à un domaine de longueur d'onde défini et à une utilisation particulière. Ces appareils comptent parmi les capteurs les plus performants pour le rayonnement X, l'infrarouge lointain et le submillimétrique. Ils seront désormais embarqués à bord de satellites d'observation astronomiques [21].

### 3.1.2.8. Camera thermique utilisée pour nos essais



Fig. 3.11 : camera thermique [22].

Elle est de marque FLIR modèle A40, elle se caractérise par une gamme de mesure allant de  $-20^{\circ}\text{C}$  à  $+550^{\circ}\text{C}$  et d'une exactitude de mesure sur corps noir de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou  $\pm 2\%$  sur la lecture [22].

La caméra est de type FPA (Focal Plane Array : matrice de détecteurs dans le plan focal). Le capteur est constitué d'une matrice de détecteur (320 x 240 éléments), placé dans le plan focal de l'objectif d'ouverture  $24^{\circ}$ . Elle est commandée par le logiciel ThermaCAM™ Researcher. La liaison entre la caméra et l'ordinateur est établie par une interface Fire Wire (norme IEEE1394).

Chaque détecteur est un micro bolomètre non refroidi : le signal qu'il délivre dépend de sa température qui elle-même dépend du flux radiatif net focalisé par l'objectif depuis la scène thermique jusqu'au capteur.

La fréquence maximale des images est de 50Hz. Elle fournit les images sous forme numériques codées sous 16 bits. Il faut noter aussi que cette caméra fonctionne dans la bande spectrale  $[3\ \mu\text{m}, 5.6\ \mu\text{m}]$ .

### 3.1.2.9. Logiciel de la caméra thermique

Le logiciel ThermaCAM Researcher possède des fonctionnalités d'analyse et d'acquisition à haute vitesse. Ce logiciel enregistre, relit et analyse les images et les données infrarouges directement à partir de la caméra thermique.

Le logiciel possède les caractéristiques suivantes [22] :

- Interface IEEE-1394 FireWire ;
- Analyse statique ou dynamique, interface IEEE (50/60Hz), RS422, ou PCMCIA (5 à 7Hz) ;
- Tracé automatique de la température en fonction du temps ;
- Visualisation en direct de l'image IR ;
- Commande de la caméra IR à distance à partir d'un PC ;
- Enregistrement numérique en temps réel ;
- Conversion automatique des images IR au format AVI, BMP ou MatLab.

### 3.1.2.10. Facteurs d'influence

L'un des facteurs qui influe énormément sur la mesure thermographique est le facteur de transmission atmosphérique. Ce facteur représente la partie du flux de rayonnement transmis par le milieu ambiant.

En tenant compte du facteur de transmission atmosphérique la relation 3.3 devient :

$$V_{\text{mes}} = [\varepsilon V_0 + (1-\varepsilon)V_e] \tau_a + (1-\tau_a)V_a \quad (3.5)$$

Il faut noter que le facteur de transmission varie avec la variation de la nature du milieu.

L'autre facteur est l'émissivité : Le flux de rayonnement mesuré dépend fortement de l'émissivité qui dépend elle aussi de la température. En effet l'évaluation de l'un de ces paramètres nécessite la connaissance de l'autre. De plus, l'émissivité dépend aussi de la direction d'observation.

## 3.2. Mesure de vitesses par LDV (Laser Doppler Velocimetry)

La LDV donne une mesure locale et instantanée d'une projection du vecteur vitesse.

### 3.2.1. Principe de la Vélocimétrie Laser Doppler

La méthode présentée consiste à dédoubler un faisceau issu d'un laser continu en deux faisceaux parallèles qui sont focalisés par une lentille ( $O_1$ ). Dans la région de l'espace qui leur est commune, ces deux faisceaux interfèrent et forment des franges d'interférence, figure 3.12.

Si une particule se déplace à une vitesse  $\vec{V}$  selon un axe  $XX'$  au travers du réseau de franges; elle croise alternativement des franges sombres et brillantes, et diffuse donc un flux périodique, si bien que le détecteur recevant cette lumière modulée délivre un signal ayant une fréquence  $\nu$ , qui dépend uniquement de l'interfrange et de la composante de vitesse de la particule perpendiculairement au plan des franges [23], figure 3.12.

Pour aller d'une frange brillante à la suivante, une particule de  $\vec{V}$  parcourt une distance  $i'$  pendant un temps  $\tau$  ; la fréquence détectée est :

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{|\vec{V}|}{i'} = \frac{|\vec{V}| \cdot \cos \alpha}{i} = \frac{u}{i} \quad (3.6)$$

$u$  étant la composante de vitesse perpendiculaire aux franges d'interférence. L'interfrange est :

$$i = \frac{\lambda \cdot f_i}{D_s} = \frac{1}{2n \cdot \sin(\theta)} \lambda \quad (3.7)$$

Avec :  $f_i$ ,  $\theta$ ,  $n$ ,  $D_s$ , désignent respectivement la distance focale de la lentille convergente, l'angle entre les deux faisceaux, l'indice de réfraction du milieu, et la distance entre les deux faisceaux sortant du front de la lentille.

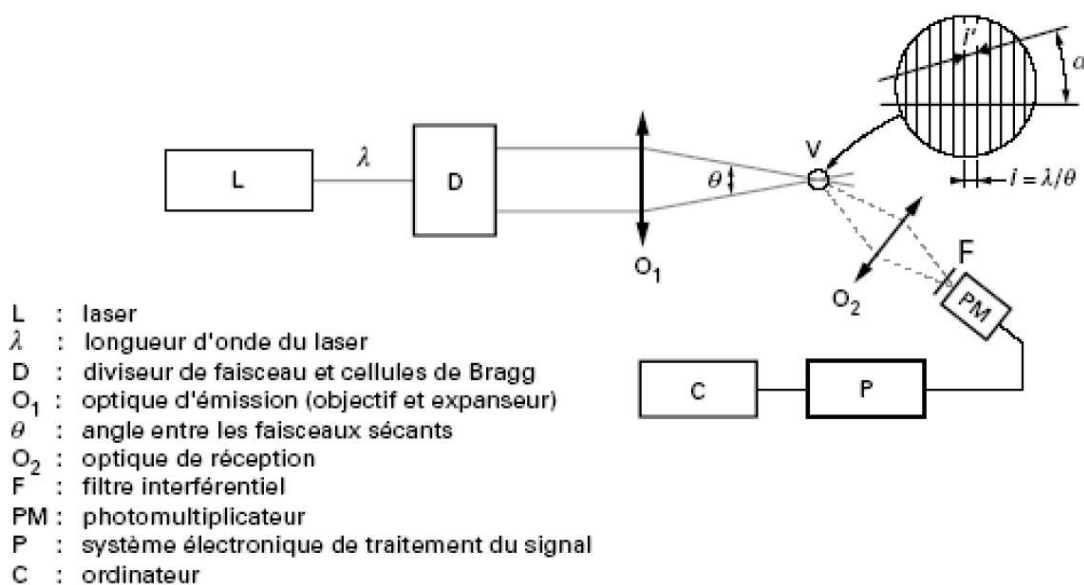


Fig. 3.12 : dispositif de la LDV [23].

La fréquence  $\nu$  de la fluctuation de l'intensité lumineuse causée par le passage de la particule dans le volume de mesure est détectée par le photodétecteur.

### 3.2.2. Le volume de mesure

Le volume de mesure est constitué par la partie commune aux deux faisceaux qui se croisent.

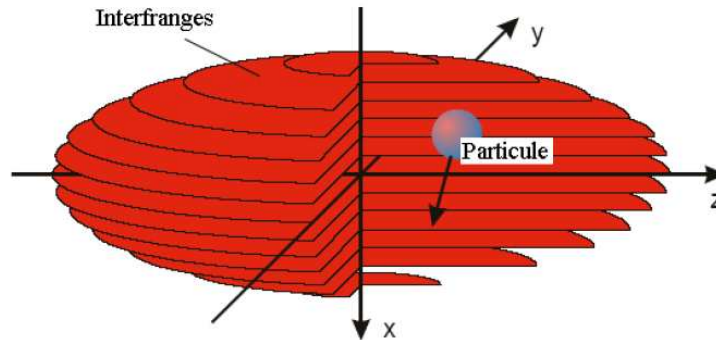


Fig. 3.13 : volume de mesure.

Dans sa section droite, le faisceau LASER présente une répartition gaussienne de l'intensité lumineuse et sa dimension latérale est définie comme la distance à l'axe où l'intensité est réduite dans le rapport  $1/e^2$ , d'où la notation  $D_{e^{-2}}$ . Au voisinage du point de focalisation, la largeur du faisceau devient  $d_{e^{-2}}$  [24] :

$$d_{e^{-2}} = \frac{4f_i\lambda}{\pi D_{e^{-2}}} \quad (3.8)$$

La dimension du volume de mesure est alors (figure 3.14) [24] [25]:

$$\Delta z = \frac{d_{e^{-2}}}{\sin(\theta)} = \frac{4 \cdot f_i \cdot \lambda}{\pi \cdot D_{e^{-2}}} \frac{1}{\sin(\theta)} \quad (3.9)$$

$$\Delta y = \frac{d_{e^{-2}}}{\cos(\theta)} = \frac{4 \cdot f_i \cdot \lambda}{\pi \cdot D_{e^{-2}}} \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (3.10)$$



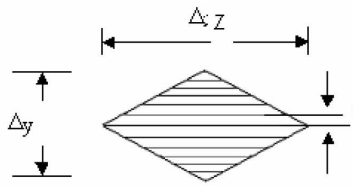


Fig. 3.14 : dimensions du volume de mesure.

### 3.2.3. Détermination du sens de la vitesse

Si l'on considère un réseau de franges fixes, deux particules traversant le volume de mesure à la même vitesse, selon la même trajectoire, mais dans des directions diamétralement opposées, produiront le même signal à la même fréquence. Le système n'étant pas sensible au sens de la vitesse, on remédie à cette indétermination en introduisant sur un des faisceaux une cellule de Bragg (modulateur acousto-optique) qui permet d'augmenter sa fréquence.

Un décalage constant de fréquences existe alors entre les deux faisceaux incidents. Les franges du volume de mesure sont maintenant animées d'une vitesse constante et connue de défilement  $u_d$ .

La fréquence de défilement des franges dans le volume de mesure est relativement élevée, car elle vaut  $f'$ , qui est de l'ordre de 40 MHz (ou plus). Avec ce dispositif, le réseau de franges se déplace à une fréquence  $f'$ , ce qui signifie une vitesse de défilement des franges  $u_d = f' \cdot i$  ( $i$  étant l'interfrange). Alors la vitesse mesurée  $u_m$  est la somme algébrique de  $u_d$  et de la composante  $u$  de la vitesse de l'écoulement ; la valeur de  $u_d$  doit être choisie suffisamment élevée pour que  $u_m$  soit toujours largement positive.

En retranchant de la vitesse mesurée  $u_m$  la vitesse de défilement  $u_d$ , on obtient la valeur algébrique de la vitesse  $u$  de la particule.

La fréquence diffusée par la particule, et interceptée par le photodétecteur est :

$$f = f_d \pm \frac{|vitesse|}{i} \quad (3.11)$$

$f_d$  est la fréquence de défilement des franges.

- Remarque :

Une flèche dessinée sur la sonde utilisée durant notre étude permet d'orienter la vitesse mesurée, elle est schématisée sur la figure 3.15.

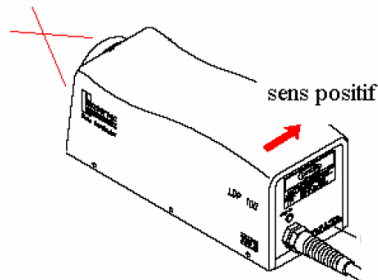


Fig. 3.15 : flèche permettant d'orienter la vitesse mesurée.

### 3.2.3. Les informations obtenues sur les vitesses

Les informations sur la vitesse obtenues sont calculées par les relations suivantes :

- La vitesse moyenne :

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (3.12)$$

- L'écart type :

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (3.13)$$

- L'intensité turbulente :

$$I_t = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{u}} \quad (3.14)$$

Les facteurs de dissymétrie  $S$  et d'aplatissement  $F$  (de manière à vérifier la nature gaussienne de la distribution) :

$$\left. \begin{aligned} \overline{u'^3} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^3 \\ S &= \frac{\overline{u'^3}}{(\overline{u'^2})^{3/2}} \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

$$F = \frac{\overline{u'^4}}{(\overline{u'^2})^2} \quad (3.16)$$

$$\overline{u'^4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^4$$

Le premier nous renseigne sur la symétrie de la distribution gaussienne des mesures par rapport à la moyenne. Le deuxième est le facteur d'aplatissement, il permet d'apprécier la dispersion des mesures et donc le niveau de turbulence.

Un Exemple de fichier de statistiques (édité par le logiciel *Laservec*) d'une mesure LDV est disponible en annexe F.

### 3.2.4. La sonde LDV utilisée pour notre étude

La sonde LDV compacte (figure 2.16) comporte un LASER à diode émettant un rayon d'une longueur d'onde de 690 nm à une puissance de 50 mW, un photodétecteur de type photodiode à avalanche, une cellule de Bragg (40 MHz) ainsi que l'optique et l'électronique nécessaire, les caractéristiques de la sonde utilisée sont résumée sur le tableau 3.1.

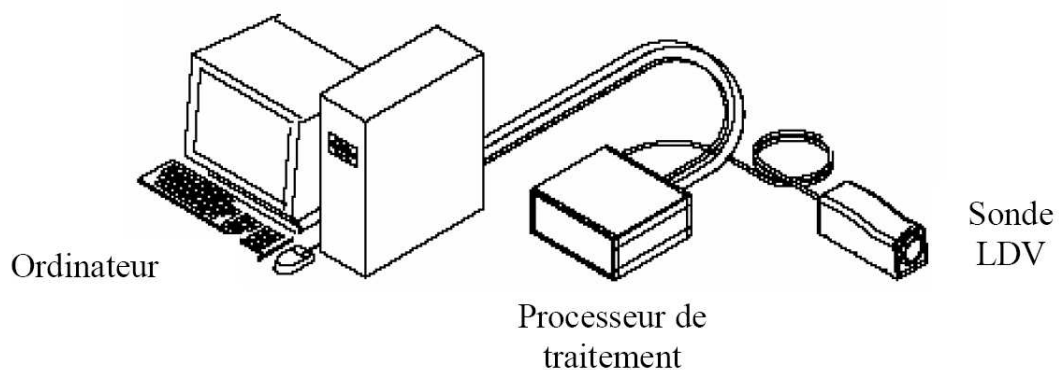


Fig. 3.16 : système LDV de la sonde compacte.

<b>Optical:</b>			
Laser wavelength	680-695 nm		
Laser power	50 mw		
Beam spacing	50 mm		
<b>Electrical:</b>			
Photodetector maximum frequency	155 MHz <sup>1</sup>		
<b>Measurement Volume:</b>			
	Focal Distance of Lens		
	120 mm	250 mm	350 mm
Beam half angle ( $\kappa$ )	10.74°	5.52°	3.97°
Nominal fringe spacing <sup>2</sup>	1.84 $\mu\text{m}$	3.56 $\mu\text{m}$	4.95 $\mu\text{m}$
Length	.54 mm	2.0 mm	3.8 mm
Horizontal axis	100 $\mu\text{m}$	190 $\mu\text{m}$	265 $\mu\text{m}$
Vertical axis	45 $\mu\text{m}$	85 $\mu\text{m}$	115 $\mu\text{m}$
Number of Fringes	53	52	52

Tab.3.1 : caractéristiques de la sonde LDV utilisée [25].

#### - **Domaine d'utilisation**

La gamme de mesure du matériel commercialisé s'étend couramment de  $10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup> à 500 m.s<sup>-1</sup>.

#### **3.2.5. Les intérêts et les limites d'utilisation de la vélocimétrie laser**

- Les intérêts de la LDV dans notre étude sont:

- L'écoulement n'est pas perturbé ;
- La mesure est très localisée, elle se fait dans un volume pouvant être inférieur à 1mm<sup>3</sup>;
- Une réponse intrinsèque (pas de nécessité d'étalonnage), et aussi linéaire. Elle est aussi indépendante de la fluctuation de température où de composition du fluide ;
- Mesure de la vitesse en fonction du temps ;
- Une bonne précision avec un pourcentage d'erreur pouvant être inférieur à 1%.

- Limites d'utilisation de la vélocimétrie laser :

- comme la cadence d'arrivée des particules dans le volume de mesure est aléatoire, il peut en résulter des biais sur les statistiques et l'analyse spectrale des fluctuations de vitesse constitue un problème délicat ;

- Le coût d'un appareillage opérationnel est élevé.

### 3.2.6. Facteurs d'influence

#### - Erreurs statistiques

Les statistiques doivent être faites sur un grand nombre (N) d'échantillons (typiquement plus de 2000), pour avoir un haut degré de confiance dans les mesures; les formules 3.17 et 3.18 permettent d'estimer les incertitudes basées sur ce critère pour la vitesse moyenne et l'écart type [21]:

$$\bar{u} \pm \frac{Z\sqrt{\bar{u}^2}}{\sqrt{N}} \quad (3.17)$$

$$\sqrt{\bar{u}^2} \pm \frac{Z\sqrt{\bar{u}^2}}{\sqrt{2N}} \quad (3.18)$$

La valeur de Z étant de 1,96 pour un taux de confiance de 95 %.

On peut déduire de la relation 3.17 que :

$$\frac{\Delta\bar{u}}{\bar{u}} = \frac{I_t \cdot Z}{\sqrt{N}} \quad (3.19)$$

Avec  $I_t$  l'intensité turbulente.

#### - Erreurs de biais

La mesure s'effectuant sur une seule particule traversant le volume de mesure, et le nombre de particules traversant ce volume par unité de temps étant proportionnel à la vitesse de l'écoulement mais également très irrégulier, on comprend bien qu'une moyenne temporelle de la vitesse serait biaisée par les particules de vitesse la plus élevée.

**- Erreurs dû au bruit**

Le bruit provient essentiellement des réflexions sur les parois, les composants, de la diffusion par les éléments optiques mais également du bruit propre au photodétecteur dû au courant « noir ». On peut augmenter le rapport signal-bruit en plaçant en amont du photodétecteur un filtre qui ne laisse passer que les longueurs d'onde proches de celle du LASER et en peignant les surfaces réfléchissantes d'une peinture qui absorbe la lumière du laser.

---

---

# **Chapitre 4 : Résultats de l'étude expérimentale**

---

---

- 4.1. Effet des diamètres du bac sur le régime de brulage (étude paramétrique)**
- 4.2. Changements des conditions d'essais**
- 4.3. Mesure des températures par thermographie infrarouge sur la paroi extérieure du bac**
- 4.4. Distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache**

*Dans ce chapitre on présente l'ensemble des résultats d'investigation expérimentale effectués sur les petits feux de bac. Les résultats se répartissent sur quatre parties. La première partie des travaux concerne l'étude de l'effet du diamètre du bac sur le régime de brulage, la seconde partie consiste à étudier l'influence des conditions d'essais sur le régime de brulage. La troisième partie résume les résultats de mesures de températures par thermographie infrarouge. Enfin la dernière partie est une étude préliminaire sur la distribution des vitesses dans le panache de fumées.*

#### **4.1. Effet des diamètres du bac sur le régime de brulage (étude paramétrique)**

##### **4.1.1. Dispositif expérimentale**

Le dispositif expérimental se compose d'une balance électronique de type Ohaus, modèle Balexus Explorer Pro dont la précision est de 0,1 g. Des bacs de différents diamètres dans lesquels la simulation du feu de nappe est réalisée. Une série de vingt thermocouples de type K est monté sur une perche ce qui nous permet de mesurer la température du combustible, la température de la paroi extérieur du bac et les températures sur l'axe central de la flamme et du panache. Un schéma représentant les différentes dimensions du montage est présenté dans la figure 4.1. Un système informatique d'acquisition en ligne de la perte de masse et des différentes températures est relié à l'installation, figure 4.2. Des photographies du montage sont disponibles en Annexe G

Les expériences sont réalisées en atmosphère libre avec cinq bacs de diamètre égal respectivement à 40, 60, 80, 100 et 120 mm. La même hauteur des bacs  $H_b = 20$  mm est utilisée. Ces bacs sont fabriqués en acier ( $\rho_b = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\lambda_b = 50 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) et sont constitués d'une collerette circulaire d'une épaisseur  $e = 2$  mm soudée sur un disque de 2 mm d'épaisseur, figure 4.3. Le combustible liquide utilisé est du Tétra Propylène Hydrogéné (TPH), de formule chimique  $C_{12}H_{26}$  et de densité  $\rho_c = 870 \text{ kg.m}^{-3}$ . La perte de masse du combustible est suivie en temps réel (une acquisition est prise toutes les secondes). Des vidéos sont également réalisées avec un caméscope numérique standard afin d'apprécier les éventuels changements de



comportement de la flamme au cours de l'essai. Les propriétés du combustible sont disponible en annexe B.

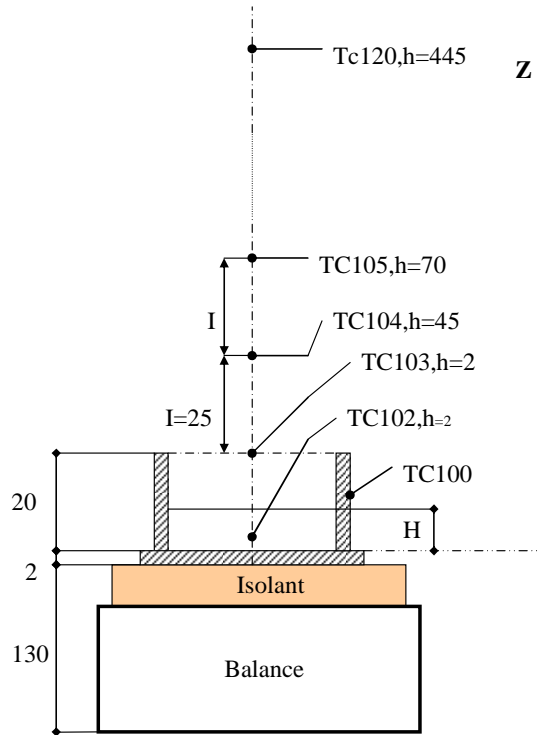


Fig. 4.1 : dispositif expérimental.

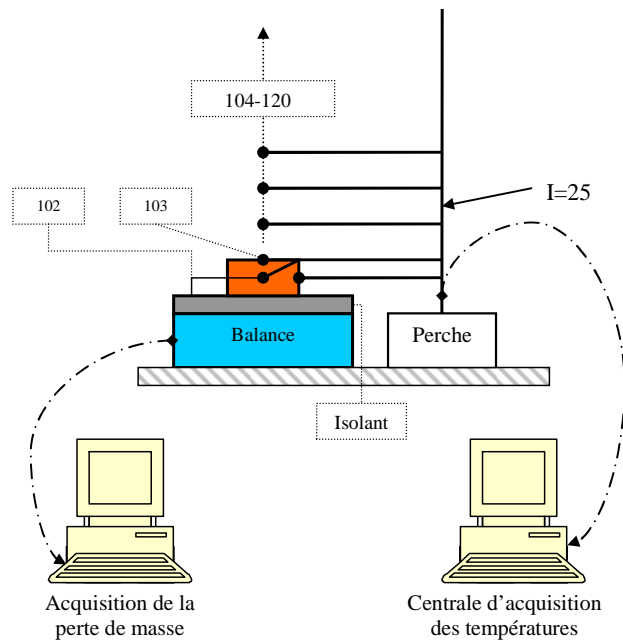


Fig. 4.2 : vue schématique du dispositif expérimental avec système d'acquisition.

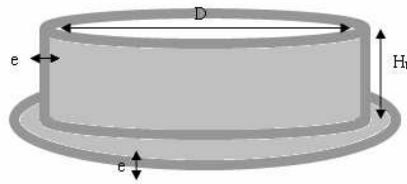


Fig. 4.3 : schéma descriptif du bac de combustible utilisé.

Avec TC : thermocouple ;

h : position du TC par rapport à la base du bac ;

H : épaisseur initiale du combustible ;

I : intervalle entre deux TC ;

1XX : numéros du TC ;

#### 4.1.2. Campagne D'essai

Cette campagne d'essais est réalisée pour une même hauteur initiale de combustible égale à 5 mm aux conditions résumées dans le tableau 4.1. Elle consiste à étudier l'effet du diamètre du bac sur la perte de masse.

Nom de l'essai	Diamètre du bac (mm)	Température ambiante initiale (°C)	Taux d'humidité relative (%)	Masse initiale combustible (g)
D40_H5	40	18.2	58	5,5
D60_H5	60	17.6	60	12,3
D80_H5	80	16.4	61	21,9
D100_H5	100	16.4	63	34,2
D120_H5	120	16.1	64	49.2

Tab. 4.1 : données d'essais de l'étude paramétrique.

#### 4.1.3. Calcul du débit de perte de masse

Les mesures expérimentales du débit de perte de masse en fonction du temps sont présentées pour le cas D40\_H5 sur la figure 4.4. À partir de cette courbe on déduit le débit de perte de masse à l'aide de la formule suivante :

$$\dot{m} = -\frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (4.1)$$

Pour pouvoir dériver cette dernière on se doit de lisser la courbe expérimentale. On utilise un Toolbox sur Matlab 7.1 pour procéder au lissage de la courbe expérimentale figure4.4.

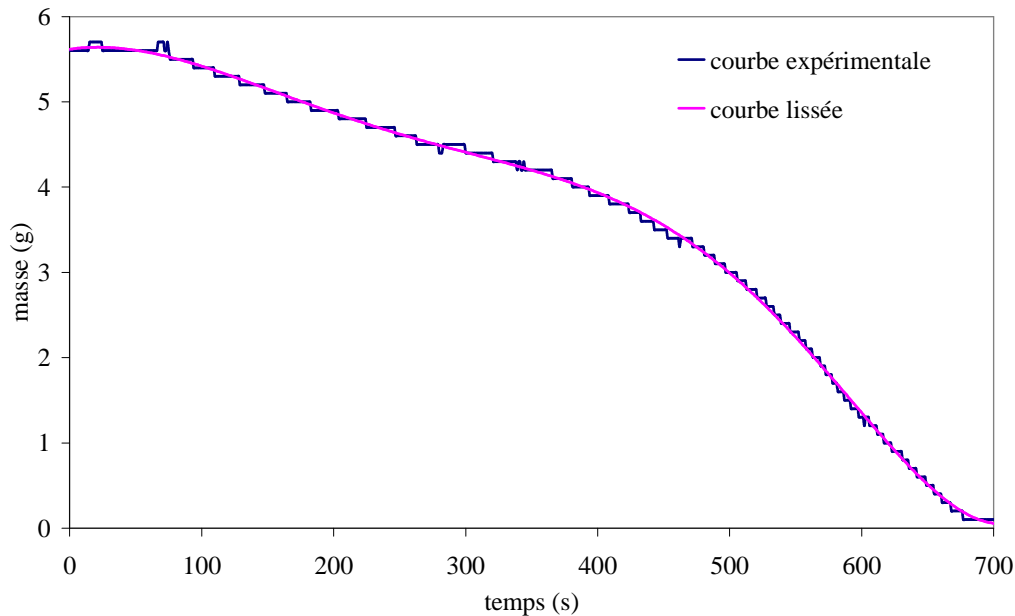


Fig. 4.4. : perte de masse pour l'essai D40\_H5.

#### 4.1.4. Résultats et interprétations

Pour l'ensemble des essais (D40\_H5 à D120\_H5), deux régimes différents ont pu être identifiés visuellement, figure 4.5 et quantitativement, figure 4.6. Des résultats obtenus pour les essais D80\_H5 et D100\_H5 sont présentés respectivement sur les figures 4.5 (photographies) et 4.6 (courbe de perte de masse et débit de perte de masse).

Après allumage, une phase de mise en régime de courte durée est observée. Suivi d'une phase quasi-stationnaire (q-s) au cours de laquelle le débit de perte de masse est quasi-constant. Lors de cette première phase, la flamme reste de petite taille (Régime 1, figure 4.6 et figure 4.5 (a)). Une seconde phase instationnaire est ensuite constatée, la flamme s'étire, sa hauteur augmente ainsi que le débit de perte de masse du combustible jusqu'à l'extinction du feu (Figure 4.5 (b) et Régime 2, Figure 4.6). Lors du régime 2, la formation d'un volume significatif de gaz entre la

surface liquide et la base de la flamme a pu être observée : la flamme se situe au dessus du bac puis tend à s'accrocher aux bords de celui-ci, contrairement à son comportement lors du régime 1 où elle reste à l'intérieur du bac Figure 4.5 (b). Des vidéos sont disponibles sur le CD joint à ce rapport.

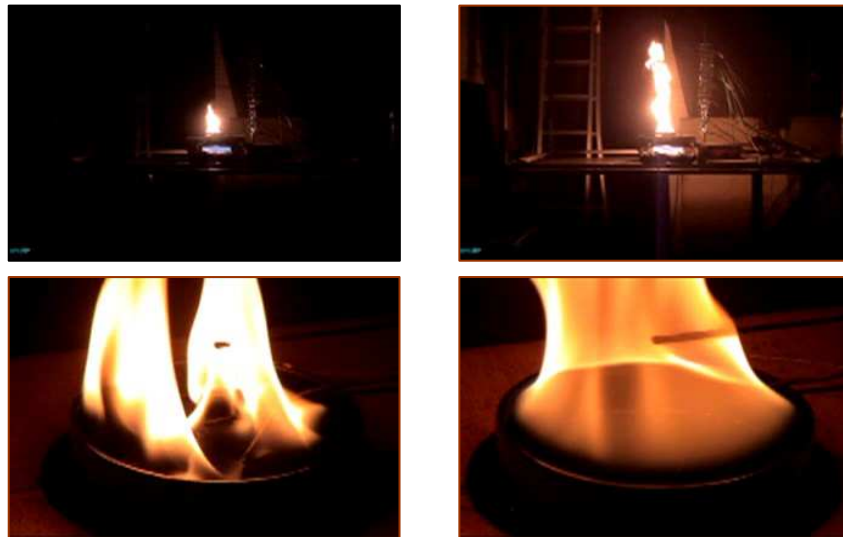


Fig. 4.5 : photographie de la flamme pour l'essai D80\_H5 : (a)  $t = 150$  s, (b)  $t = 400$  s.

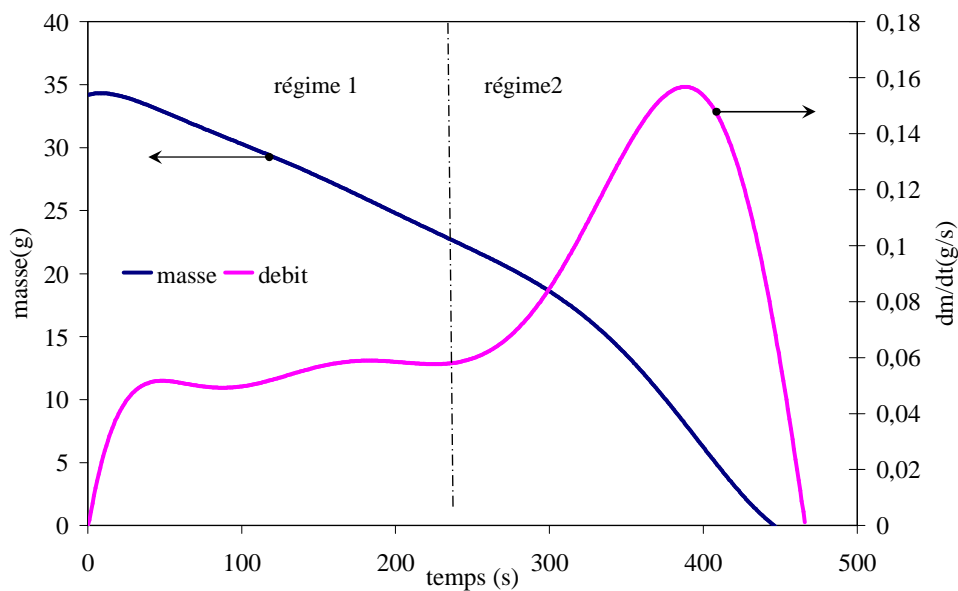


Fig. 4.6 : évolution temporelle de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour l'essai D100\_H5.

L'évolution temporelle des températures sur l'axe central de la flamme et du panache pour les essais D80\_H5 et D120\_H5 sont représentées respectivement dans les figures 4.7 et 4.8. Pour le reste des essais, les résultats sont groupés en Annexe H.

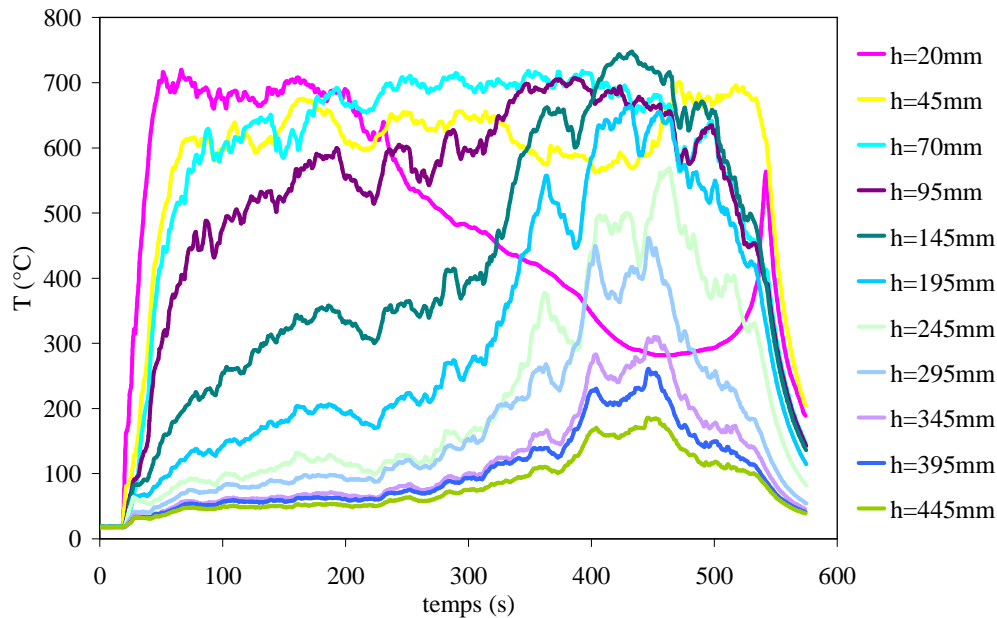


Fig.4.7 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D80\_H5.

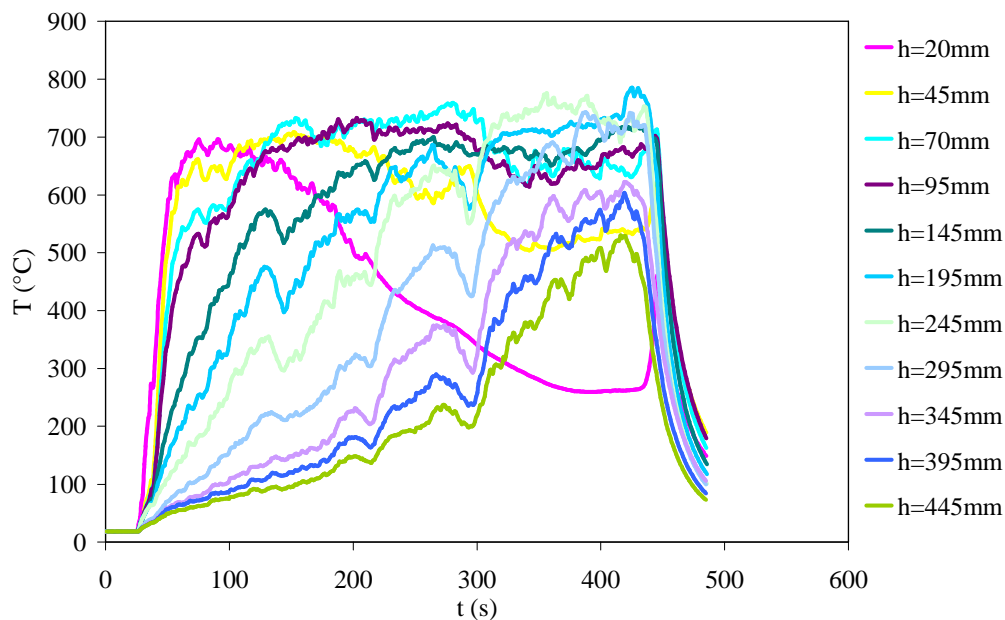


Fig. 4.8 : évolutions temporelles des températures sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D120\_H5.

On observe après allumage que les températures restent constantes sur le long de l'axe de la flamme et du panache sur un temps qui correspond à la durée du premier régime environ 210 s pour l'essai D80\_H5 et 155 s pour l'essai D120\_H5. La flamme est relativement basse. Elle se situe à la hauteur comprise entre 145 et 170 mm pour l'essai D80\_H5 et entre 245 et 270 mm pour l'essai D120\_H5. Au-delà, on constate que les températures commencent à augmenter de façon significative ceci s'explique par le fait que la flamme s'étire et augmente de hauteur. On évalue la hauteur de flamme durant le deuxième régime à la hauteur comprise entre 320 et 370 mm pour l'essai D80\_H5 et à une hauteur supérieure à 445 mm pour l'essai D120\_H5. On observe durant le même régime la diminution de la température juste au bord supérieur du bac ( $h=20\text{mm}$ ) pour les deux essais, ceci s'explique par le fait que la flamme n'est plus à l'intérieur du bac, mais elle se situe au-dessus de ce dernier et elle a tendance à s'accrocher à son bord. Par conséquent la température qui est mesurée par le thermocouple n'est plus celle de la flamme, mais c'est celle du volume de gaz qui se forme entre la nappe de carburant et la flamme.

La figure 4.9 représente les évolutions temporelles de la température à l'intérieur du bac (thermocouple situé à la hauteur  $h=2$  qui est initialement immergé à l'intérieur du combustible) et au bord du bac ( $h=20$ ) pour les deux essais D80\_H5 et D120\_H5.

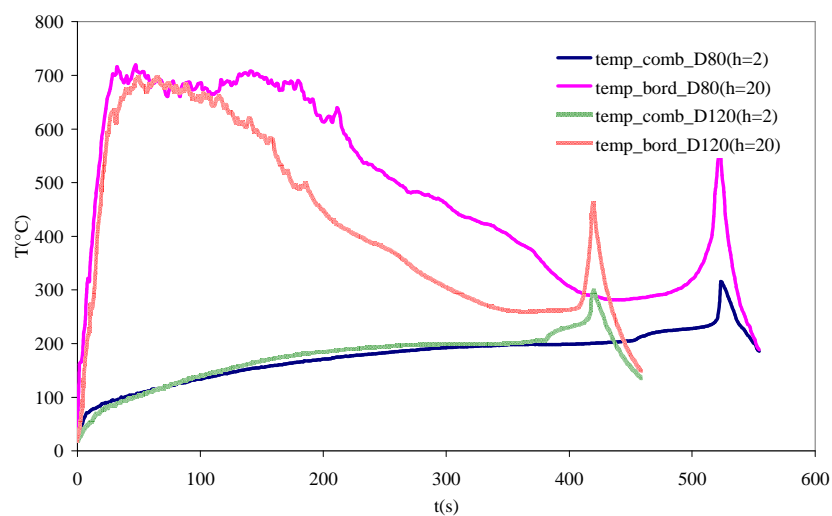


Fig. 4.9 : évolutions temporelles des températures à l'intérieur et aux bords des bacs D80 et D120.

On constate que températures au niveau du bord supérieur évoluent de la même manière pour les deux diamètres du bac. Entre 35 et 210 s pour l'essai D80\_H5 et entre 35 et 150 s pour l'essai D120\_H5 la température reste constante. Ces périodes correspondent au premier régime, ensuite elles diminuent pour les deux cas jusqu'à atteindre 260°C et 280°C, respectivement pour le diamètre de 120mm et 80mm. La diminution de la température s'explique par le fait que la flamme est décrochée du bac et que la température mesurée est celle du volume de gaz se situant entre le front de flamme et le combustible liquide. La température par la suite augmente jusqu'à atteindre un pique entre 480 et 520 s pour l'essai D80\_H5 et entre 410 et 420 s pour l'essai D120\_H5, cela est dû au fait que la flamme descend en fin de la phase de combustion.

On observe le même comportement pour l'évolution de la température du combustible pour les deux essais. Entre 0 et 450 s pour l'essai D80\_H5 et entre 0 et 380 s pour l'essai D120\_H5, la température augmente jusqu'à atteindre 205°C et 210°C respectivement pour l'essai D80\_H5 et D120\_H5. En suite on observe une augmentation subite de la température à environ 230°C pour les deux essais, on explique cette dernière par le fait que le thermocouple n'est plus immergé dans le combustible mais mesure la température à l'interface (changement de phase) ou bien la température des gaz du fait de la régression de la nappe de combustible. On observe un pique vers la fin, on explique l'apparition de ce dernier par le fait que le front de flamme revient à l'intérieur du bac.

Dans la figure 4.10 on présente l'évolution des températures sur la paroi externe du bac pour le diamètre  $D=80\text{mm}$  et  $D=120\text{mm}$  à une hauteur de 10 mm en partant de la base du bac, On observe la même allure pour les deux diamètres. La température d'augmente jusqu'à atteindre un pique correspond au moment où la flamme revient à l'intérieur du bac. L'évolution de température est légèrement supérieure pour le bac de diamètre 120 mm. Cela s'explique par le fait que le plus grand diamètre génère une source de chaleur plus puissante.

Sur la figure 4.11, l'évolution du débit de perte de masse pour chaque diamètre du bac est présentée.

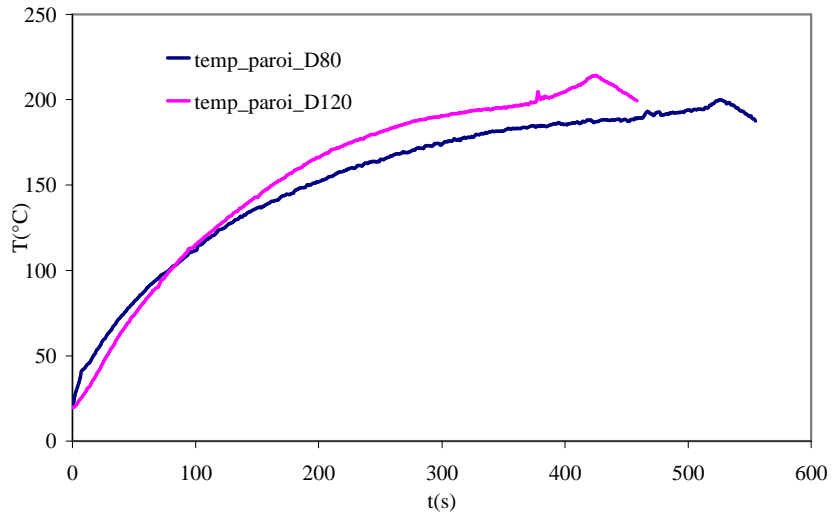


Fig. 4.10 : évolutions temporelles des températures aux niveaux des bacs de diamètres 80 et 120 mm.

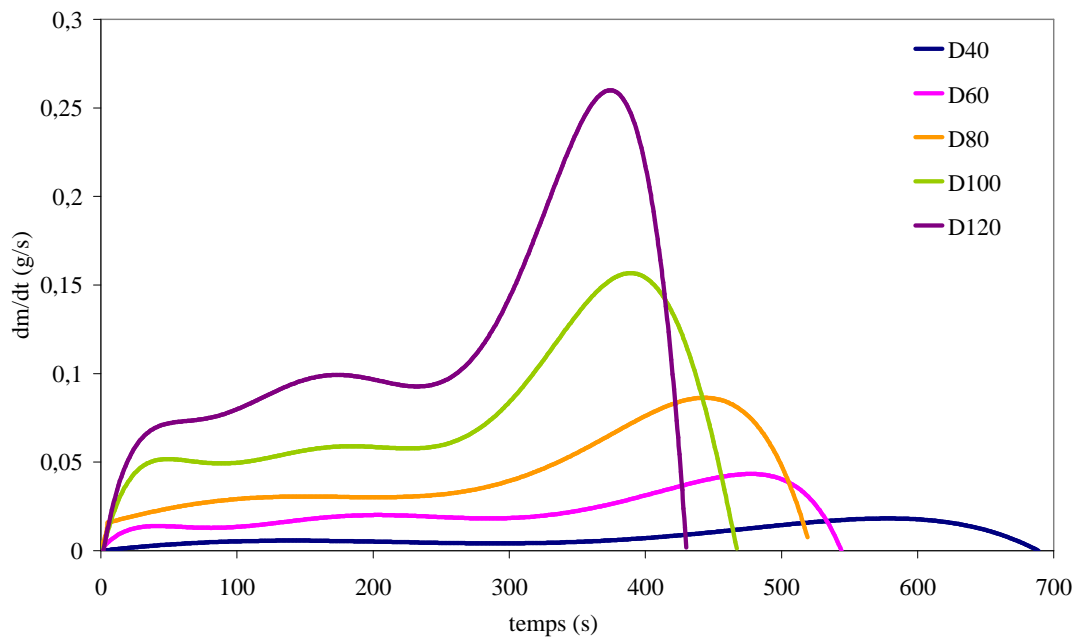


Fig. 4.11 : évolution temporelle des débits de perte de masse du combustible pour les différents diamètres.



Pour le plus petit diamètre de bac ( $D = 30$  mm), les différences entre les régimes 1 et 2 précédemment mentionnés sont moins marquées et l'observation visuelle montre que la flamme reste laminaire sur toute la durée du test. Ce diamètre correspond à un mode de brûlage convectif laminaire ( $D < 0.05$ ) [3], ce qui explique son comportement singulier.

Pour les autres diamètres de bac, les allures des courbes sont similaires. Le tableau 2 présente les débits de perte de masse moyens calculés sur la durée totale de l'essai ( $\dot{m}_{total}$ ) et sur la durée de la phase quasi-stationnaire ( $\dot{m}_{q-s}$ ). Les débits de perte de masse surfaciques moyens calculés sur la phase de combustion ( $\dot{m}_{total}''$ ) et sur la phase quasi-stationnaire ( $\dot{m}_{q-s}''$ ) sont aussi présentés dans le tableau 4.2 ainsi qu'une comparaison entre ces deux valeurs ( $\Delta \dot{m}'' / \dot{m}_{total}''$ ).

Essais	Durée de la phase de combustion	$\dot{m}_{total}$	$\dot{m}_{total}''$	Durée de la phase quasi stationnaire	$\dot{m}_{q-s}$	$\dot{m}_{q-s}''$	$\Delta \dot{m}'' / \dot{m}_{total}''$
	s	mg.s <sup>-1</sup>	g.s <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>	s	mg.s <sup>-1</sup>	g.s <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>	%
D40_H5	654	8.8	7.1	360	4.9	3.9	44.3
D60_H5	566	21.8	7.7	240	15.5	5.2	32.5
D80_H5	514	42.6	8.4	210	31.5	6.3	25.0
D100_H5	461	74.4	9.4	200	55.4	7.2	19.15
D120_H5	410	123.0	10.9	155	92.5	8.2	25.6

Tab. 4.2 : résultats d'essai de l'étude paramétrique.

D'après le tableau 4.2, la durée de la phase quasi stationnaire semble dépendre du diamètre, cette dernière diminue avec l'augmentation du Diamètre. On peut observer sur la figure 4.12 que le débit de perte de masse surfacique moyen calculé sur la phase quasi stationnaire augmente linéairement avec le diamètre.

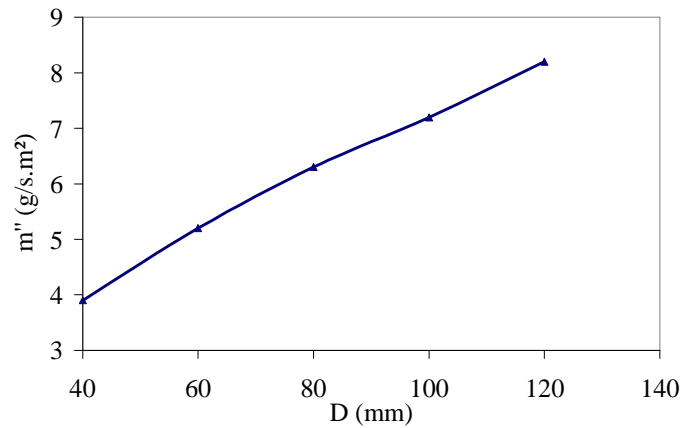


Fig. 4.12 : évolution du débit de perte de masse surfacique suivant le diamètre.

Dans le tableau 4.3 sont présentés les hauteurs approximatives de flammes obtenues expérimentalement et celle calculées par la corrélation de Heskestad [12] durant la phase quasi-stationnaire.

$$L / D = -1,02 + 0,235 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} / D \quad (4.2)$$

Les hauteurs de flammes expérimentales sont obtenues par l'intermédiaire des températures mesurées.

Essai	$\dot{m}_{q-s}$ ( $mg.s^{-1}$ )	$\dot{Q}$ (kw)	$L_{heskestad}$ (mm)	$L_{exp}$ (mm)
D40_H5	4.9	0.218	86.9	70-95
D60_H5	15.5	0.689	141.3	120-145
D80_H5	31.5	1.4	187.3	145-170
D100_H5	55.4	2.463	235.1	170-195
D120_H5	92.5	291.35	291.35	245-270

Tab. 4.3 : comparatifs des hauteurs.

Avec  $\dot{Q}$  : puissance du foyer ;

$L_{heskestad}$  : hauteur déterminée par la formule de Heskestad ;

$L_{exp}$  : hauteur déterminée expérimentalement.

On constate que la hauteur de flamme calculée par la corrélation de Heskestad est bon accord avec hauteurs mesurées expérimentalement pour les diamètres de bac de notre étude. En effet, la corrélation de Heskestad est validée pour nos résultats.

Au travers de cette étude paramétrique on peut conclure que sur l'ensemble des essais, deux régimes différents lors du brûlage ont été identifiés, le premier caractérisé par une phase stationnaire et le second instationnaire pour lequel le débit de perte de masse augmente de façon significative et la flamme s'allonge et se situe au-dessus du bac.

Durant le régime stationnaire, le débit de perte de masse surfacique augmente linéairement avec le diamètre du bac. La durée de la phase quasi stationnaire est inversement proportionnelle au diamètre.

## **4.2. Changement des conditions d'essais**

On utilise le même dispositif expérimental décrit pour la campagne d'essais précédente. Tous les essais sont réalisés en atmosphère libre. Les nouvelles conditions d'essais concernent l'isolation du bac en feu.

### **4.2.1. Immersion du bac dans de l'eau**

#### **4.2.1.1. Description de l'essai**

Le bac de 80 mm de diamètre est immergé dans un autre bac d'eau de plus grande dimension. On remplit ce dernier avec une masse d'eau de 240g jusqu'au bord supérieur du petit bac figure 4.13.

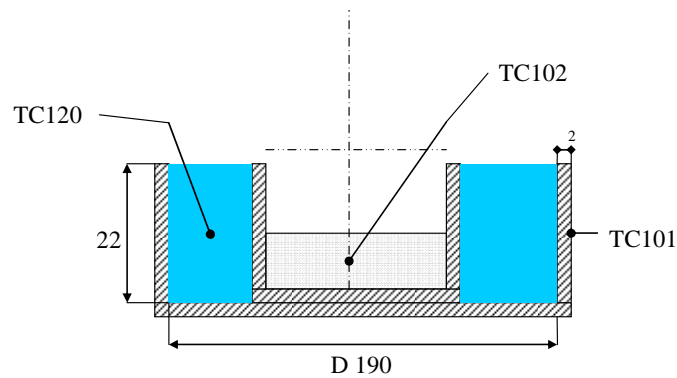


Fig. 4.13 : dispositif d'isolation du bac à feu par de l'eau.

A fin de suivre l'évolution de la température de l'eau on place un thermocouple dans le bac de grande dimension au milieu de l'espace inter annulaire. Pour pouvoir comparer les résultats on choisit une épaisseur initiale de carburant  $H=5\text{mm}$ .

#### 4.2.1.2. Résultats et interprétations

Visuellement on ne distingue pas les deux régimes. Pendant toute la durée de l'essai la flamme reste à l'intérieur du bac avec une hauteur constante.

Dans la figure 4.14 on peut constater que les températures mesurée sur l'axe de la flamme et sur le panaches restent pratiquement constantes tous le long de l'essai.

La figure 4.15 montre que la température de l'eau augmente jusqu'à atteindre un maximum de  $70^{\circ}\text{C}$ . Cependant nous avons pu constater visuellement l'évaporation de l'eau au courant de l'essai et une ébullition locale sur les parois du bac.

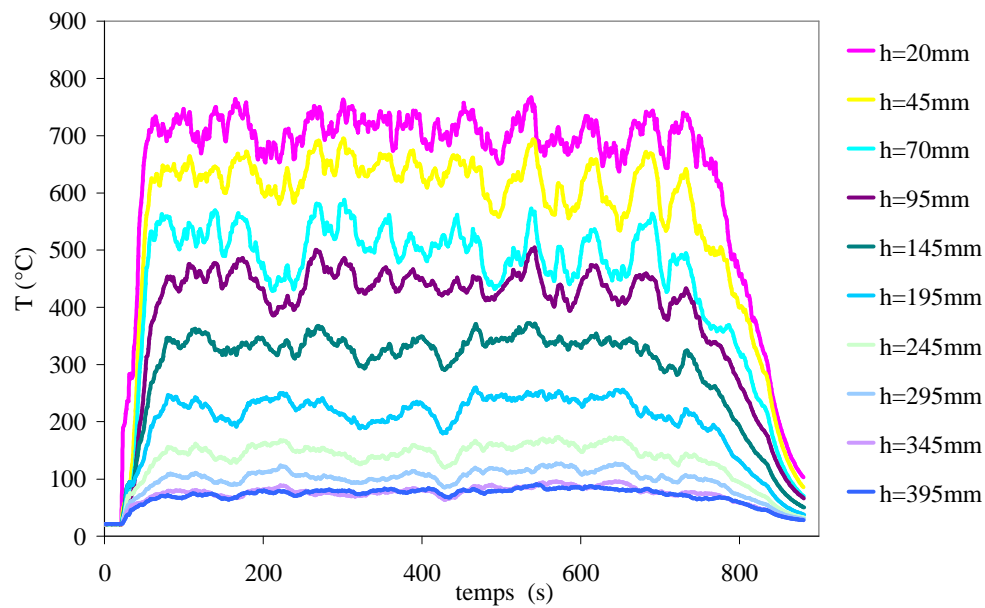


Fig. 4.14 : évolution temporelle de la température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai avec une isolation avec de l'eau.

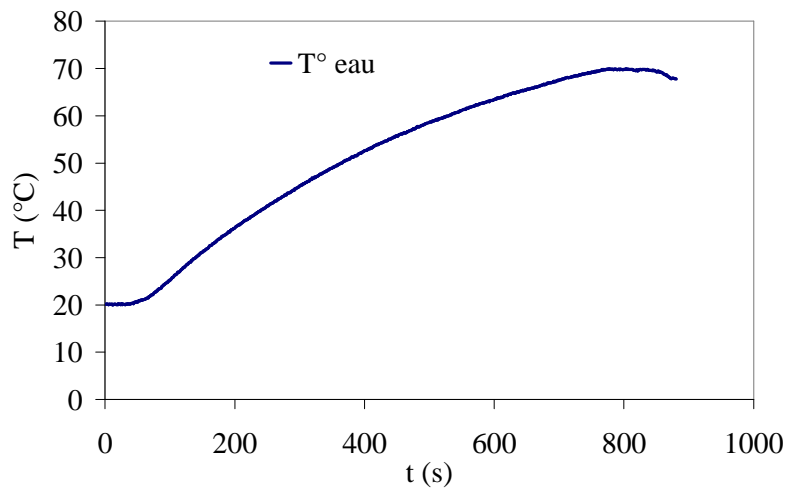


Fig. 4.15 : évolution de la température d'eau.

On ne peut pas mesurer la perte de masse directement car la mesure est incorrecte du fait que l'eau commence à s'évaporer à un certain temps de l'essai. A partir de la courbe de perte de masse figure 4.16, on peut distinguer une zone linéaire et conforter par les résultats visuelles et les relevés de températures. On a extrapolé cette zone linéaire par une régression linéaire en utilisant Matlab. Les résultats de cette ajustement sont visibles sur la figure 4.16.

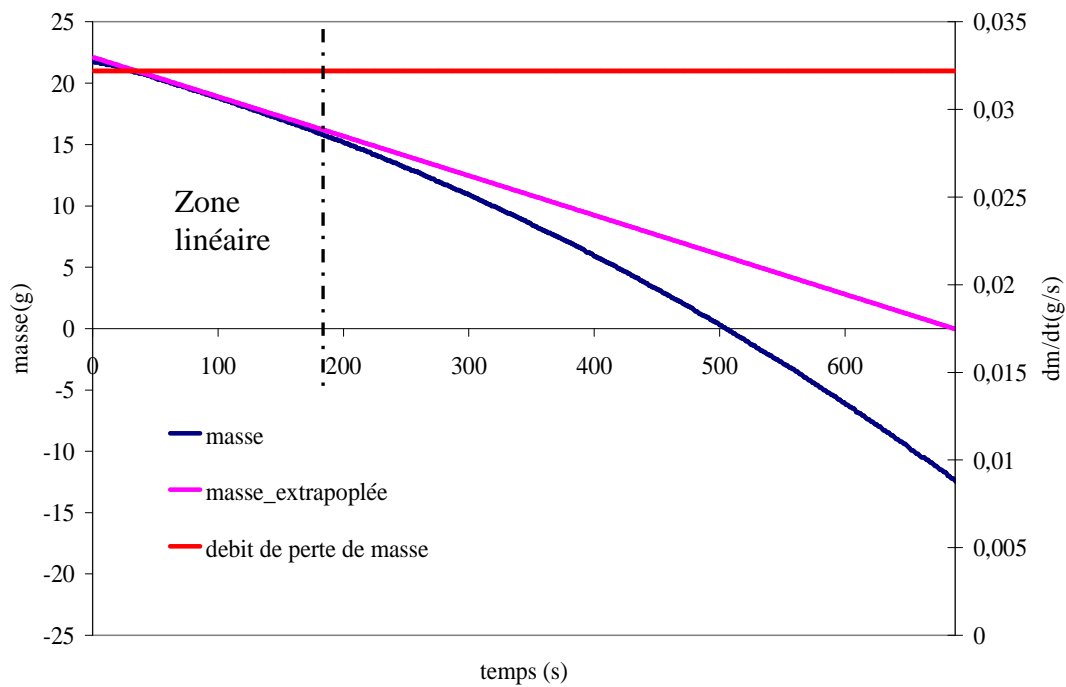


Fig. 4.16 : évolution de la perte de masse et du débit de perte de masse pour l'essai avec de l'eau.

En dérivant la perte de masse on obtient un débit de perte de masse qui est de l'ordre de  $32,2 \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ . On remarque que ce dernier correspond au débit de perte de masse obtenu avec le bac de 80 mm de diamètre durant le premier régime pendant la première campagne d'essais.

L'immersion du bac dans de l'eau donne un seul régime de combustion quasi-stationnaire qui correspond au premier régime dans le cas sans eau.

## 4.2.2. Changement du matériau constituant le bac

### 4.2.2.1. Description de l'essai

On utilise pour cela un bac en verre de marque Pyrex<sup>®</sup> de 89 mm de diamètre, 19 mm de hauteur et 2 mm d'épaisseur de paroi ( $\lambda_b=1.13 \text{ w}\cdot\text{m}^{-1}\text{k}^{-1}$ ,  $\rho_b=2230 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

On garde le même rapport hauteur initiale de combustible, hauteur de bac pour tous les essais ( $H/H_b(\text{cas acier})=H/H_b(\text{cas pyrex})$ ). La hauteur de combustible initiale est de 4.75mm, qui est équivalente à une masse de combustible initiale de 25.7g.

#### 4.2.2.2. Résultats et interprétations

Après allumage, une phase de mise en régime de courte durée est d'abord observée. Une phase quasi-stationnaire (q-s) apparaît ensuite au cours de laquelle le débit de perte de masse est quasi-constant et le reste ainsi jusqu'à l'extinction, figure 4.17. On évalue le débit de perte de masse pour ce cas à 43,2 mg/s.

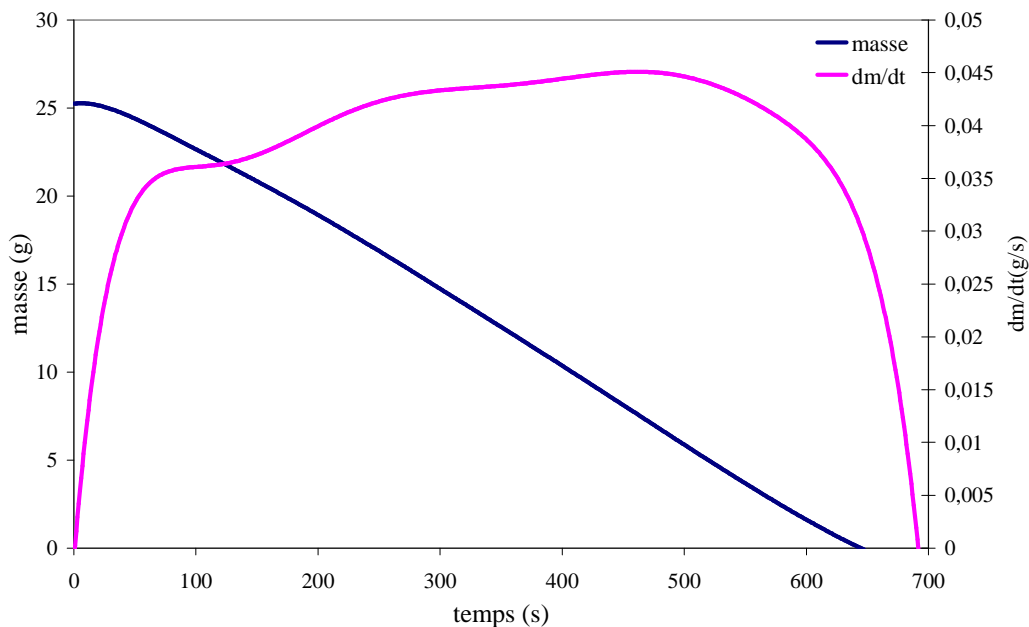


Fig. 4.17 : évolution temporelle de la masse du combustible et du débit de perte de masse pour le bac en Pyrex<sup>®</sup>.



Fig. 4.18 : photographie de la flamme à  $t= 400$  s pour le bac en Pyrex<sup>®</sup>.

Visuellement on observe que la flamme se situe très vite après l'allumage au bord du bac, figure 4.18. La flamme reste de hauteur constante, elle ne s'étire pas. Une vidéo de l'essai est disponible sur le CD joint à ce rapport.

On présente sur la figure 4.19, l'évolution temporelle de la température sur l'axe central de la flamme et du panache. On constate que les températures sont approximativement constantes sauf pour le cas correspondant à TC  $h=20$ , qui est situé juste au bord du bac.

Initialement la température croît rapidement durant un laps de temps très court. Cette température est celle de la flamme. Ensuite elle diminue rapidement jusqu'à la température de  $420^{\circ}\text{C}$  puis elle se stabilise. Ceci s'explique par le fait de l'éloignement du front de flamme du TC. On remarque que cette température est plus élevée que celle qui a été enregistrée lors du deuxième régime, ceci s'explique par le fait que la flamme reste accrocher au bord, ce qui n'est pas le cas pour le second régime où elle se situe au dessus du bac en essayant de s'accrocher au bord. A la fin de l'essai la température recommence à augmenter car la flamme descend à l'intérieur du bac.

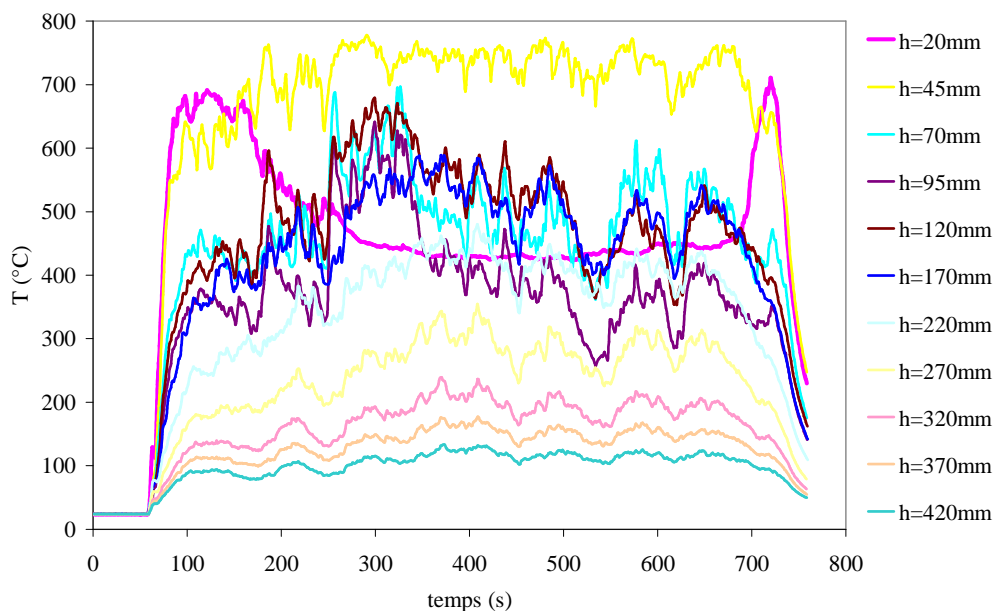


Fig. 4.19 : l'évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache.



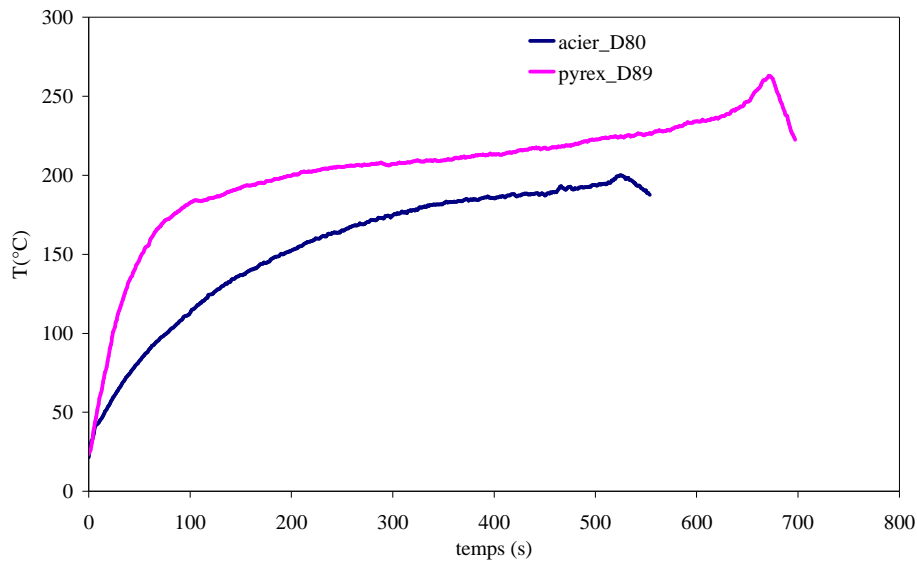


Fig. 4.20 : évolution temporelle de la température du bac de 89 mm de diamètre en Pyrex<sup>®</sup> et le bac en acier de 80 mm de diamètre.

Sur la figure 4.20 sont représentées respectivement l'évolution de la température du bac en Pyrex<sup>®</sup> (pyrex\_D89) et du bac en acier (acier\_D80). On constate que la température du bac en verre évolue plus rapidement que la température du bac en acier durant les cents premières secondes. L'évolution est progressive par la suite. L'augmentation brutale à la fin de l'essai s'explique par le retour de la flamme vers l'intérieur du bac.

On peut conclure que l'utilisation d'un bac de faible conductivité thermique donne un seul régime de combustion quasi-stationnaire durant toute la phase de combustion.

### 4.2.3. Isolation du bac en acier avec du sable

#### 4.2.3.1. Description de l'essai

On utilise un bac de 80 mm de diamètre en acier que l'on immerge dans un bac de plus grande dimension qui contient du sable de chantier relativement humide,

figure 4.21. La conductivité du sable humide est de  $2.7 \text{ w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et celle du sable sec est de  $0.35 \text{ w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

On utilise une hauteur initiale de combustible de 5 mm pour pouvoir comparer les résultats de cet essai aux résultats précédents.

Une photographie du montage est disponible en annexe G.

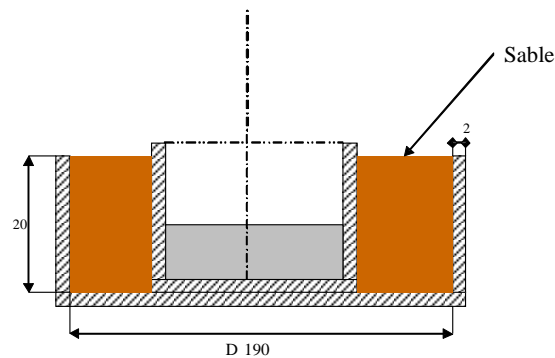


Fig. 4.21 : dispositif d'isolation du bac à feu par le sable.

#### 4.2.3.2. Résultats et interprétations

Sur la figure 4.22 on constate que la masse finale mesurée sur la balance est négative. Elle correspond à la masse d'eau qui s'est évaporée durant la phase de combustion. On évalue cette dernière à environ 5 g. L'analyse de la courbe du débit de perte de masse montre qu'après la phase de mise en régime le débit de perte de masse augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale puis il diminue. Ce dernier reste quasi-constant durant le reste de l'essai. Le débit de perte de masse moyen sur cette période est de  $36.2 \text{ mg/s}$ . Il est supérieur à celui obtenu durant le premier régime sans sable ( $31.5 \text{ mg/s}$ ). On explique la variation du débit de perte de masse au début par l'évaporation de l'eau contenu dans le sable. La visualisation montre que la flamme ne s'étire pas. La flamme est accrochée au bord du bac. Elle se comporte de la même manière que pour le bac en Pyrex<sup>®</sup>.

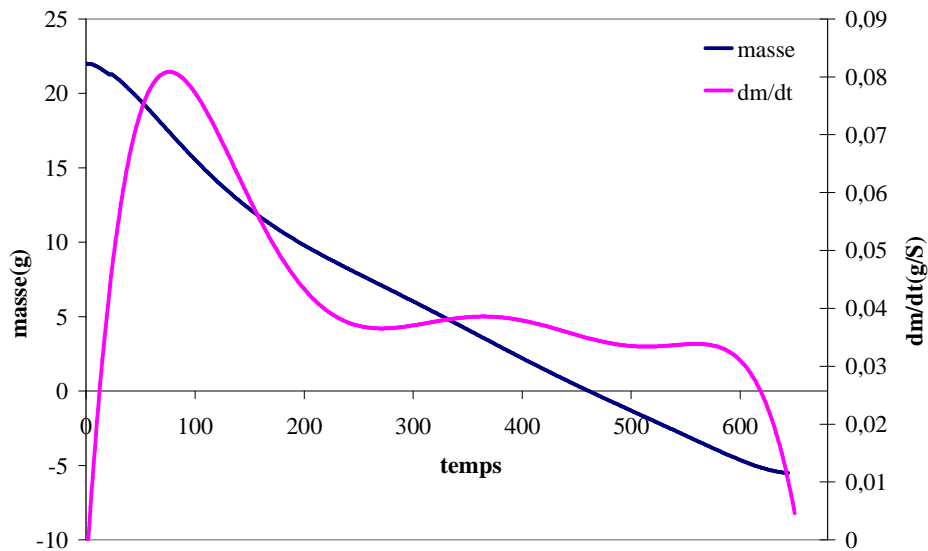


Fig. 4.22 : évolution de la perte de masse et du débit de perte de masse pour le cas du sable.

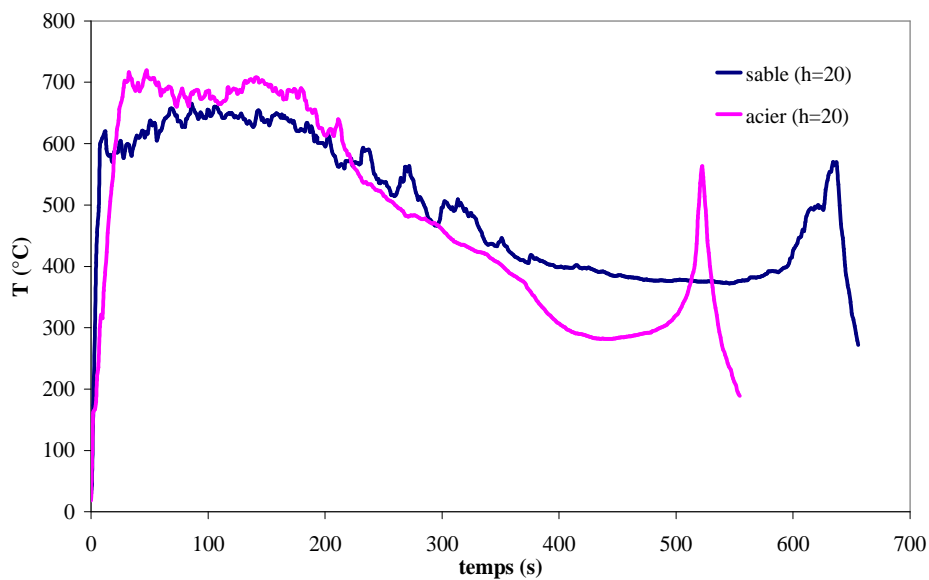


Fig. 4.23 : évolution temporelle de la température aux bords des bacs d'acier de 80 mm de diamètre avec et sans sable.

La figure 4.23 représente l'évolution de la température au bord du bac en acier ( $h=20$  mm) dans les deux cas d'essai, bac isolé avec du sable et bac non isolé. On observe que la température est au début élevée. Elle correspond à la température

de flamme, pour les deux cas. Une diminution progressive est enregistrée jusqu'à atteindre une température d'environ 400°C pour le bac isolé. Elle devient quasi-constante entre 380 et 600 s. Cette température est plus élevée que celle qui est enregistrée durant le deuxième régime pour le cas sans sable. Cela s'explique par le fait que la flamme dans le cas avec sable se situe au bord du bac et non pas décrochée du bac comme c'est le cas pour le second régime.

L'isolation du bac avec du sable donne un seul régime qui est quasi-stationnaire durant toute la phase de combustion. Il ne correspond pas au premier régime observé mais à un nouveau régime de brulage.

### **4.3. Mesure des températures par thermographie infrarouge sur la paroi extérieure du bac**

#### **4.3.1. Dispositif expérimentale**

Le dispositif expérimental se compose d'une balance électronique de type Ohaus, modèle Balexus Explorer Pro dont la précision est de 0,1 g. De deux bacs l'un en verre de marque Pyrex<sup>®</sup> ( $\lambda_b=1.13 \text{ w.m}^{-1}\text{k}^{-1}$ ,  $\rho_b=2230 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\varepsilon_b=0.89$ ) et l'autre en acier ( $\rho_b = 7800 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $\lambda_b= 50 \text{ W.m}^{-1}\text{k}^{-1}$ ,  $\varepsilon_b=0.85$ ). Le bac en acier est le même que celui utilisé lors de l'étude paramétrique. Le bac en pyrex est de 89 mm de diamètre, 19 mm de hauteur et 2 mm d'épaisseur de paroi.

Une série de vingt thermocouples de type K est montée sur une perche qui nous permet de mesurer la température du combustible, la température de la paroi extérieure du bac et les températures sur l'axe central de la flamme et du panache. De plus on dispose d'une caméra thermique de marque *FLYR*<sup>®</sup> (caméra infrarouge).

Un schéma représentant le montage est présenté dans la figure 4.24. Une photo du montage est disponible en Annexe G.

Le montage de la caméra thermique est fait de façon à observer le bac de face. Elle est commandée par le logiciel *ThermaCAM*<sup>™</sup> *Researcher*. Le logiciel *ThermaCAM Researcher* possède des fonctionnalités d'analyse et d'acquisition à

haute vitesse. Ce logiciel enregistre, relit et analyse les images et les données infrarouges directement à partir de la caméra thermique.

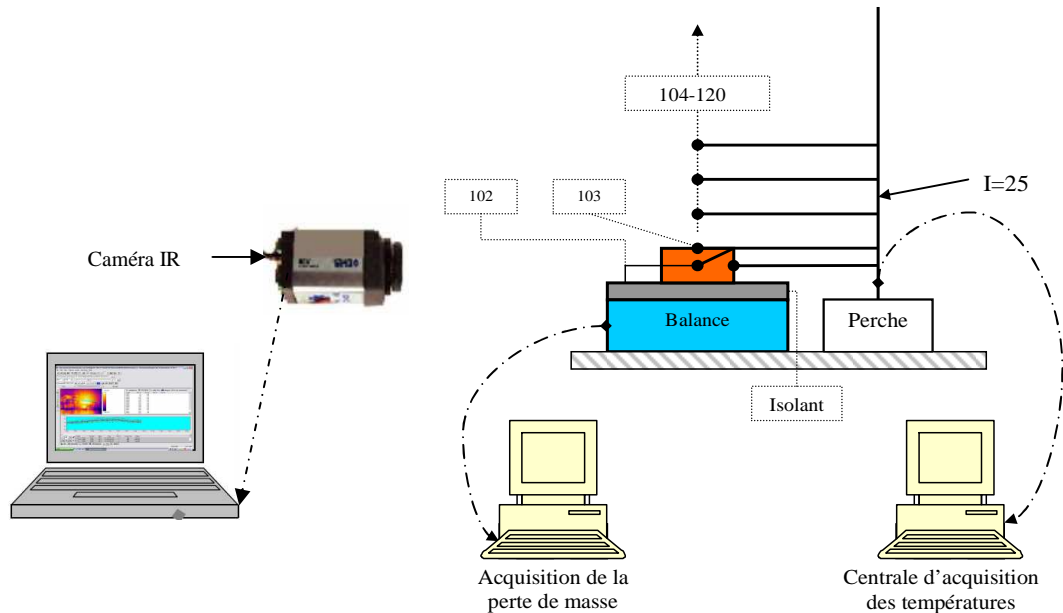


Fig. 4.24 : vue schématique du dispositif expérimental.

Avec IR : infrarouge.

Pour améliorer l'émissivité du bac en acier, on a entrepris de le peindre à l'aide d'une peinture noire opaque qui résiste à de hautes températures.

#### 4.3.2. Campagne d'essais

Cette campagne d'essais vise à étudier et caractériser les deux matériaux (acier, verre) pendant la phase de combustion et à déterminer la distribution des températures le long de la paroi extérieure du bac. Les données d'essai sont résumées dans le tableau 4.4.

On veille à grader le même rapport hauteur bac, épaisseur initiale de combustible pour les deux essais.

Essai	Nature du bac	Diamètre du bac (mm)	Epaisseur initiale de combustible (mm)	Masse initiale de combustible (g)	Température ambiante (°C)	Taux d'humidité (%)
D80_H5_IR	acier	80	5	21,9	23.7	51
D89_H4.75_IRI	Verre	89	4.75	25.7	25.1	47

Tab. 4.4 : données d'essais pour les mesures thermographiques.

#### 4.3.3. Détermination de l'émissivité des deux matériaux

L'émissivité du Pyrex<sup>®</sup> est de 0,89 à 25°C (donnée constructeur). Celle de l'acier est de 0.8. Ce paramètre est d'une importance capitale car il est très influant dans l'exactitude de la mesure.

Pour pouvoir exploiter les enregistrements effectués par le logiciel *ThermaCAM Researcher*, il nous faut une émissivité pour les deux matériaux.

Les valeurs de l'émissivité de la littérature ( $\varepsilon = 0.89$  pour le Pyrex et  $\varepsilon = 0.80$  pour l'acier) sont utilisées pour configurer le logiciel *ThermaCAM Researcher* et obtenir les évolutions temporelles de température en un point donné de la surface extérieure du bac.

Nous avons choisis un point situé à mi-hauteur de la paroi, figure 4.25 et 4.26. Les résultats sont comparés aux mesures obtenues avec les thermocouples à la même hauteur.

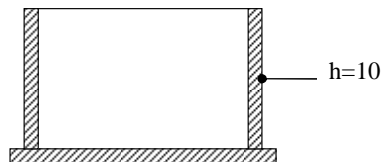


Fig. 4.25 : représentation schématique du point de mesure de la température sur la paroi extérieure.

On peut voir sur la figure 4.27 le menu « settings » qui nous permet de régler certains paramètres liés à l'objet notamment son émissivité et aussi d'autres paramètres comme les conditions ambiantes.

Pour le pyrex le résultat obtenu avec l'émissivité de 0.89 est satisfaisant, il est en bon accord avec les valeurs obtenues par le thermocouple.

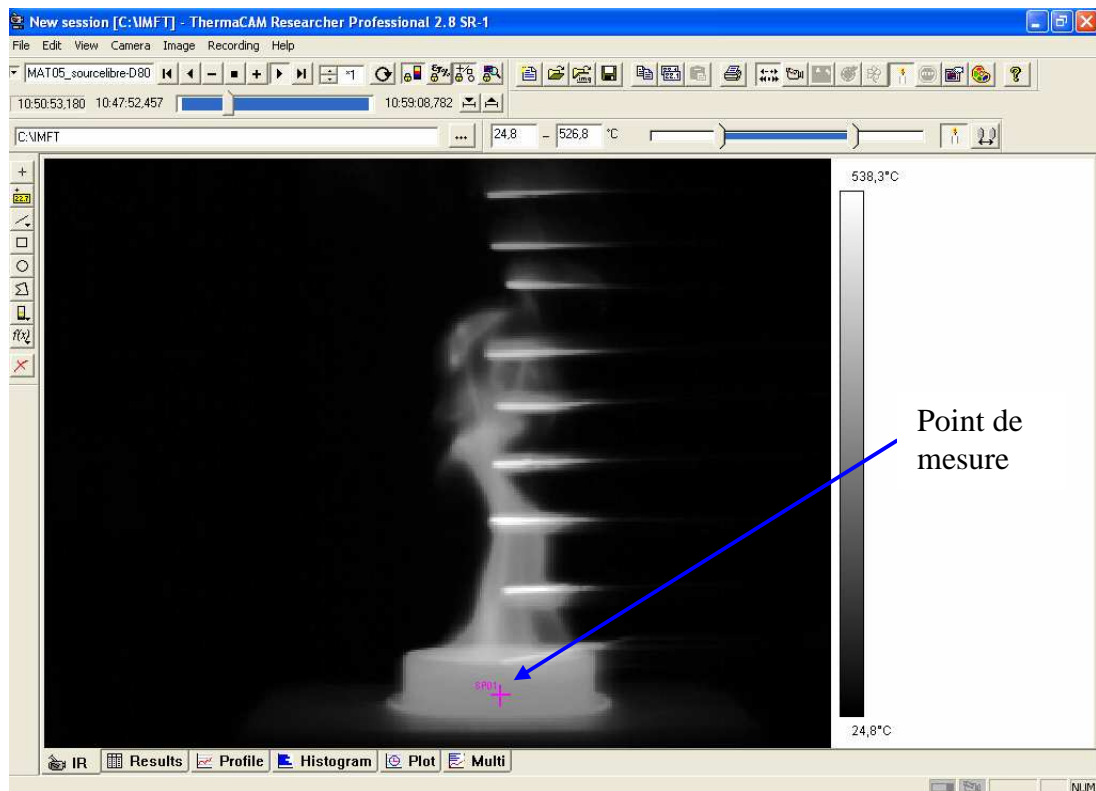


Fig. 4.26 : choix du point de mesure.

Sur la figure 4.28 en présente la mesure effectuée par camera IR pour l'acier ( $\varepsilon = 0.80$ ). Les températures sont élevés (données\_IR\_ $\varepsilon=0.80$ ) comparés à celle du thermocouple (données\_TC). Les valeurs de l'émissivité de 0,92 et 0.90 ont été expérimentées pour déterminer la sensibilité de l'évolution de la température relativement à ce paramètre. Les évolutions de la température pour  $\varepsilon = 0,92$  et  $\varepsilon = 0,90$  sont en bon accord avec l'évolution de la température obtenue par thermocouple.

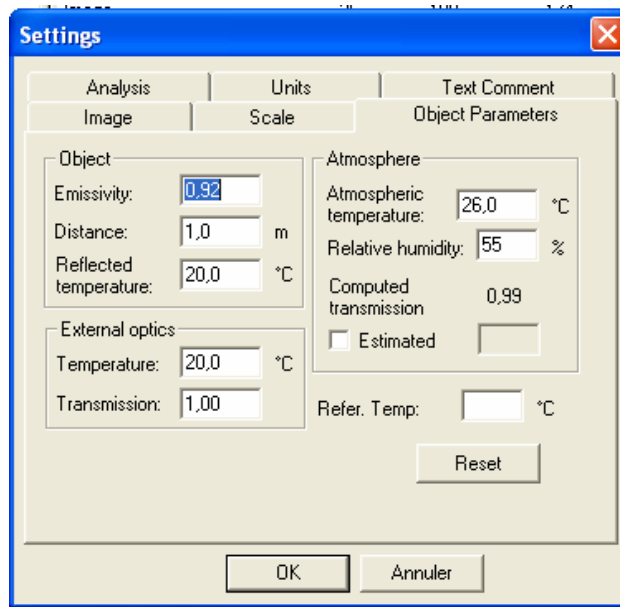


Fig. 4.27 : menu de réglage du logiciel ThermoCAM Researcher.

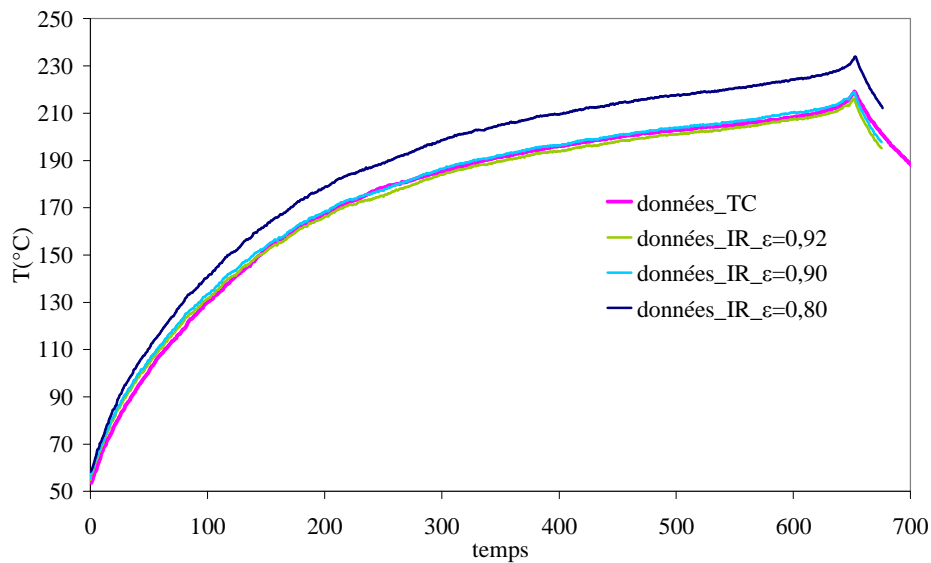


Fig. 4.28 : détermination de l'émissivité du bac en acier.

Les bons résultats pour  $\varepsilon = 0,90$  et  $\varepsilon = 0,92$  s'expliquent par le fait que le bac à feu est peint en noir ce qui améliore son émissivité.

Les valeurs de l'émissivité de 0,89 pour le Pyrex et 0,91 pour l'acier sont retenues pour l'ensemble des essais restant à effectués.



#### 4.3.4. Résultats et interprétations

Pour chaque bac nous avons choisis de mesurer les températures sur différentes hauteurs le long des parois extérieures.

A l'aide du logiciel ThermaCAM Researcher nous avons placé 3 points de mesures sur la hauteur des bacs comme schématisé sur la figure 4.29. (Annexe I):

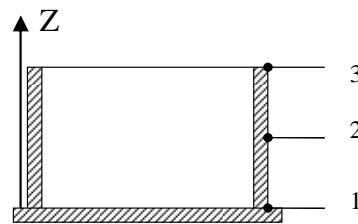


Fig. 4.29 : schéma de repartition des points de mesure.

Avec 1, 2, 3, désignent respectivement pour le bac en acier  $h=0$ ,  $h=10$ ,  $h=20$  et pour le bac en pyrex  $h=0$ ,  $h=10$ ,  $h=19$ .

Sur la figure 4.30 on présente les images thermographiques des deux bacs en feu à l'instant  $t=180$  s (ce temps correspond au premier régime pour le bac en acier). La distribution des températures sur la paroi du bac en acier est quasi-uniforme, contrairement au cas du bac en verre où l'on peut constater une forte nuance entre le bas et le haut du bac ce qui implique une différence de température.

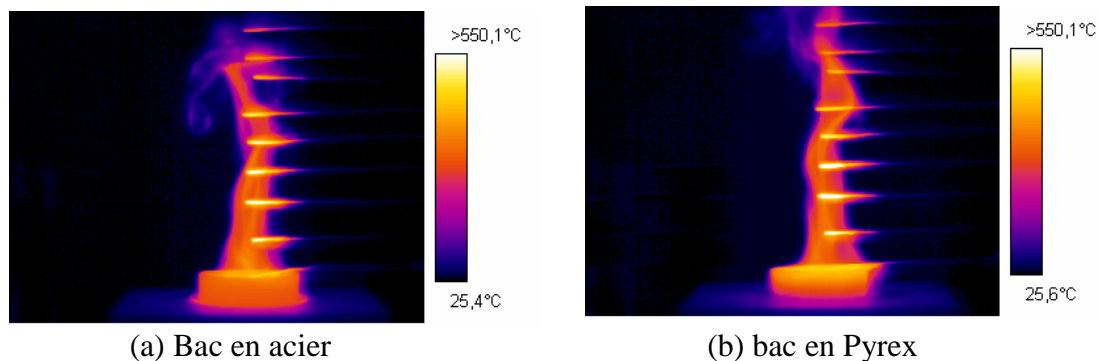
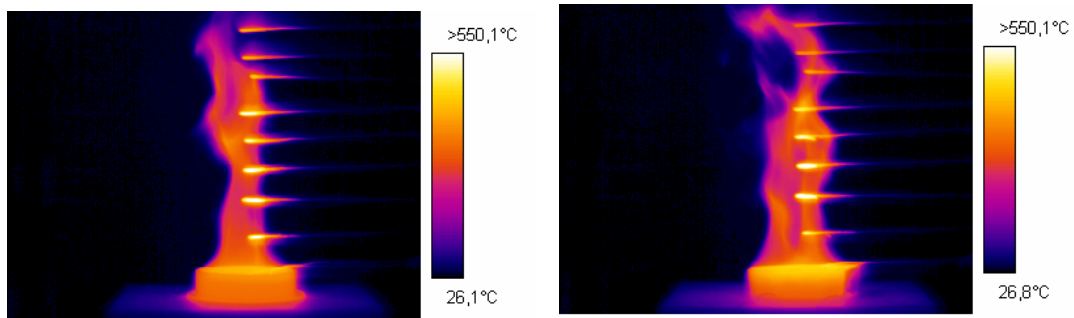


Fig. 4.30 : images thermographique des deux bacs à  $t=180$ s.



(a) bac en acier

(b) bac en Pyrex

Fig. 4.31 : images thermographique des deux bacs à  $t = 400$  s.

On peut constater sur la figure 4.31, qui représente une image prise à  $t = 400$  s (correspondent au deuxième régime pour le bac en acier), la distribution de la température est uniforme sur la paroi extérieure du bac en acier. Une légère nuance entre le haut et le bas pour le bac en pyrex est observée.

On donne les évolutions temporelles des températures mesurée par thermographie pour les différentes hauteurs dans le cas du bac en acier et du bac en verre sur les figures 4.32 et 4.33.

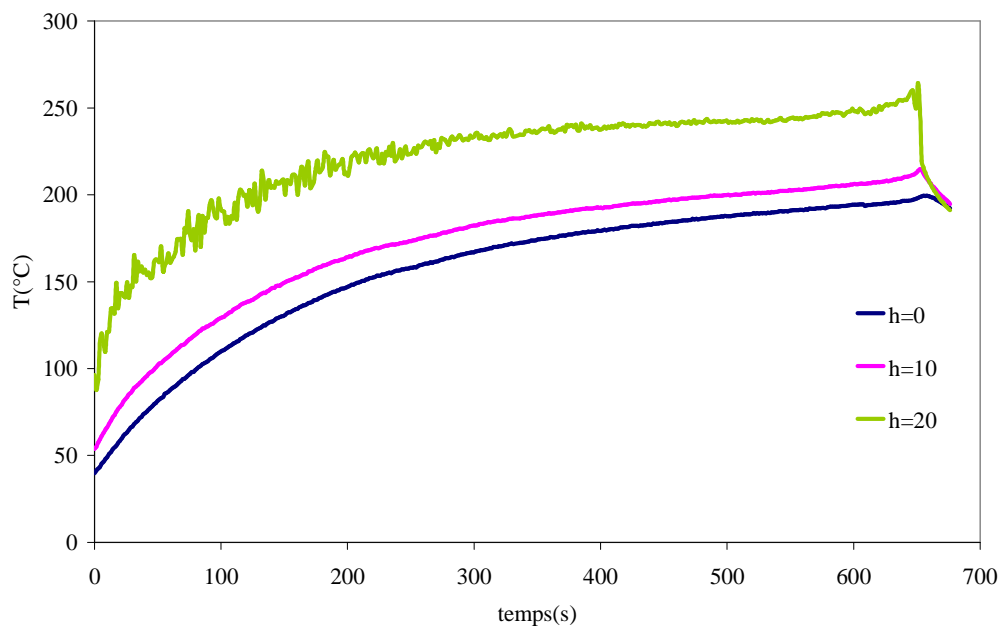


Fig. 4.32 : évolution des températures pour les différentes hauteurs sur la paroi du bac en acier.

On remarque que les courbes des températures pour les différentes hauteurs sur la paroi extérieure du bac en acier, figure 4.32, évoluent de la même manière. On constate une différence de température entre la base de la paroi externe ( $h=0$ ) et le milieu ( $h=10$ ) l'ordre de  $20^{\circ}\text{C}$ . La différence de température entre le milieu de la paroi du bac ( $h=10$ ) et le bord supérieur du bac ( $h=20$ ) est de l'ordre de  $50^{\circ}\text{C}$ .

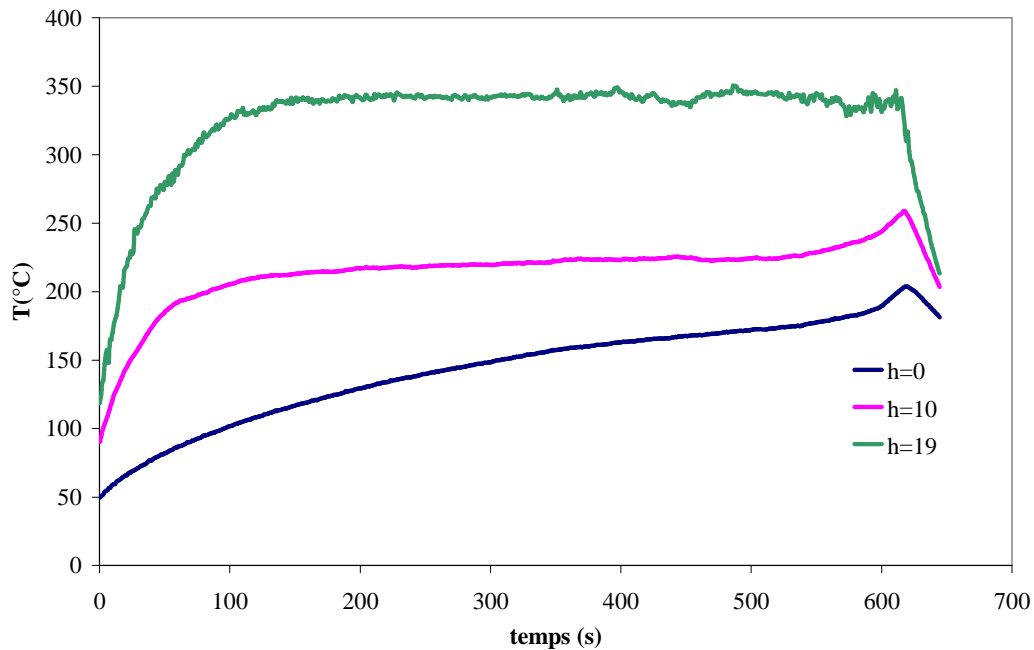


Fig. 4.33 : évolution des températures pour les différentes hauteurs sur la paroi du bac en Pyrex.

Dans la figure 4.33, les courbes  $h=10$  et  $h=19$  évoluent de la même manière. La température croît jusqu'à atteindre environ  $340^{\circ}\text{C}$  et  $210^{\circ}\text{C}$  respectivement pour  $h=19$  et  $h=10$  où elles se stabilisent. L'évolution de la température pour  $h=0$  est différente comparée aux deux autres niveaux. Elle croît progressivement jusqu'à la fin de la phase de combustion. Les différences de températures aux différentes hauteurs sont plus marquées que celles du bac acier.

A l'examen des résultats obtenus pour le bac en acier et ceux obtenus pour le bac en verre, les évolutions de température se comportent différemment lors de la phase de combustion. Cela s'explique par la différence des propriétés des matériaux

qui constituent les bacs. L'acier est un meilleur conducteur de chaleur comparé au verre, en plus il est isotrope.

#### 4.4. Distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache

Dans cette partie on détermine la distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache formé par les petits feux de bac en atmosphère libre. C'est une étude préliminaire sur les panaches de petits feux de bacs.

##### 4.4.1. Dispositif expérimentale

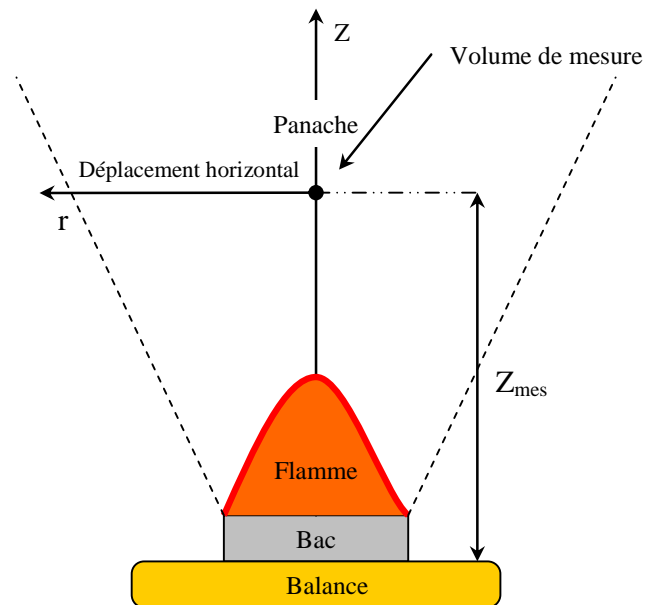


Fig. 4.34 : vue schématique du dispositif expérimental de la mesure par LDV.

Avec  $Z_{mes}$  : position du volume de mesure par rapport à la base du bac.

Le dispositif expérimental se compose d'une balance électronique de marque Ohaus, modèle Balexus Explorer Pro dont la précision est de 0,1 g , d'une sonde LDV compacte de marque TSI à une seule composante qui comporte un LASER à diode émettant un rayon d'une longueur d'onde de 690 nm à une puissance de 50mW. Elle est montée sur un dispositif d'avance qui permet le réglage manuel de la position verticale de la sonde. Le déplacement horizontal est motorisé pour

permettre un balayage du panache. La sonde est reliée à un processeur de traitement qui est lui-même relié à un ordinateur équipé du logiciel. Le montage est schématisé sur la figure 4.34, une photographie du montage est disponible en annexe G.

#### 4.4.2. Compagne d'essais

Cette compagne d'essai vise à déterminer la distribution de la composante verticale de la vitesse dans le panache de fumées à la hauteur  $Z_{mes}=650$  mm.

Les essais se font en atmosphère libre. Nous avons pris les précautions nécessaires pour que l'écoulement dans le panache ne soit pas perturbé notamment on choisissant la LDV qui est une technique optique non intrusive, on essayant d'isolé le plus possible le laboratoire et on faisant le moins de mouvement possible durant les essais.

Pour réaliser les essais le régime de combustion doit rester quasi-constant lors des essais. Nous avons choisis dans cette expérience le bac en verre de marque pyrex<sup>®</sup> de 89 mm de diamètre, puis nous l'avons changé par le bac en acier de 80 mm de diamètre immergée dans l'eau.

essai	Conditions d'essai	$\dot{Q}(kw)$	Durée de la phase de combustion (s)	Température ambiante (°C)	Tau d'humidité (%)
D89_1	Bac en verre D=89mm	1.921	600	21.9	51
D89_2	Bac en verre D=89mm	1.965	630	21.5	52
D80_1	Bac dans de l'eau, D=80	1.445	720	26.2	56
D80_2	Bac dans de l'eau, D=80	1.487	710	22.1	51

Tab. 4.5 : données d'essais pour les mesures LDV.

Les panaches sont supposé axisymétriques comme indiquer en chapitre 2. Les observations expérimentales le montrent [13]. Partant de ce fait, pour la mesure de vitesses nous avons entrepris un balayage horizontal en partant du centre de la source (centre du bac) qui est supposée être le centre du panache.

#### 4.4.3. Résultats et interprétations

On donne sur la figure 4.35 les profils des vitesses dans les cas de bac en verre pour les deux essais. On constate que la vitesse maximale mesurée pour les deux cas se situe à  $r = 0.5$  cm et non pas au centre ( $r = 0$ ). On peut l'expliquer par le fait que le panache est perturbé par un léger écoulement d'air dans l'enceinte d'essai. Quant aux vitesses, on constate qu'elles diminuent suivant la direction radiale en partant du centre du panache. Les vitesses mesurées pour les mêmes positions durant les deux essais sont quasiment identiques sauf pour  $r = 4$  cm où la vitesse est plus élevée pour le deuxième essai.

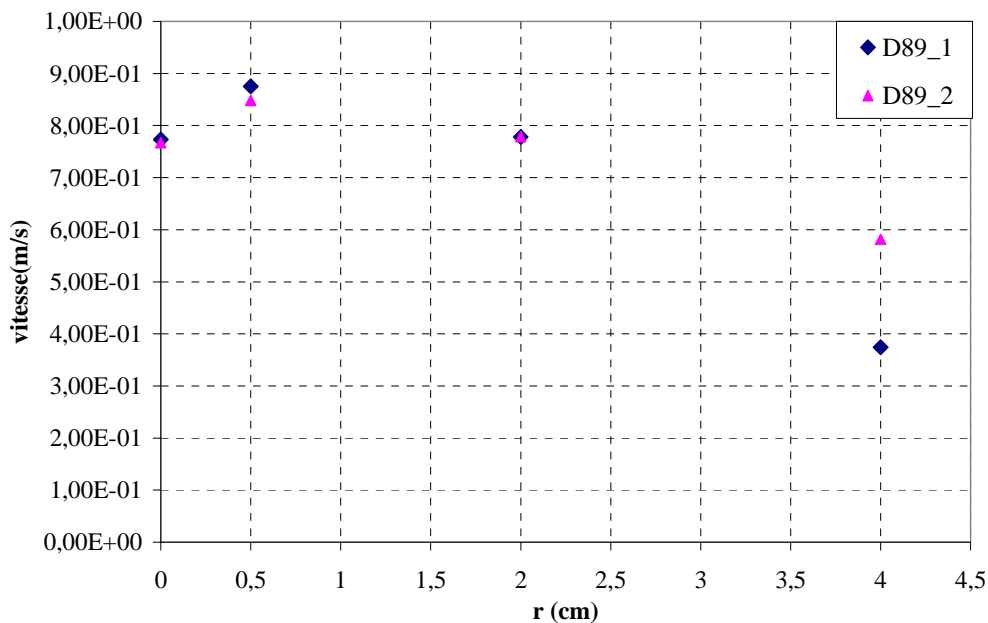


Fig. 4.35 : profils des vitesses dans les panaches pour les essais D89\_1 et D89\_2 à  $Z_{\text{mes}} = 650$  mm.

Pour mieux apprécier la distribution des vitesses on se doit d'augmenter le nombre de points de mesures. Dans cette optique nous avons diminué le temps

d'acquisition des vitesses à une minute, elle était de 2 min pour les essais précédant. Par soucis de précision on ne peut diminuer d'avantage ce temps.

Nous avons utilisé un bac en acier de 80 mm de diamètre que l'on immerge dans l'eau. La durée de la phase de combustion est plus importante dans ce cas.

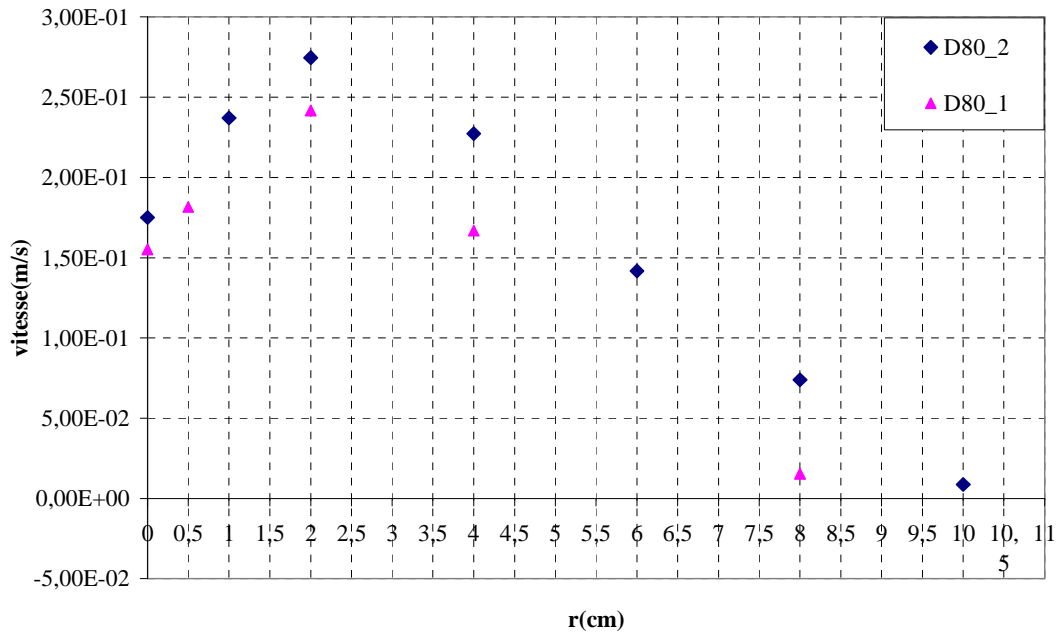


Fig. 4.36 : profils des vitesses dans les panaches pour les essais D89\_1 et D89\_2 à  $Z_{mes} = 650$  mm.

On présente sur la figure 4.36 les résultats pour les deux essais D80\_1 et D80\_2. Malgré tous nos efforts afin de ne pas perturber l'écoulement dans le panache on a constaté que le centre du panache ne se situe pas au centre du foyer. Les résultats pour les deux essais se superposent. La vitesse est maximale au centre puis décroît suivant la direction radiale. Les vitesses mesurées pour le bac en verre représentées sur la figure 4.35 sont largement supérieures à celles mesurées pour le bac d'acier immergé dans de l'eau. On explique cela par le fait que la puissance du foyer en verre est supérieure à celle du bac en acier.

En traçant le profil de vitesse axiale pour le deuxième essai, figure 4.37. On constate que celui-ci ressemble à une distribution gaussienne. Donc nos résultats

sont en accord avec le modèle de Davis et Reneke [13] qui suppose une distribution gaussienne des profils radiaux de vitesse.

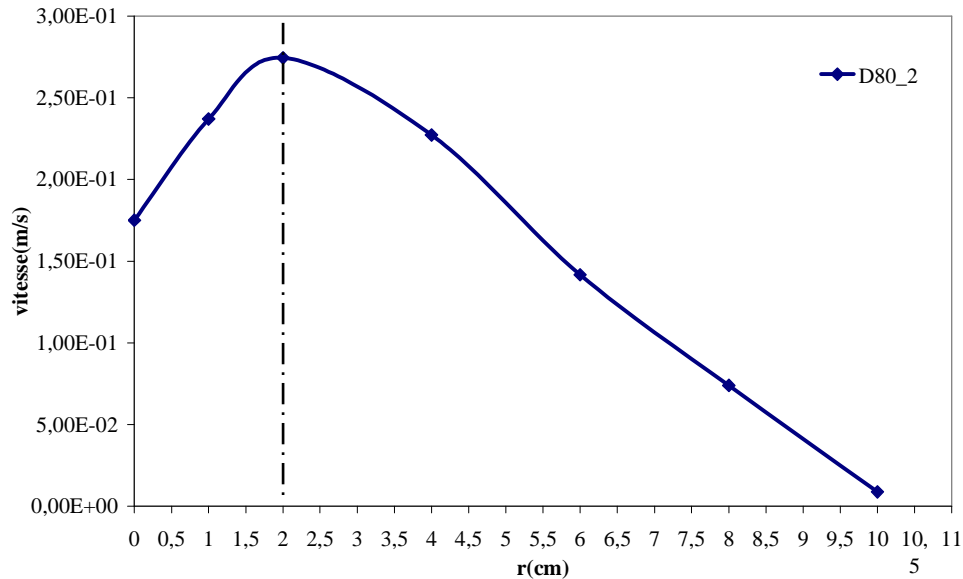


Fig. 4.37 : tracé du profil de vitesse axiale dans le panache pour l'essai D80\_2 à  $Z_{mes}=650$  mm.

#### 4.5. Conclusion

La première partie des investigations expérimentales que nous avons effectuée durant notre étude nous ont permis de confirmer la présence de deux régimes de brûlage, d'identifier le comportement de la flamme durant ces deux régimes, de connaître l'influence du diamètre du bac sur le régime de brûlage durant la phase quasi-stationnaire et de comparer les résultats obtenus avec la formule de Heskestad pour l'estimation de la hauteur de flamme avec ceux obtenus durant nos essais sur le premier régime.

La deuxième partie consiste à changer les conditions d'essais pour essayer de stabiliser le régime de combustion, ce que nous sommes parvenus à faire :

- Premièrement en immergeant le bac en acier dans de l'eau. L'évaporation de l'eau a dissipé une partie de la chaleur transmise à travers le bac au combustible.



Donc de diminuer la quantité d'énergie rétrocedée par la flamme au carburant liquide. Le régime de brulage dans ce cas correspond au premier régime.

- En utilisant un matériau avec une faible conductivité thermique pour le bac. Pour notre cas nous avons choisis le verre. D'après l'étude expérimentale de Blinov et Khudiakov [3] dans les feux de bac de petite échelle, la chaleur est essentiellement transmise de la flamme vers le bac, puis elle est conduite à travers les parois de ce dernier pour être transmise par convection au carburant. Donc en utilisant un matériau de faible conductivité thermique pour le bac, on diminue la chaleur transmise à travers celui-ci vers le carburant liquide.

- En isolant le bac en acier avec du sable on obtient un régime stable mais qui ne correspond pas au premier régime.

Au vu des résultats obtenus en changeant les conditions d'essais on peut conclure que l'apparition du second régime est conditionnée par les échanges thermiques de la paroi du bac avec le milieu ambiant.

La troisième partie consiste à mesurer et à déterminer les températures le long des parois d'un bac en acier et d'un bac en verre, en utilisant la thermographie infrarouge. Cela nous a permis de connaître le comportement des deux matériaux durant la phase de combustion.

Enfin nous avons entrepris une étude préliminaire qui visait à déterminer la distribution de la composante verticale de la vitesse dans les panaches des petits feux de bac, où l'on a constaté que les profils de vitesse avaient une forme gaussienne tel que le décrivent les études antérieures [13].

---

---

# **Chapitre 5 : Conclusion générale et perspectives**

---

---

## *Conclusion générale et perspectives*

Dans le cadre de la recherche sur la propagation des fumées lors d'un incendie dans des locaux confinés et ventilés mécaniquement. Une approche expérimentale à échelle réduite sur des maquettes a été initiée à l'Institut de mécanique de Marseille (IM2). Une des premières étapes de cette approche consiste à caractériser un feu de nappe de petite dimension pouvant être utilisé ensuite pour simuler sur maquette un foyer d'incendie réel.

Dans ce travail, on a mené une étude sur le comportement de feux de bacs de petite dimension destinés à être utilisés à échelle réduite. La première partie de notre travail traite de généralités sur les feux de nappes, elle donne quelques définitions et elle nous a permis de nous familiariser avec certains concepts.

La seconde partie est une étude sur les travaux antérieurs, elle nous a permis en premier de connaître les différents modèles de transferts thermiques dans les feux de bac et le mode de brûlage. Nous nous sommes intéressés aux travaux qui estiment le débit de perte de masse surfacique dans le cas des bacs de moyenne et grande dimensions, puis nous nous sommes intéressés à ceux qui étudient le comportement de petits feux de bacs où l'on fait le constat de deux régimes de brûlages l'un quasi-stationnaire et l'autre instationnaire. Aussi nous avons donné certaines corrélations permettant d'estimer la hauteur de la flamme notamment la corrélation de Heskestad. Certains modèles de panaches qui permettent de déduire la distribution des vitesses et des températures sont présentés.

La troisième partie a consisté à décrire les moyens expérimentaux utilisés durant notre étude pour la mesure des températures et des vitesses. Cela nous a permis de connaître les principes de fonctionnement des équipements utilisés. Les principes physiques permettant la mesure des températures par thermocouples et par thermographie infrarouge et le principe de la LDV. De plus nous avons déterminé les facteurs influençant nos mesures.

La quatrième partie présente les essais et les résultats d'essais de notre étude expérimentale. Les premiers essais nous ont permis de confirmer la présence de deux régimes de brulage, l'un quasi-stationnaire où le débit de perte de masse est quasi-constant et l'autre instationnaire où le débit de perte de masse croît jusqu'à l'extinction. Nous avons pu déduire que le débit de perte de masse surfacique durant la phase quasi-stationnaire augmente linéairement avec le diamètre. La corrélation de Heskestad pour l'estimation de la hauteur de la flamme donne de bons résultats pour les petits feux de bacs.

Dans nos essais on a pu stabiliser le régime de combustion et déduire que l'apparition du second régime est conditionnée par les échanges thermiques du bac avec le milieu ambiant. La mesure de la température par thermographie infrarouge nous a permis de déduire que le comportement des bacs en acier et des bacs en verre était différent. Enfin l'étude préliminaire sur la distribution de la composante verticale des vitesses dans le panache montre que les profils de vitesse ont une forme gaussienne telle que données par des études antérieures.

Notre travail contribue à analyser le comportement des feux de bacs de petites dimensions destinés à être utilisés à échelle réduite. Cependant, les perspectives que ce travail nous permet d'entrevoir sont nombreuses. Il

ouvre la voie à des études expérimentales complémentaires qu'à la modélisation et à la simulation numérique.

Sur le plan expérimental, il serait utile de reprendre les mesures de vitesses dans des conditions optimales en s'assurant que l'écoulement soit le moins perturbé. Il serait intéressant d'étudier le comportement du régime de brûlage en atmosphère confinée. Il serait aussi intéressant d'étudier l'influence du diamètre de bac sur le régime de brûlage avec les bacs en verre.

Sur le plan de la modélisation il serait utile de s'intéresser plus à la modélisation des transferts thermiques en instationnaire pour pouvoir déduire l'évolution temporelle du débit de perte de masse.

# *Bibliographie*

- [1] C. CWIKLINSKI, *Méthodes pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels*, feux de nappe, rapport interne, INERIS-DRA, 2002.
- [2] C. CWIKLINSKI, *Distilleries et chais de cognac*, Sécurité incendie-explosion, INERIS, rapport référencé EXI-CCw/Jle 31AZ15, 1994.
- [3] V. I. BLINOV, G. N. KHUDIYAKOV, *Diffusion Burning of Liquids*, U.S. Army Translation, NTIS N°AD296762, 1961, pp.109-130.
- [4] A. M. KANURY, *Burning of Liquid Fuel Surfaces*, Introduction to Combustion, McGraw-Hill, 1974.
- [5] A. NAKAKUKI, *Heat Transfer in Pool Fires at a Certain Small Lip Height*, Combustion and flame, Vol. 13, 2002, pp.259–272.
- [6] MUDAN, *Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires*, Prog Energy comb. Sci, Vol. 10, 1984, pp.59-80.
- [7] BLINOV, KHUDIYANOV, *Certain laws governing diffusive burning of liquids*, Academia Nank, SSR Doklady, 1957.
- [8] BABRAUSKAS, *Estimating large pool fire burning rates*, Fire technology, Vol. 09, 1983, pp.251-261.
- [9] GESIP, *Taux expérimentaux d'extinction de feux d'alcool éthylique*, Rapport n°99/04, Edition 24/07/2000.
- [10] BÜRGESS, HERTZBERG, *Heat transfer in flames*, Afgan and Beer, 1978.

- [11] C. LUCCHESI et al. *Etude Expérimentale de la Combustion de Petits Feux de Bacs de Tétra Propylène Hydrogéné (TPH)*, al SFT, 2007.
- [12] G .HESKESTAD, *Dynamics of the fire plume*, The Royal Society, Fire Safety Journal, Vol. 07, 1998, pp25-32.
- [13] DAVIS, RENEKE, *Predicting Smoke Concentration in a Ceiling*, Building and Fire Research Publications, NISTIT6480, 2000.
- [14] THOMAS, *The size of flames from natural fires*, 9<sup>th</sup> international symposium on combustion, 1963, p p.844-859.
- [15] MOORHOUSE, *Scaling criteria for pool fires derived from large-scale experiments*, Int. Chem. Ing. Sym. Series 71, 1982.
- [16] STEWART, *Burning of Liquid*, McGraw-Hill, 1985.
- [17] DRYSDALE, *An introduction to fire dynamics*; John Wiley & sons, New York, 1985.
- [18] BAGSTER, PITBALDO, *Thermal hazards in the process industry*, Chemical Engineering Progress, 1989.
- [19] HOFMANN, *Modelling of fire for risk assessment in petrochemical industries*, Heavy gas and risk assessment Symposium, Frankfort, 1982.
- [20] BERNARD EYGLUNENT, *Manuel de thermique (théorie et pratique)*, 2<sup>ème</sup> édition revue et augmentée, Edition Masson 1995.
- [21] DOMINIQUE PAJANI, *Thermographie Principes et mesure*, techniques de l'ingénieur, article R 2 740, Vol. R4, 1999.

- [22] *FLYR SYSTEMES A40*, User's manual, Professional edition, Version 2.8 SR-1, 2004.
- [23] ALAIN BOUTIER et HENRI ROYER, *Visualisations et mesures optiques en aérodynamique*, techniques de l'Ingénieur, article R2160\_RC, Vol. RC1, 1998.
- [24] BAILLY.C et COMTE-BELLOT.G, *Turbulence*, techniques de l'ingénieur, CNRS Editions, 2003.
- [25] TSI, *LaserVec Diode Velocimetry System*, Instruction Manual, 1998.



---

---

# **Annexes**

---

---

## Annexe A : procédé PUREX

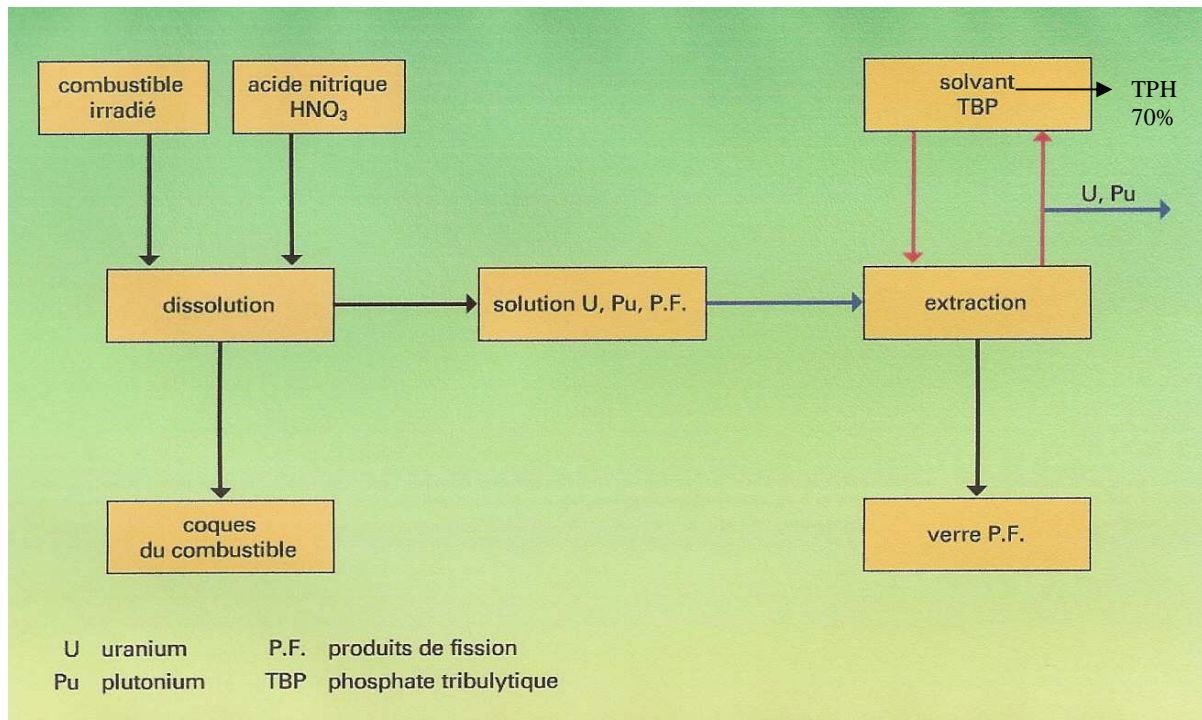


Fig. A.1 : schéma du procédé PUREX.

## Annexe B : Caractéristiques du combustible

- Description du produit :
  - Nom du produit : TPH (Tétra propylène hydrogéné) ;
  - Nom chimique : dodécane (mélange d'isomères) ;
  - Formule globale :  $C_{12}H_{26}$  ;
  - Masse molaire : 170.34 g/mole.
- Propriétés physiques et chimiques :
  - Aspect :
    - Liquide à 20°C ;
    - Incolore ;
    - Odeur très légère.
  - Point d'ébullition à la pression atmosphérique : 230°C.
  - Point d'éclair : 55-61°C.
  - limite inférieure d'inflammabilité dans l'air : 25 g/m<sup>3</sup>.
  - PCI : 44467 kJ/kg.

- Auto inflammabilité : 240°C.
- Pression vapeur :
  - à 20°C 1.5 mbar ;
  - à 70°C 16 mbar.
- Densité du TPH liquide à 20°C: 0.76 g/ml.
- Solubilité : inférieure à 1 g/l dans l'eau.
- Température de décomposition : supérieure à 400°C.

## Annexe C : Condition et résultats de l'étude d'A.Nakakuki [5]

Case No.	Fuel	Wall Material	$\delta$ (mm)	$h$ (cm)	$H$ (cm)	Surrounding Fluid
I-1		Steel	3	18	10	Air
I-2		Glass	3	18	10	Air
I-3	Fuel oil	Copper	3	18	10	Air
I-4		Steel	3	18	10	Flush water
II		Steel	10	18	10	Air
III-1		Steel	3	30	33	Air
III-2	Gasoline	Glass	3	30	33	Air
III-3	(72 Spirit)	Copper	3	30	33	Air
IV		Steel	3	8	8	Air

Tab. C.1 : résumé des cas simulés durant l'étude d'A. Nakakuki.

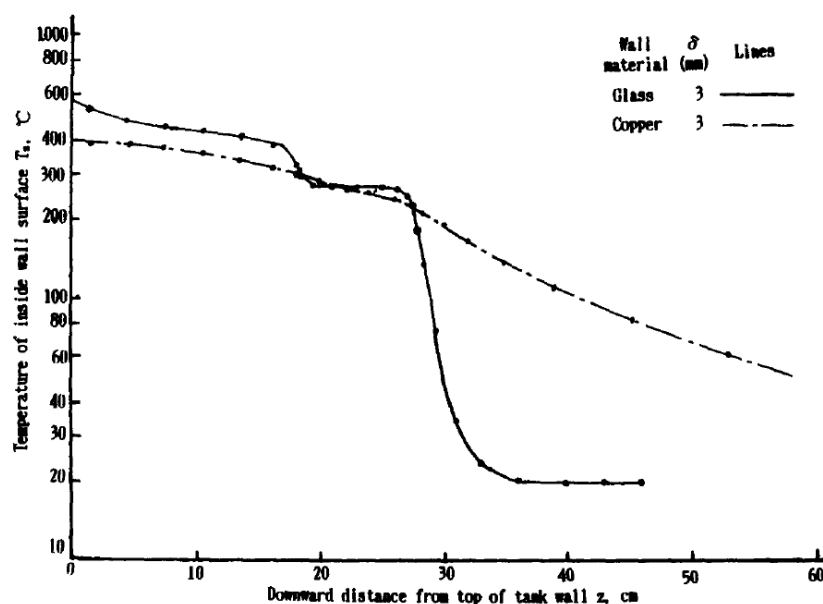


Fig. C.1 : distribution de température sur la paroi intérieure du bac pour le cas I-2 et I-3.

Rates of Heat Transfer in Tank Walls.<sup>a</sup>

Case No.	I-1	I-2	I-3	I-4	III-1	III-3
Fuel <sup>b</sup>	F.O.	F.O.	F.O.	F.O.	G.	G.
Wall Material	Steel	Glass	Copper	Steel (Water-cooled)	Steel	Copper
Top Surface						
$Q_{rad, f-t}$	0.089	0.095	0.074	0.126	0.072	0.059
$Q_{cd, f-t}$	0.216	0.207	0.253	0.384	0.241	0.275
Above Fuel Surface						
$Q_{rad, f-s}$	4.318	4.629	3.383	5.555	4.839	3.731
$Q_{rr, l-s}$	-0.894	-1.220	-0.378	0.220	-0.817	-0.381
$Q_{ref, l-s}$	0.239	0.269	0.170	0.239	0.171	0.122
$Q_{cv, g-s}$	0.708	0.645	0.867	1.821	0.892	1.109
$Q_{rr, a-s}$	-3.300	-3.731	-1.585	0.0	-3.193	-1.472
$Q_{cv, a-s}$ <sup>c</sup>	-0.854	-0.859	-1.097	-8.841	-1.521	-1.201
Hot Zone						
$Q_{cv, l-s}$	{ 1.291 -0.043	{ 0.938 0.0	{ 1.686 -0.003	{ 11.450 0.0	{ 0.473 -0.536	{ 0.641 -1.786
$Q_{rr, a-s}$	-0.636	-0.662	-0.426	0.0	-0.260	-0.206
$Q_{cv, a-s}$ <sup>c</sup>	-0.260	-0.251	-0.387	-10.256	-0.226	-0.259
Below HZLB						
$Q_{cv, l-s}$	-0.674	-0.021	-1.963	0.080	-0.085	-0.572
$Q_{rr, a-s}$	-0.127	-0.025	-0.273	0.0	-0.030	-0.032
$Q_{cv, a-s}$ <sup>c</sup>	-0.077	-0.014	-0.320	-0.783	-0.023	-0.032

<sup>a</sup>Unit: kW;  $d = 0.559$  m;  $\delta = 3$  mm. Minus sign (-) added to the heat transfer rate  $Q$  denotes the heat flow from the wall to the exterior, and no sign (or +), indicates the reverse.

<sup>b</sup>F.O.: fuel oil; G.: gasoline.

<sup>c</sup>Subscript  $a$  in  $Q_{cv, a-s}$  at the 5th column denotes the surrounding cooling water.

Tab. C.2 : résultats de calculs des flux de chaleurs sur les parois du bac.

## Annexe D : Paramètres permettant d'estimer le débit masse surfacique de combustion (données de Babrauskas [9])

Nature du combustible	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta h_v$ (kJ/kg)	$\Delta h_c$ (MJ/kg)	$m_{\infty}''$ (kg/m <sup>2</sup> .s)	$k\beta$ (m <sup>-1</sup> )	$k$ (m <sup>-1</sup> )	$T_f$ (K)	$X_f^{(c)}$ (-)
<b>Gaz liquéfiables</b>								
H <sub>2</sub> liquide	70	442	120,0	0,017 (±0,001)	6,1 (±0,4)	-	1600	0,25
Gaz naturel liquéfié (fréquemment CH <sub>4</sub> )	415	619	50,0	0,078 (±0,018)	1,1 (±0,8)	0,5	1500	0,16-0,23
Gaz de pétrole liquéfié (fréquemment C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	585	426	46,0	0,099 (±0,009)	1,4 (±0,5)	0,4	-	0,26
<b>Alcools</b>								
Méthanol (CH <sub>3</sub> OH)	796	1195	20,0	0,017 ???	a	-	1500	0,17-0,20
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	794	891	26,8	0,015 ???	a	0,4	1490	0,20
<b>Combustibles organiques classiques</b>								
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	573	362	45,7	0,078 (±0,003)	2,7 (±0,3)	-	-	0,27-0,30
Benzène (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	874	484	40,1	0,085 (±0,002)	2,7 (±0,3)	4,0	1460	0,14-0,38
Hexane (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	650	433	44,7	0,074 (±0,005)	1,9 (±0,4)	-	1300	0,20-0,40
Heptane (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	675	448	44,6	0,101 (±0,009)	1,1 (±0,3)	-	-	
Xylènes (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	870	543	40,8	0,090 (±0,007)	1,4 (±0,3)	-	-	
Acétone (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)	791	668	25,8	0,041 (±0,003)	1,9 (±0,3)	0,8	-	
Dioxane (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	1035	552	26,2	0,018 <sup>b</sup>	5,4 <sup>b</sup>	-	-	
Diéthyl éther (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O)	714	382	34,2	0,085 (±0,018)	0,7 (±0,3)	-	-	
<b>Hydrocarbures</b>								
Éther de pétrole	740	-	44,7	0,048 (±0,002)	3,6 (±0,4)	-	-	
Essence	740	330	43,7	0,055 (±0,002)	2,1 (±0,3)	2,0	1450	0,18
Kérosène	820	670	43,2	0,039 (±0,003)	3,5 (±0,8)	2,6	1480	0,35
JP-4	760	-	43,5	0,051 (±0,002)	3,6 (±0,1)	-	1250	
JP-5	810	700	43,0	0,054 (±0,002)	1,6 (±0,3)	0,5	1250	
Huile pour transformateur	760	-	46,4	0,039 <sup>b</sup>	0,7 <sup>b</sup>	-	1500	
Fioul lourd	940-1000	-	39,7	0,035 (±0,003)	1,7 (±0,6)	-	-	
Brut	830-880	-	42,5-42,7	0,022-0,045	2,8 (±0,4)	-	-	0,18
<b>Solides</b>								
Polyméthylméthacrylate (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	1184	1611	24,9	0,020 (±0,002)	3,3 (±0,8)	1,3	1260	0,40
Polyoxyméthylène (CH <sub>2</sub> O) <sub>n</sub>	1425	2430	15,7			-	1200	0,15
Polypropylène (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	905	2030	43,2			1,8	1200	0,40
Polystyrène (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>	1050	1720	39,7			5,3	1200	0,44

(a) – Valeur indépendante du diamètre pour un régime turbulent. Attention, Formule non adaptée aux alcools

(b) – Seulement deux données disponibles.

(c) – Pour des diamètres d'environ 1 m. Valeurs à minorer dans les cas de petits ou très grands diamètres.

Tab. D.1. paramètres permettant d'estimer le débit masse surfacique de combustion.

## Annexe E : Détermination de la température mesurée par un thermocouple

ITS-90 Table for Type K Thermocouple (Ref Junction 0°C) http://iseinc.com

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Thermoelectric Voltage in mV											
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516

Tab. E.1. table de référence pour un thermocouple de type K (jonction de référence 0°C).

Température (°C)	-200 à 0	0 à 500	500 à 1372
Tension (mV)	-5.891 à 0.000	0.000 à 20.644	20.644 à 54.886
$c_0$	0	0.000000E+00	-1.318058E+02
$c_1$	2.5173462E+01	2.508355E+01	4.830222E+01
$c_2$	-1.1662878E+00	7.860106E-02	-1.646031E-00
$c_3$	-1.0833638E+00	-2.503131E-01	5.464731E-02
$c_4$	-8.9773540E-01	8.315270E-02	-9.650715E-04
$c_5$	-3.7342377E-01	-1.228034E-02	8.802193E-06
$c_6$	-8.6632643E-02	9.804036E-04	-3.110810E-08
$c_7$	-1.0450598E-02	-4.413030E-05	0
$c_8$	-5.1920577E-04	1.057734E-06	0
$c_9$	0	-1.052755E-08	0
Erreur (°C)	-0.02 à 0.04	-0.05 à 0.04	-0.05 à 0.06

Tab. E.2 : coefficients pour les thermocouples de type K pour n=9.

## Annexe F : Exemple d'un fichier de statistiques (édité par le logiciel Laservec) d'une mesure LDV

Data file acquired on 25-Jul-2007 at 14:36:19 using version LV10

Data file processed using version 1.3 of ldvstats.dll on Wed Jul 25 14:37:26 2007

Data file name = c:\windows\bureau\2407\r0a0002.raw

Number of Points Processed in file = 9537, # good = 9537

Data Aquired using Random Mode

Measurement Position [X,Y,Z] = 0.000000, 0.000000, 0.000000

```
+-----+-----+
| VALUE |   U   |
+-----+-----+
| POINTS |  9537 |
+-----+-----+
| MEAN VEL | 1.815070e-001 |
+-----+-----+
| STD DEV | 4.413156e-001 |
+-----+-----+
| TURB INT | 2.431397e+002 |
+-----+-----+
| SKEW   | 8.899104e-001 |
+-----+-----+
| FLATNESS | 5.202867e+000 |
+-----+-----+
```

Processor Type : 600

[OFF] Enable Velocity Bias Correction . Selection ignored, Transit Time is not selected

[OFF] Enable LDV Data Filtering. Std. Dev.(s) = 10. Number rejected = 0

[OFF] Enable Record range limit. Limits = record 0 to 9537.

[OFF] Enable Increment Mode. Increment = 1.



## Annexe G : Photographies des montages expérimentaux

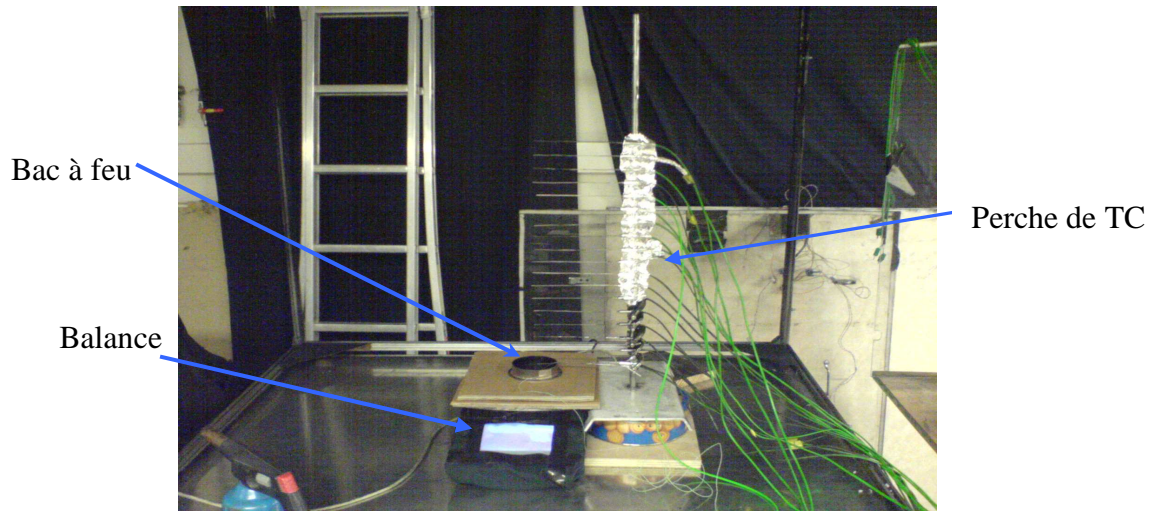


Fig. G.1 : photographie du montage expérimental de l'étude paramétrique.

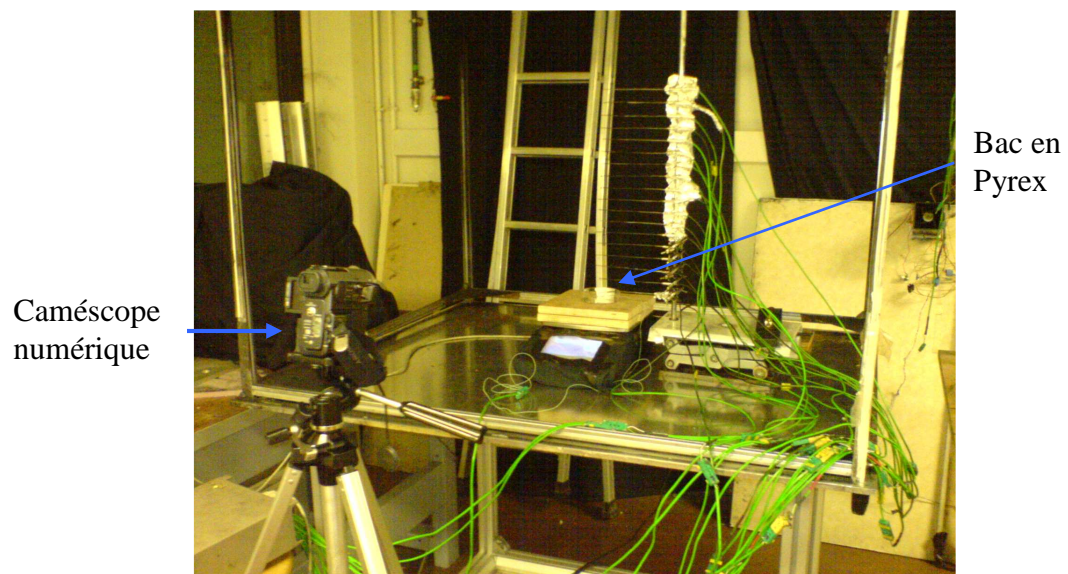


Fig. G.2 : photographie du montage expérimental avec le bac en Pyrex.

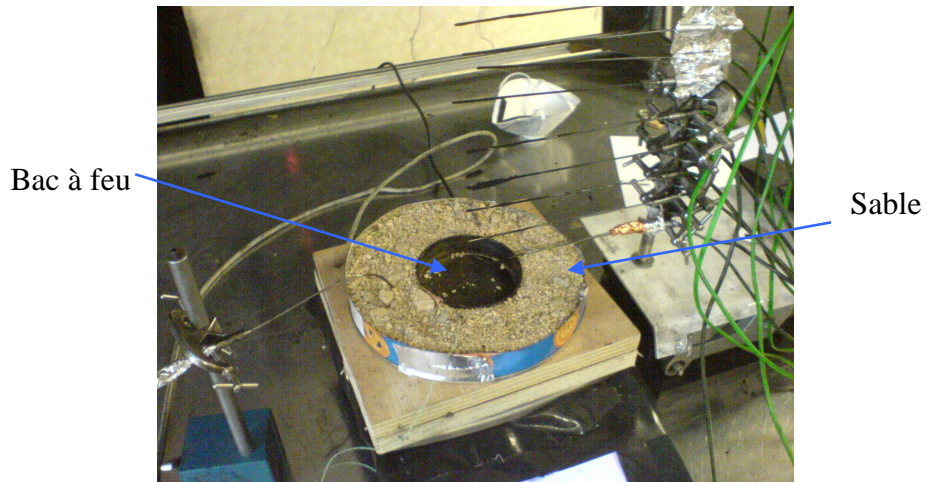


Fig. G.3 : photographie du montage isolé avec du sable.

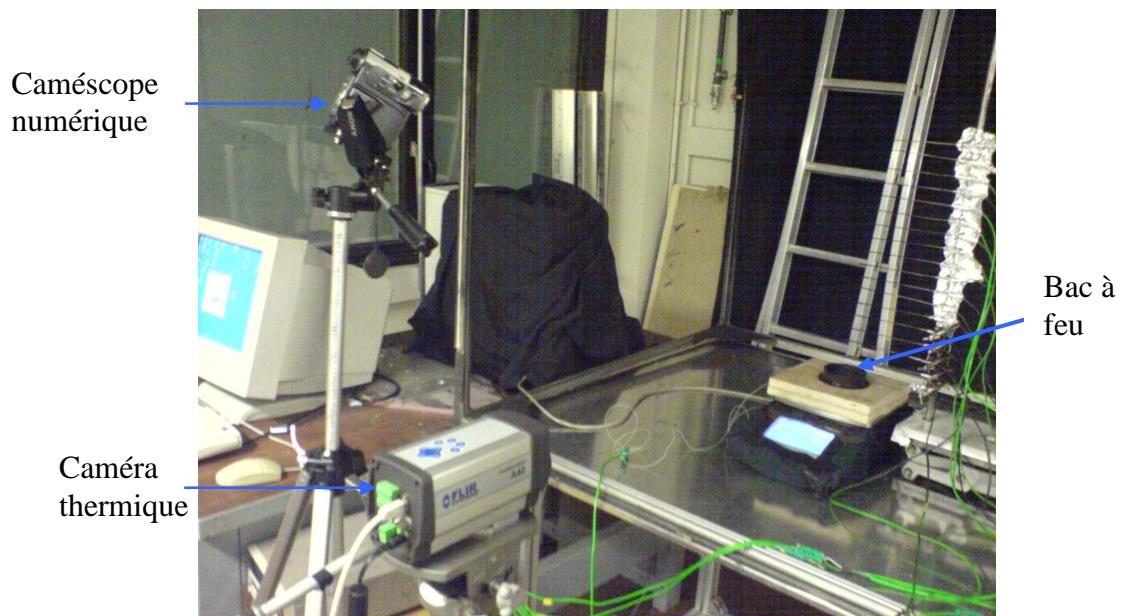


Fig. G.4 : photographie du montage avec caméra thermique.



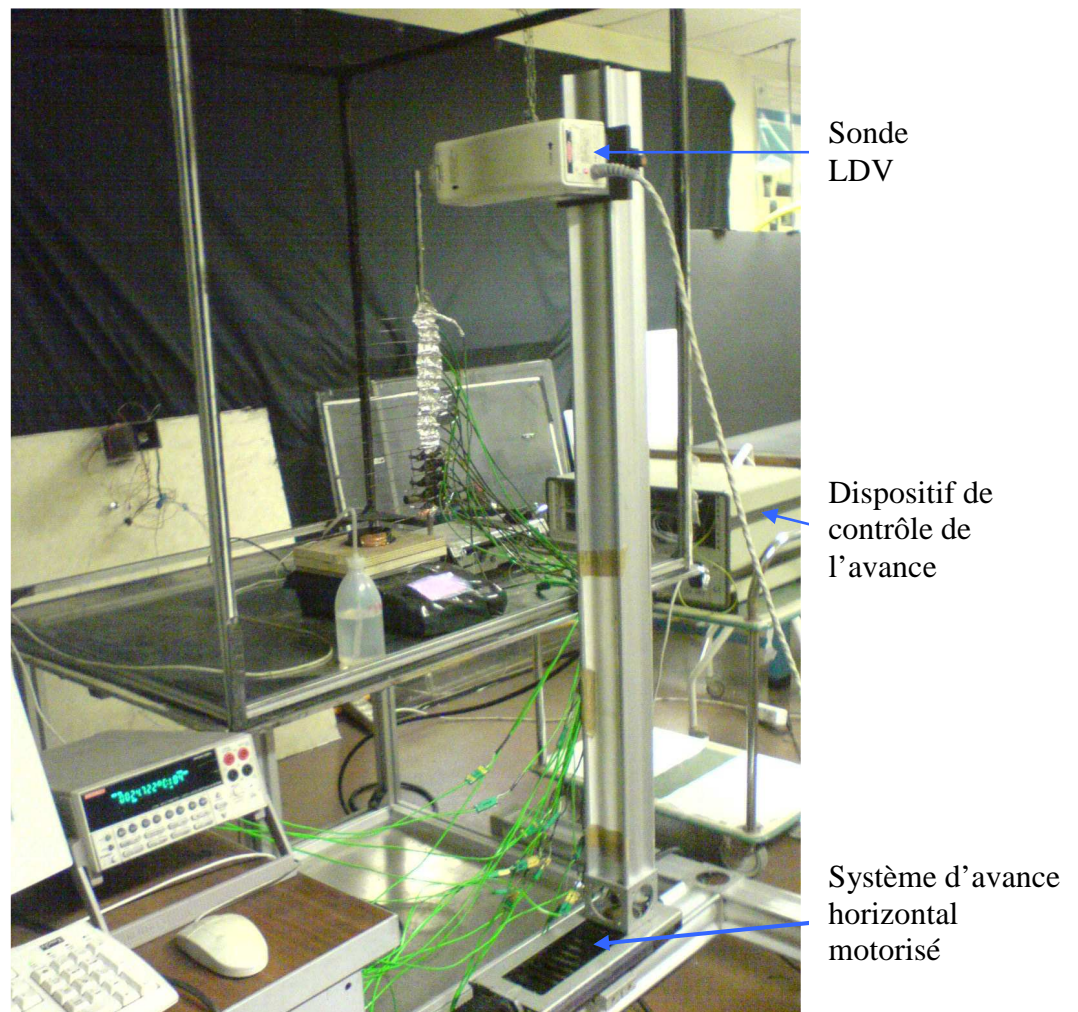


Fig. G.5 : photographie du montage pour la mesure de vitesses.

## Annexe H : Compléments des Résultats d'essais de l'étude paramétrique

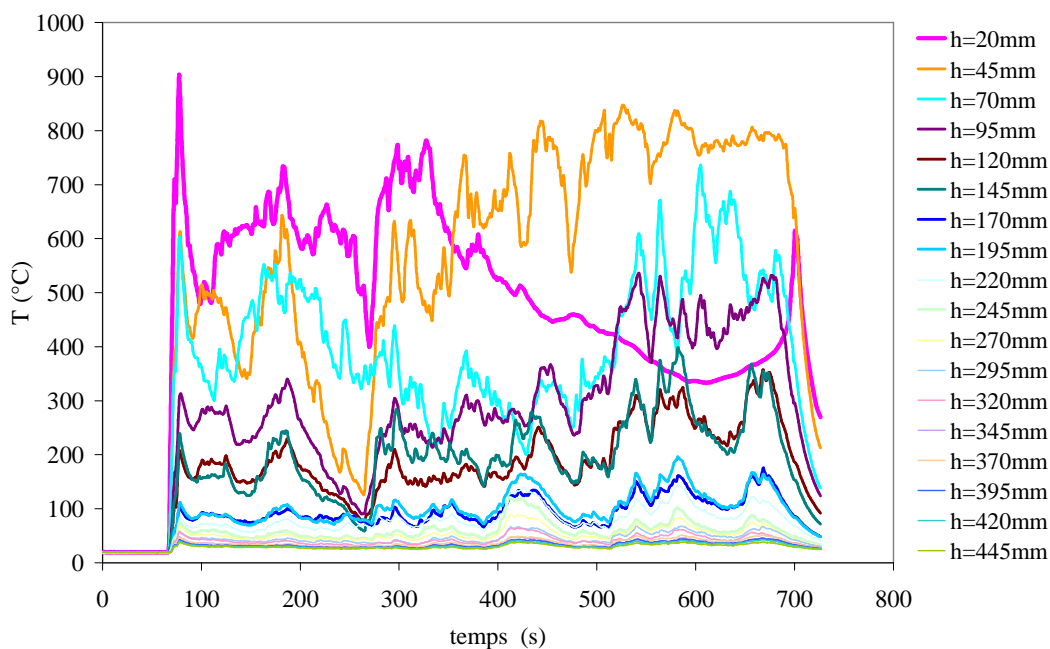


Fig. H.1 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D40\_H5.

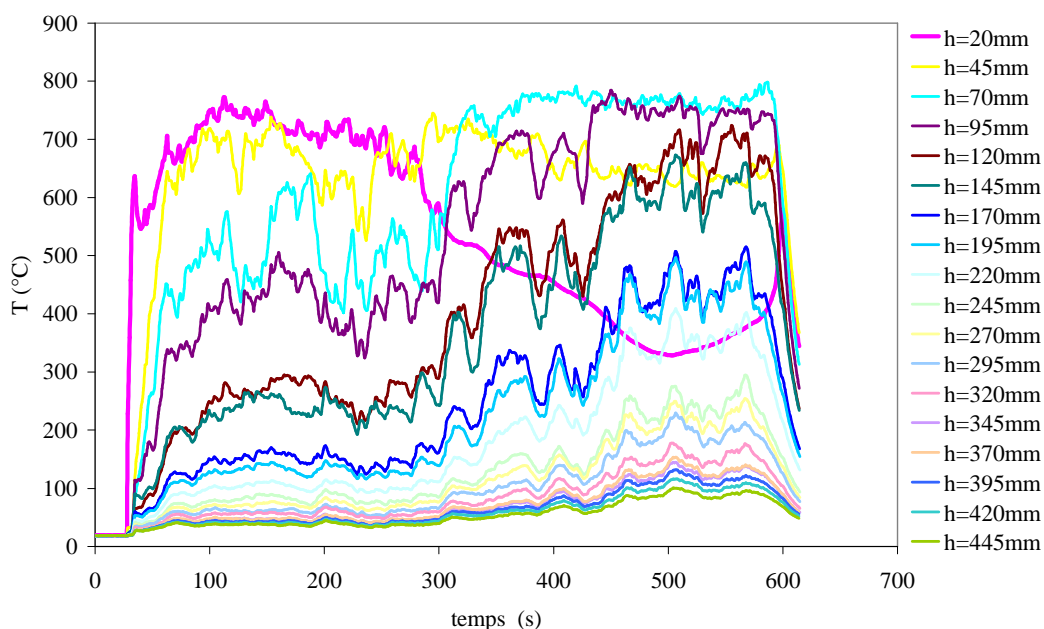


Fig. H.2 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D60\_H5.

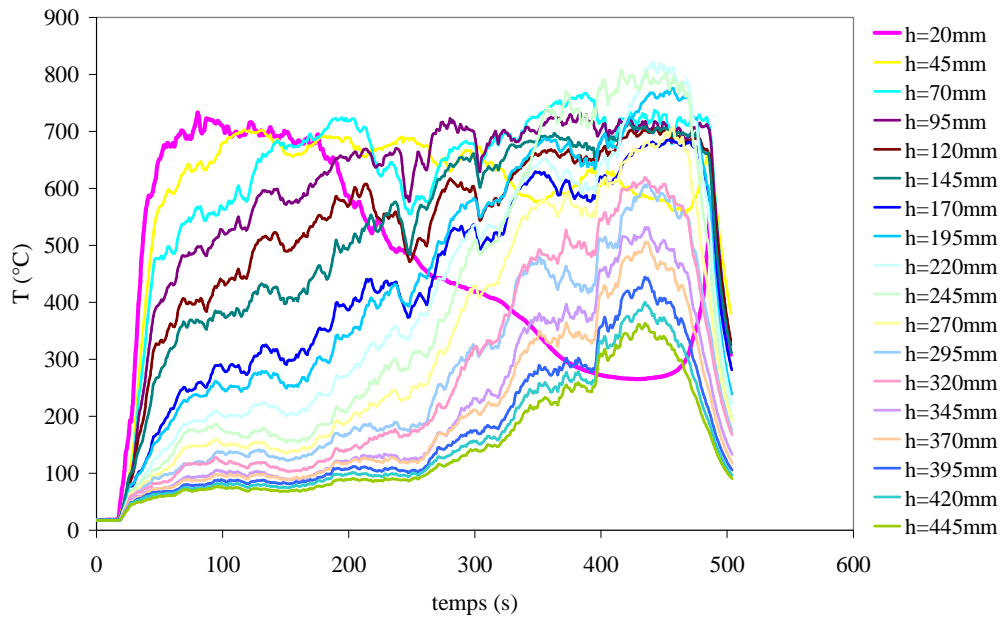


Fig. H.3 : évolution temporelle de température sur l'axe central de la flamme et du panache pour l'essai D100\_H5.

## Annexe I : Choix des points de mesure sur le logiciel ThermaCAM Researcher

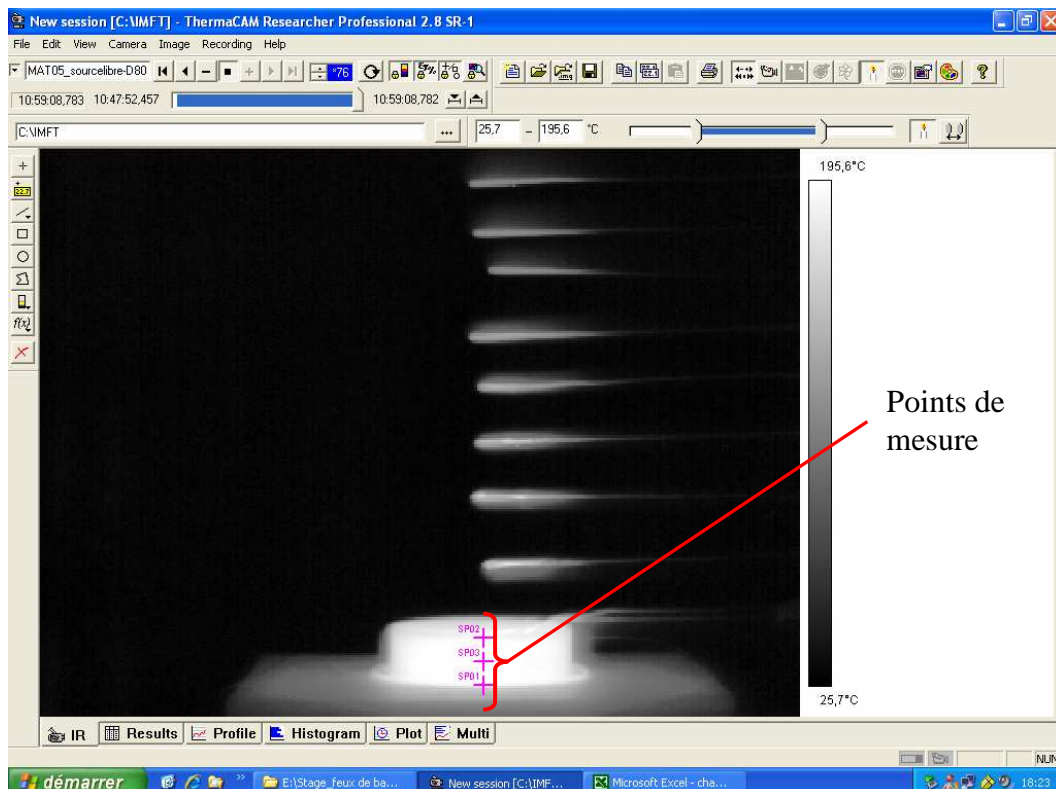


Fig. I.1 : choix des points de mesures sur le logiciel ThermaCAM Researcher.