

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed BOUGARA, Boumerdes
Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Ecole Doctorale en Energétique et Développement Durable



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

OPTION

Systèmes Energétiques Avancés

**Etude numérique et expérimentale de la flamme
non-prémélangée**

Présenté par : M^{elle} **Malika LADJANI**

Soutenu le : 24 Juin 2009

Examineurs :

Abdelkrim LIAZID	Professeur	ENSET/ Oran	Président
Mohand TAZEROUT	Professeur	EMNantes/ France	Examineur
Madjid HACHEMI	Maître de Conférences /A	UMBB/Boumerdes	Examineur
Mourad BALISTROU	Maître de Conférences /A	UMBB/Boumerdes	Examineur
Samir HANCHI	Professeur	EMP/ Alger	Directeur de mémoire

Année Universitaire 2008/2009



Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

A mes chers parents qui m'ont toujours soutenu

Les fleurs de ma vie, chers sœurs : Sara, Sabrina, Nawoïl, Fadhila

A mes grands parents

*Mes tantes * Yamina et Khadidja**

Mon futur époux

*A tous ce qui m'ont aidé financièrement et moralement durant mon cursus
universitaire pour atteindre ce niveau.*

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon encadreur **P^r HANCHI Samir** pour son suivi, ses orientations pratiques, conseils précieux et son encouragement durant la réalisation de ce travail et la présentation de ce mémoire dans sa forme finale.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux au **M^r : Toufik BELMRABET** pour ses conseils et son encouragement.

Je tiens à remercier tous les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les cadres qui m'ont aidé à réaliser mon travail expérimental, En particulier **M^r :Lakhdar BOURABIA** que je remercie vivement pour son aide et son soutien qu'il m'a accordé durant ma présence au sein du laboratoire MDF.

Le travail présenté n'aurait pas été mené à terme dans les meilleures conditions sans la collaboration de l'ensemble des personnels de l'EMP et du laboratoire mécanique des fluides. Je les remercie tous pour leurs encouragements et support moral, surtout **M^r : Laiche MENFOUKH.**

Que toute personne ayant contribué, de près où de loin, à l'aboutissement de ce travail trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance. Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants de l'école doctorale en énergétique et développement durable (EDED) , dans ces lignes, l'expression de ma profonde gratitude.

Sommaire

Nomenclature

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

Chapitre I : Etat de l'art et notions sur les flammes

I. 1 Etat de l'art.....	04
I. 2 Classification des flammes.....	06
I. 3 Flamme laminaire non-prémélangée.....	08

Chapitre II : Equations régissant la combustion

II.1 Grandeurs de la thermochimie.....	12
II.1.1 Grandeurs Thermodynamiques.....	12
II.1.2 Propriétés de transport.....	13
II.2 Equations de l'aérothermochimie.....	13
II.2.1 Equation d'état.....	14
II.2.2 Equation de conservation de la masse.....	15
II.2.3 Equation de la quantité de mouvement.....	15
II.2.4 Equation de conservation de l'énergie.....	16
II.2.5 Equation de conservation des espèces chimiques.....	16

Chapitre III : Procédure et résultats expérimentaux

III.1 Description du banc d'essais.....	17
III.1.1 Description des organes mécanique.....	17
III.1.2 Appareillages de mesure.....	20
III.2 Méthode expérimentale	21
III.2.1 Condition de fonctionnement du banc d'essais	21
III.2.2 Principe théorique.....	23
III.2.3 Méthode d'analyse de l'image thermographie.....	26
III.2.4 Calcul d'erreur relative.....	27
III.2.5 Détermination de l'émissivité de la flamme.....	27
III.3 Résultats.....	29
III.3.1 Résultats d'analyse de l'image thermographie	29
III.3.1.1 Résultats d'analyse de l'image de corps noir.....	29
III.3.1.2 Résultats d'analyse de l'image de la flamme seule	31
III.3.1.3 Résultats d'analyse de l'image de corps noir	34
III.3.2 Résultats de la relation proposée par Eulàlia Planas	34
III.3.2.1 Résultats de la relation proposée par Eulàlia Planas pour la flamme et corps noir	34
III.3.2.2 Résultats de la relation donnée par Eulàlia Planas pour la flamme seule	36
III.3.3. Comparaison des résultats expérimentaux et la relation proposée par	

Eulàlia Planas	39
III.3.4 Erreur relative.....	40
III.3.5 Profil de la température.....	44

Chapitre IV : Méthode et résultats numériques

IV.1 Construction de la géométrie.....	48
IV.1.1 Conception de la géométrie et génération de maillage.....	48
IV.1.2 Conditions aux limites.....	49
IV.2 Choix des paramètres sous FLUENT.....	50
IV.2.1 Modes de calcul.....	50
IV.2.2 Choix de la formulation du solver.....	50
IV.2.3 Modèles de calcul utilisés.....	50
IV.3.4 Schémas d'interpolation.....	51
IV.3.5 Facteurs de relaxation	51
IV.3 Résultats numériques et interprétations.....	52
IV.3.1 Contour des différents paramètres	52
IV.3.2 Profil de la température.....	54
IV.3.3 Profil des polluants NO _x et CO ₂	56
IV.4 Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation numérique.....	57
IV.4.1 Résultats expérimentaux.....	57
IV.4.2 Résultats de la simulation numérique.....	57

Conclusion générale	58
----------------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

- Annexe A : Paramètres expérimentaux
- Annexe B : Résultats expérimentaux (cas des points)
- Annexe C : Résultats expérimentaux (cas des lignes)
- Annexe D : Résultats expérimentaux (cas des surfaces)
- Annexe E : Paramètres numériques sous FLUENT
- Annexe F : Mise en plan des pièces
- Annexe G : Organigramme principale de résolution de la fonction de l'émissivité

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Erreur relative entre les résultats d'analyse de l'image thermographie et la relation proposée par Eulàlia Planas.....	41
Tableau III.2 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en Fortran pour les 25 points.....	42
Tableau III.3 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en Fortran pour les 9 lignes.....	43
Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en Fortran pour les 3 surfaces.....	44
Tableau IV.1 : Modèles de discrétisation.....	50
Tableau IV.2 : Schémas numériques utilisés.....	51
Tableau IV.3 : Paramètres de sous relaxation.....	51

Liste des figures

Figure I.1: a) Flamme prémélangée, b) Flamme de diffusion.....	06
Figure I.2: Composition d'une flamme de diffusion.....	07
Figure I.3: Différents systèmes pratiques de combustion classée selon le type d'introduction des réactifs (prémélangée ou non) et la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement.....	08
Figure I.4 : Structure du front de la flamme non- prémélange laminaire.....	09
Figure I.5 : Fractions massiques réduites du combustible f , $Y_f/Y_{f,0}$, et d'oxydant o , $Y_o/Y_{o,0}$, en fonction de scalaire passif Z dans le cas d'une cinétique chimique infiniment rapide.....	11
Figure III.1: Table et glissière.....	17
Figure III.2: Coulisseau.....	18
Figure III.3: Supports de la glissière.....	18
Figure III.4: L'injecteur.....	19
Figure III.5: Le corps noir.....	19
Figure III.6: La plaque d'injecteur.....	19
Figure III.7: Bouteille de gaz.....	20
Figure III.8: Schéma de travail de la caméra thermique.....	20
Figure III.9: La caméra thermique.....	21
Figure III.10: Débitmètre à bulles de savon.....	21
Figure III.11: Vanne de réglage du débit.....	21
Figure III.12: Les paramètres fixés dans la caméra.....	22
Figure III.13: Différents éléments et positions prises pour la détermination expérimentale de l'émissivité.....	23
Figure III.14: Image de la flamme dans la position 2.....	24
Figure III.15: Image de corps noir dans la position 3.....	24
Figure III.16 : Image de la flamme et le corps noir dans la position 1.....	24
Figure III.17: Variation de la température de la flamme (T_f), et la température totale (T_t), en fonction de l'émissivité.....	25
Figure III.18: Résolution de l'équation $f(\varepsilon)$	25
Figure III.19: Organigramme simplifié de résolution de l'équation $f(\varepsilon) = 0$	25
Figure III.20: Différents zones choisies (la flamme et le corps noir).....	29
Figure III.21: Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les points 5,14,15,16,17,18,19,20,21,25,26,27,28,29.....	29
Figure III.22 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les points 30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40.....	30
Figure III.23 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les lignes 4, 7,8,15,16,17,18,19,20.....	30
Figure III.24 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les surfaces 7,8,9.....	31
Figure III.25 : Différents zones choisies « la flamme seule ».....	31
Figure III.26 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les points 5,14,15,16,17,18,19,20,21,25,26,27,28.....	32
Figure III.27: Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les points 29,30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38,	

39, 40.....	32
Figure III.28 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les lignes, 4, 15, 16, 17, 18, 19, 20.....	33
Figure III.29 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les surfaces 7,8,9.....	33
Figure III.30 : La zone choisie pour le corps noir	34
FigureIII.31: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas, pour les points 5,14,15,16,17,18,19,20,21,25,26,27,28.....	35
Figure III.32: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas pour les points 29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40	35
Figure III.33: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas pour les lignes 4,7,8, 1, 16,17,18,19,20.....	36
Figure III.34 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les surfaces7,8,9.....	36
Figure III.35: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas pour les points 5, 14, 15, 16,17, 18, 19, 20, 21,25, 26, 27,28.....	37
Figure III.36: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas, pour les points 29,30, 31,32,33,34,35,36,37,38,39,40.....	37
Figure III.37: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas , pour les lignes 4,7,8, 15,16,17,18,19,20.....	38
Figure III.38: Evolution de la relation proposée par Eulàlia Planas les surfaces 7,8,9.....	38
Figure III.39: Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation proposée par Eulàlia Planas pour le point 5.....	39
Figure III.40: Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation proposée par Eulàlia Planas pour la ligne 4.....	39
Figure III.41 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation proposée par Eulàlia Planas pour la surface 7.....	41
Figure III.42: Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale pour les points 5,14,15,16,17,18,19,20,21,25,26,27,28.....	42
Figure III.43: Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale pour les lignes 4,7,8,15,16,17,18,19,20	43
Figure III.44: Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale pour les surfaces 7,8,9.....	44
Figure III.45: Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 25 points.....	44
Figure III.46: Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 9 lignes.....	45
Figure III.47: Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 3 surfaces.	46
Figure IV.1:Les étapes de la simulation sur les logiciels FLUENT et GAMBIT	47
Figure IV.2:Maillage utilisé.....	48
Figure IV.3:Conditions aux limites imposées.....	49
Figure IV.4:Contour de la température statique de la flamme C_4H_{10}/Air	52
Figure IV.5:Contour de la fraction H_2O de la flamme C_4H_{10}/Air	52
Figure IV.6:Contour de la fraction de C_4H_{10} de la flamme C_4H_{10}/Air	52
Figure IV.7:Contour de la fraction de CO_2 de la flamme C_4H_{10}/Air	53
Figure IV.8:Contour de la fraction de NO_x de la flamme C_4H_{10}/Air	53
Figure IV.9:Contour de la fraction de O_2 de la flamme C_4H_{10}/Air	54
Figure IV.10:Contour de la fraction de N_2 de la flamme C_4H_{10}/Air	54
Figure IV.11:Contour de la pression statique la flamme C_4H_{10}/Air	54
Figure IV.12: Ligne de courant de la température statique de la flamme C_4H_{10}/ Air	54

Figure IV.13: Profil radial de la température dans la zone de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	55
Figure IV.14: Profil axial de la température dans la zone de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	56
Figure IV.15: Profil radial de NO _x de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	56
Figure IV.16: Profil radial de CO ₂ de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	56
Figure IV.17: Profil axial de NO _x de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	56
Figure IV.18: Profil axial de CO ₂ de la flamme C ₄ H ₁₀ /Air.....	56

Nomenclature

Nomenclature

A	: Facteur pré-exponentiel	(m ³ /mol.s)
A _f	: Constante	(K)
A _t	: Constante	(K)
B _f	: Constante	(-)
B _t	: Constante	(-)
C _p	: Chaleur spécifique à pression constante	(kJ/ kg.K)
C _v	: Chaleur spécifique à volume constant	(kJ/ kg.K)
d	: Diamètre de l'injecteur	(mm)
E	: Energie d'activation	(kJ/kg.mol)
F	: Force de volume	(N)
E _r	: Erreur relative	(%)
h	: Enthalpie massique du mélange	(kJ/kg)
I _{bf}	: Radiation de la flamme transmise au corps noir	(W/m ²)
I _f	: Radiation de la flamme seule	(W/m ²)
I _{totale}	: Radiation totale	(W/m ²)
ṁ	: Débit massique	(kg/s)
m	: Masse moléculaire	(kg)
n	: Nombre des (points, lignes, surfaces)	(-)
N	: Nombre d'espèces	(-)
P	: Pression	(N /m ²)
Pr	: Nombre de Prandtl	(-)
Q	: Flux de chaleur par conduction	(W)
R	: Constante des gaz parfaits	(kJ/mol.K)
r	: Constante massique des gaz parfaits	(kJ/kg.K)
S	: Surface	(m ²)
T ₀	: Temperature de formation	(K)
T _a	: Température ambiante	(K)
T _b	: Température de corps noir	(K)
T _t	: Température totale	(K)
T _f	: Température de la flamme	(K)
T	: Température	(K)
T _{f(fin)}	: Température finale de la flamme	(K)
u	: La vitesse d'écoulement du mélange	(m/s)
W	: La masse molaire du mélange	(kg)
x	: Position axiale de la flamme	(mm)
X	: Fraction molaire du mélange	
y	: Position radiale de la flamme	(mm)
Z	: La variable de Schwab-Zeldovich	(-)

Symboles Grec

σ :	Constante de Stefan-Boltzmann	(W /m ² .K ⁴)
λ :	La conductivité thermique	(W/m K)
ϕ :	Rapport d'équivalence de la réaction	(-)
ν :	Coefficient stoechiométrique	(-)
χ :	La dissipation scalaire de Z	(-)
ρ :	Masse volumique	(kg/m ³)
μ :	La viscosité dynamique	(kg/m.s)
Γ :	Coefficient de diffusion moléculaire	m ² /s
ε :	Emissivité	(-)
ε_t :	Emissivité totale	(-)
ε_b :	Emissivité de corps noir	(-)
ε_f :	Emissivité de la flamme	(-)
$\varepsilon_{f(\text{fin})}$:	Emissivité finale de la flamme	(-)
δ_{ij} :	Symbole de Kronecker	(-)
β :	Exposant de la température	(-)
$\dot{\omega}$:	Taux de réaction	(-)

Indices

a	: Air
f	: Combustible
o	: Oxydant
p	: Produit
t	: Turbulent
l	: Laminaire
i	: Désigne la direction de l'écoulement suivant x
l	: Désigne la direction de l'écoulement suivant y
k	: Espèces
exp	: Expérimental
réf	: Référence
st	: Stoechiométrique

Introduction générale

Introduction générale

La technique de mesure de la température d'une flamme joue un rôle important dans le diagnostic de la combustion. Habituellement, à hautes-températures, la plus grande portion de perte de chaleur par radiation de la flamme vient des produits de combustion qui émettent dans l'infrarouge.

Plusieurs détecteurs peuvent être utilisés pour détecter la température lors de la combustion, entre autres, on peut citer : le thermocouple, la thermographie infrarouge, etc.

La première partie de ce travail a pour but d'expérimenter une technique, pour déterminer à partir de l'émissivité, la température d'une flamme laminaire de diffusion. Ceci se fait en utilisant la thermographie infrarouge (IR-caméra), et en appliquant la méthode proposée par **Eulàlia Planas** [1].

Les flammes de diffusion sont utilisées principalement pour des raisons écologiques. Ce type de flamme est plus sécurisé. De plus la réalisation d'une flamme de diffusion est sensiblement plus simple puisqu'elle ne nécessite pas un mélange des réactifs aussi parfait que possible dans des proportions bien définies. Ces flammes se retrouvent dans diverses applications technologiques, telles que les brûleurs industriels, les moteurs diesel, les fours industriels, etc.

Dans le secteur industriel, les brûleurs constituent l'alternative la plus courante pour convertir l'énergie fossile en énergie thermique. Ceci a incité plusieurs auteurs, à optimiser le fonctionnement des brûleurs afin d'augmenter leurs rendements et diminuer leurs émissions en gaz très nocifs tels que le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NOx) et les oxydes de soufre (SOx).

La seconde partie consiste à comparer les résultats expérimentaux obtenus avec les résultats de la simulation numérique de la flamme laminaire de diffusion (non-prémélangée) également réalisée lors de ce stage.

Les écoulements de fluides rencontrés dans l'industrie ont le plus souvent un caractère complexes qui est du à la nature des fluides eux même et à plusieurs facteur pouvant les influencer.

De ce fait, il est primordial de comprendre les processus physique et chimique prépondérants au sein du système de combustion tel que la stabilité de la flamme, l'interaction entre la turbulence et les réactions chimiques et le comportement dynamique.

Les expérimentations utilisées pour analyser ces écoulement sont coûteuses alors que la simulation numérique des équations de la dynamique des fluides et de transfert de la chaleur, nous permet de visualiser les résultats d'un écoulement sur un simple écran d'ordinateur, en relevant des variables telle que la vitesse, la pression et la température.

Les progrès qu'ont connu les outils de simulation rendent l'association entre l'approche numérique et le travail expérimental de plus en plus indispensable.

Le code **FLUENT** est devenu un outil très utilisé pour la simulation de tous les phénomènes dans le domaine de l'énergétique tant dans l'industrie que pour la recherche. La construction du modèle géométrique, du maillage et des conditions aux limites est générée avec le préprocesseur **GAMBIT**.

Les deux parties ont été divisées en quatre chapitres : le premier chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art ainsi qu'à la description des différents types de flammes et à leurs classifications.

Le deuxième chapitre consiste à présenter la formulation générale des équations régissant le mouvement et la combustion, les équations dynamiques ont été établies dans le cas stationnaire bidimensionnel, le modèle retenu par notre étude est le modèle laminaire.

Le troisième chapitre a pour objectif la présentation des différents composants du montage expérimental au laboratoire de mécanique des fluides, suivi d'une description des différentes opérations effectuées notamment à l'aide d'une caméra infrarouge, puis l'analyse des résultats expérimentaux obtenus.

Le quatrième chapitre consiste à présenter la démarche numérique utilisée, les différents schémas numériques existants dans le logiciel **FLUENT**, et enfin l'analyse des résultats numériques obtenus.

Chapitre I

Etat de l'art et notions sur les flammes

Introduction

La combustion est aujourd'hui un des principaux moyens de conversion de l'énergie. Elle est utilisée dans de nombreux systèmes, aussi bien pour produire de la chaleur (chaudières ou fours domestiques et industriels), de l'électricité (centrales thermiques), que pour le transport (moteurs automobiles et aéronautiques, moteurs fusées . . .) ou encore la destruction de déchets (incinérateurs). La combustion peut être définie comme étant une (ou des) réaction (s) irréversible (s) fortement exothermique (s) entre un combustible et un comburant (ou oxydant), selon le schéma global suivant :



Plus précisément, cette réaction induit un fort dégagement de chaleur dans une zone très mince (les épaisseurs typiques de flamme sont de l'ordre de 0,1 à 1 mm) conduisant à des gradients thermiques très élevés (le rapport des températures entre réactifs et produits de combustion est couramment de 6 à 8) et à de larges variations de la masse volumique. Le taux de réaction est raide et fortement non linéaire (loi d'Arrhenius). Les combustibles les plus divers (gazeux, liquides ou solides) peuvent être utilisés : bois, charbon, méthane, butane, propane, essence, gasoil, kérosène, fuel, hydrogène, etc, et le comburant est généralement l'oxygène de l'air, plus exceptionnellement de l'oxygène pur (moteurs-fusées, certains fours industriels) qui permet d'atteindre des températures plus élevées et d'éviter le stockage d'azote inerte. Différents mécanismes de couplage interviennent en combustion.

Les transferts de masse (par diffusion moléculaire ou transport convectif des différentes espèces chimiques) sont des éléments importants des processus de combustion. Le dégagement d'énergie dû à la réaction chimique induit des transferts thermiques intenses par conduction, convection ou rayonnement, tant au sein de l'écoulement qu'avec son environnement (parois du brûleur, etc). Cette énergie thermique est ensuite soit utilisée directement, soit convertie en énergie mécanique dans des turbines à gaz ou des moteurs à piston. Bien évidemment, la combustion requiert la description de l'écoulement (mécanique des fluides). Dans certains systèmes, d'autres aspects sont à considérer. Deux phases (combustibles ou comburants liquides) ou trois phases (Combustibles solides, particules) peuvent interagir. Des phénomènes tels que la formation de sprays, la vaporisation, la combustion de gouttes, etc. doivent alors être pris en compte. La formation de suies génère des particules de carbone qui seront ensuite transportées par l'écoulement.

I.1 Etat de l'art

Une méthodologie pour déterminer l'émissivité d'un feu dans une cuve d'hydrocarbure dans le régime transitoire et turbulent, en utilisant la thermographie infrarouge, a été proposée par **Eulàlia Planas** [1], L'expérience a été faite pour des diamètres de (0,13 m, 0,18 m, 0,5 m), avec de l'huile de diesel et le gazoline comme combustible. Une corrélation a été développée pour estimer l'émissivité.

Char et Yeh [2], proposent une technique pour mesurer la température de la flamme de propane, au moyen d'une camera thermique infrarouge qui montre un bon accord avec la température mesurée par thermocouples. En outre, une corrélation empirique pour prédire l'émissivité de la flamme a été obtenue.

Riniri et al [3], proposent une méthode de mesure de la température d'une flamme au moyen d'une caméra infrarouge. La méthode utilise la conversion des niveaux numériques, fournis par une caméra infrarouge en température est découle d'un formalisme issu de la loi de Planck. Ils ont proposé une relation simplifiée reliant ces niveaux numériques aux températures expérimentales, mesurées par thermocouple. Cette dernière prend en compte la distance entre la flamme et la caméra. Le modèle proposé donne des résultats meilleurs que ceux obtenus par la méthode classique. Les principaux de cette approche résident dans le calibrage de la caméra infrarouge.

Ghia [4], a utilisé la technique de la thermographie pour rechercher et tester des gouttelettes d'huile de combustible, dans le but de déterminer la qualité de combustion (formation des polluants CO, NOx...).

Qiaq et al [5], ont travaillé sur la flamme de diffusion des cuves de feu, dans le but de comparer l'accord entre la température mesurée par la caméra infrarouge et les thermocouples. L'étude a été faite pour 5 différents diamètres (5 cm, 10 cm, 30 cm, 60 cm, et 1.2m) en testant 4 différents hydrocarbure (hexane, toluène, l'huile diesel, et l'huile lourde). Le diamètre de 5cm correspond au régime laminaire, le diamètre de 1.2 m au régime turbulent, par contre les diamètres de (10 cm, 30 cm et 60 cm) au régime de transition.

Dupuy et al [6], étudient la transmission et l'émission des flammes de 1m et 2m de longueur dans des cylindres avec de (Pinus pinaster aiguilles) comme combustible, avec des diamètres de (20, 28 et 40 cm).

La mesure de la température au moyen d'un thermocouple peut être faussée car on mesure la température en un point. **Manaca** et **Rovaglio** [7], font une étude pour mesurer la température d'une chambre de combustion en utilisant la caméra thermique infrarouge.

Yamaguchi et **Tajim** [8], ont trouvé que l'émissivité est calculée raisonnablement comme une fonction des trois variables identifiées (la température de piscine, la température du gaz et la fraction molaire de oxygène dans l'air). Le modèle proposé peut être employé facilement dans l'analyse du feu du sodium pour l'évaluation de la sécurité.

Chun et **al** [9], utilisent la caméra thermique pour tracer le profil de la température d'une flamme de diffusion turbulente, puis comparent ces résultats avec la simulation numérique pour des diamètres de 1,2m et 3m,4m en utilisant le di-tert-butyl peroxide, le kérosène, et d'autres carburants.

Novozhilov et **Koseki** [10], font de la simulation numérique pour déterminer la température de feu des hydrocarbures en phases (gaz-liquide), La combustion a été modélisé en utilisant **Eddy break-up**, avec un régime instationnaire. Les équations de Navier-Stokes sont modélises en utilisant la moyenne de favre.

Philippe Vachet [11], traite les caractéristiques en émission et transmission d'une flamme axi-symétrique. Il montre les différentes procédures informatiques de mise en forme et d'analyse des données venant de la caméra infrarouge.

Dans le cadre de la mise en œuvre d'actions locales significatives dans la maîtrise de l'énergie et la réduction des gaz à effet de serre, la communauté urbaine de **Dunkerque**[12], a engagé une grande opération de sensibilisation du public et des professionnels à la gestion de l'énergie en réalisant une opération de thermographie aérienne infrarouge des principales aires urbaines de son territoire. Considérant que près de 30% des déperditions thermiques d'un bâtiment s'effectuent par la toiture, la thermographie aérienne infrarouge permet d'afficher le niveau de déperditions de chaque bâtiment suivant une échelle de couleurs et de restituer l'analyse sous forme de cartes.

I.2 Classification des flammes

Selon la procédure utilisée pour introduire les réactifs dans la zone de flamme, deux situations génériques idéales schématisées sur la figure I.1, ont été identifiées :

- **Flammes pré-mélangées** : les réactifs sont mélangés avant la zone de réaction.
- **Flammes non-prémélangées (flammes de diffusion)** : les réactifs sont introduits, de part et d'autre de la flamme. Ils sont alors essentiellement localement entraînés dans la zone de réaction par diffusion moléculaire.

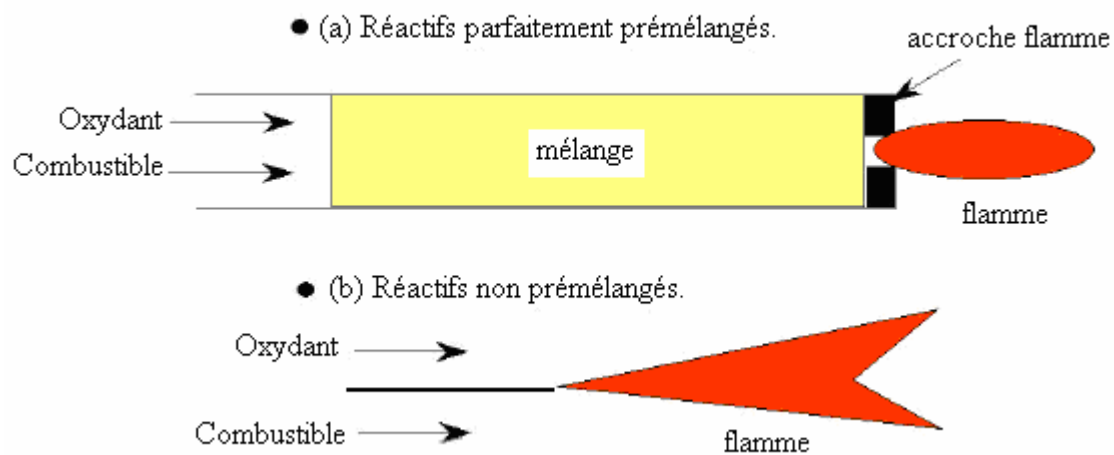


Figure I.1 : a) Flamme prémélangée, b) Flamme de diffusion

La combustion prémélangée est, à priori, la situation la plus efficace en terme de dégagement d'énergie puisque les réactifs sont déjà en contact avant la zone de flamme. Une telle flamme est susceptible de se propager dans le mélange combustible/oxydant, donc de remonter l'écoulement en amont de la chambre de combustion, jusqu'à l'endroit où s'effectue le mélange, ce qui pose des problèmes de sécurité.

En revanche, si la flamme de diffusion est, a priori, moins performante qu'une flamme prémélangée puisqu'il faut, en plus, apporter, par diffusion moléculaire, les réactifs à la zone de réaction, celle-ci ne peut en aucun cas remonter l'écoulement et est donc plus sûre. En outre, la réalisation pratique d'une flamme de diffusion est sensiblement plus simple

puisque'elle ne nécessite pas un mélange des réactifs aussi parfait que possible dans des proportions bien définies (c'est-à-dire dans les limites d'inflammabilité). [13]

Un brûleur non-prémélangé peut être simplement constitué, par exemple, d'un injecteur de combustible dans de l'air ambiant (**bec Bunsen** dont la virole est fermée, **veilleuse** de **chauffe-eau**, **fours industriels**,...) ou d'un ou plusieurs groupes d'injecteurs de combustible et de comburant (**moteurs-fusées**, **fours à oxygène**,...).

La flamme de diffusion est composée de différentes zones figure (I.2) : une zone centrale qui n'est composée que de combustible, une zone de réaction et la zone contenant les gaz chauds, produits de la combustion. En réalité, la réaction ne se produit pas uniquement le long de la ligne stoechiométrique mais dans la zone d'inflammabilité de part et d'autre de cette ligne. La combustion dans cette zone est alors incomplète et la flamme de diffusion produit des suies issues des molécules de carbone imbrûlées. Les flammes non-prémélangées sont caractérisées par un panache jaune dû au rayonnement des suies [13].

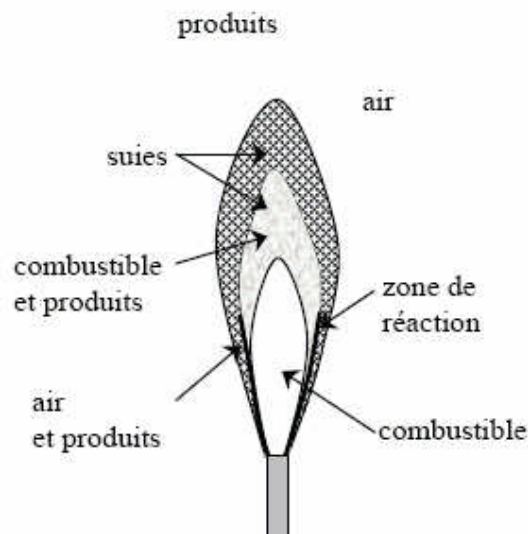


Figure I.2 : Composition d'une flamme de diffusion

En pratique, les réactions de combustion interviennent, le plus souvent en milieu gazeux. Cette constatation conduit immédiatement à une seconde distinction entre les régimes de combustion, selon que les écoulements sont laminaires ou turbulents. Quatre régimes limites idéaux sont donc identifiables, selon que l'écoulement est ou non laminaire et la combustion prémélangée ou non.

Pour fixer les idées, la figure I.3, résume ces quatre situations génériques et y associe quelques applications pratiques.

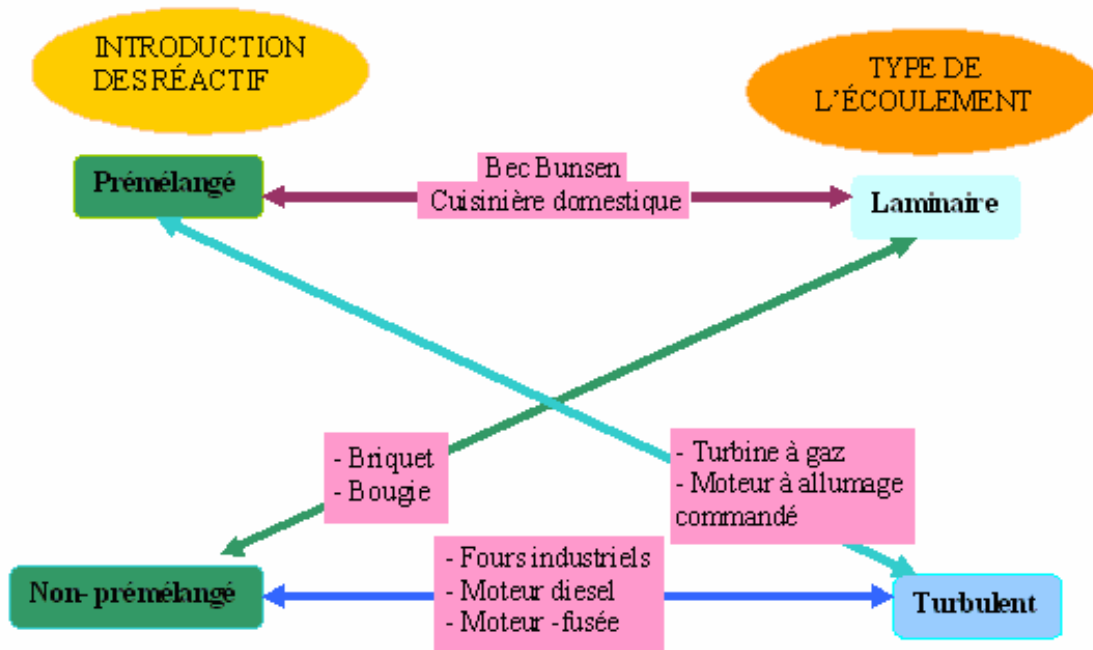


Figure I.3 : Différents systèmes pratiques de combustions classés selon le type d'introduction des réactifs (prémélangée ou non) et la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement. [13]

Nous pouvons également classer les flammes en fonction de la nature de l'écoulement :

- **Flammes laminaires** : l'étude de ces flammes permet de comprendre la structure fine de flamme et l'influence relative des différents phénomènes intervenant dans les écoulements réactifs. En particulier, l'impact des mécanismes cinétiques et des modèles de diffusion sont usuellement évalués sur ce type de flamme, qui sont facilement analysables expérimentalement.
- **Flammes turbulentes** : dans les configurations réelles, la turbulence modifie de manière importante le mélange et les caractéristiques locales de la flamme (courbure, étirement...).

I.3 Flamme laminaire non-prémélangée

Sa caractéristique principale dite de diffusion consiste à présenter une zone de réaction séparant les réactifs, combustible et oxydant. Les profils des fractions massiques et de température sont présentés sur la figure I.4.

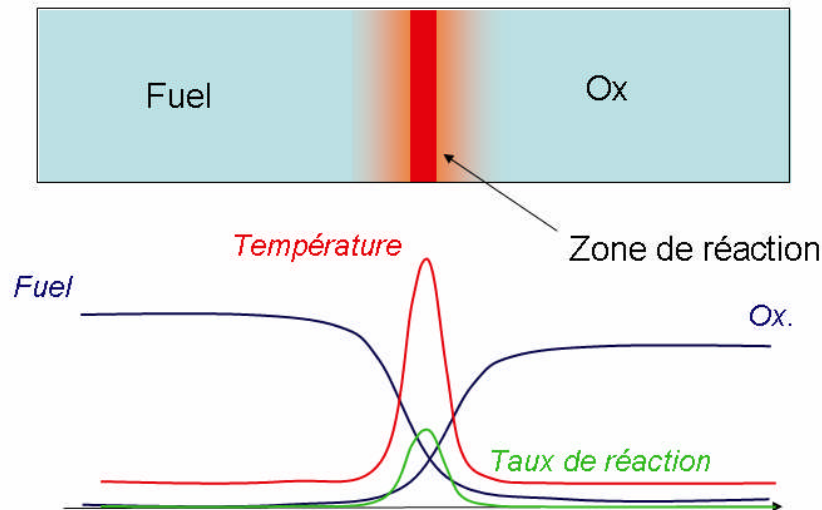
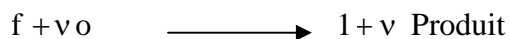


Figure I.4 : Structure du front de la flamme non- prémélangée laminaire [13]

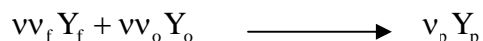
Les flammes de diffusion se développent grâce au concours des phénomènes de réaction ainsi que des phénomènes de diffusion de chaleur et de masse qui se produisent de part et d'autre de la zone réactive. Les phénomènes de convection jouent cependant un rôle plus important en amenant les réactifs et en emportant les produits de façon plus efficace que la seule diffusion. Pour que la flamme reste laminaire, il faut que les vitesses d'écoulement ne soient pas trop grandes.

Le taux de réaction chimique de ce type de flamme est principalement contrôlé par la diffusion moléculaire qui gouverne l'apport des réactifs vers les flammes.

Considérant la réaction chimique simple entre le combustible f et l'oxydant o :



En termes de fraction massique cette réaction devient :



Les équations de transport de la fraction massique et de la température sont :

$$\rho \frac{dY_f}{dt} = -\rho \bar{u} \cdot \nabla Y_f + \nabla \cdot (\rho D_f \nabla Y_f) + \dot{\omega}_f \quad (\text{I.1})$$

$$\rho \frac{dY_o}{dt} = -\rho \bar{u} \cdot \nabla Y_o + \nabla \cdot (\rho D_o \nabla Y_o) + \dot{\omega}_o \quad (\text{I.2})$$

Une nouvelle grandeur Z nommée variable de Schwab-Zeldovich est définie par :

$$Z = \frac{\phi \left(\frac{Y_f}{Y_{f,0}} \right) - \left(\frac{Y_o}{Y_{o,0}} \right) + 1}{\phi + 1} \quad (\text{I.3})$$

ϕ : Le rapport d'équivalence de la réaction, définie par :

$$\phi = s \frac{Y_{f,0}}{Y_{o,0}} \quad (\text{I.4})$$

$$s = \left(\frac{v_o W_o}{v_f W_f} \right) \quad (\text{I.5})$$

En supposant que les diffusivités massiques du combustible et de l'oxydant sont identiques, c'est-à-dire que : $D_f = D_o = D$, la variable de **Schwab-Zeldovich** Z donnée par l'équation précédente est un scalaire passif qui suit une équation de diffusion-convection sans terme source :

$$\rho \frac{dZ}{dt} = -\rho \bar{u} \cdot \nabla Z + \nabla \cdot (\rho D \nabla Z) \quad (\text{I.6})$$

Ce scalaire passif a des propriétés très intéressantes :

$Z = 1$: Dans l'écoulement de combustible

$Z = 0$: Dans l'écoulement de comburant

$Z = (x, t)$: Représente le degré de mélange de combustible et le comburant.

Sous l'hypothèse d'une chimie infiniment rapide (c'est-à-dire que le combustible et l'oxydant ne peuvent coexister sans réagir). (Voir figure I.5), le front de flamme est défini par la relation $Y_f = Y_o = Y$ et correspond donc à l'iso-surface :

$$Z = Z_{st} = \frac{1}{\phi + 1} \quad (\text{I.7})$$

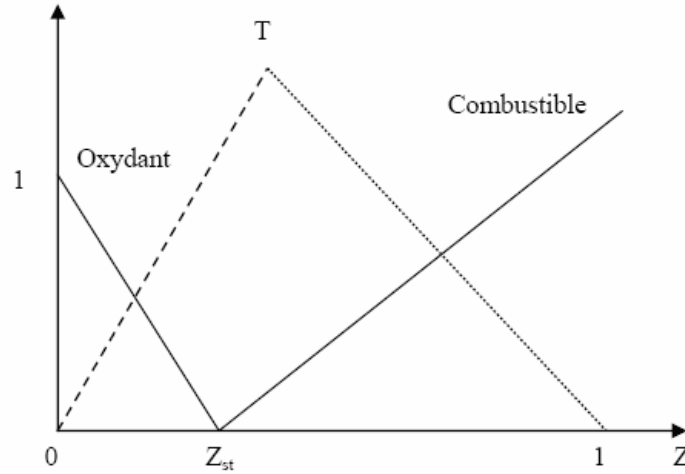


Figure I.5 : Fractions massiques réduites du combustible f , $Y_f/Y_{f,0}$, et d'oxydant o , $Y_o/Y_{o,0}$, en fonction de scalaire passif Z dans le cas d'une cinétique chimique infiniment rapide (solution de **Bruke et Schumann**).

On peut réécrire les équations des fractions massiques et de la température dans un nouveau système, où elles sont exprimées en fonction de la fraction de mélange uniquement.

On supposant que l'effet instationnaire est négligeable : $Y_k = Y_k(Z, \chi)$ et $T = T(Z, \chi)$ sont alors solutions des équations :

$$\chi \frac{\partial^2 Y}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_k = 0 \quad (\text{I.8})$$

$$\chi \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \dot{\omega}_T = 0 \quad (\text{I.9})$$

$$\chi = D |\nabla Z|^2 \quad (\text{I.10})$$

Chapitre II

Equations régissant la combustion

Introduction

Dans ce chapitre, nous rappelons la formulation des équations de bilan utilisées dans la combustion. Les équations de base pour l'étude des écoulements réactifs sont les équations de Navier-Stokes de la mécanique des fluides auxquelles sont ajoutées les équations de bilan spécifiques aux fluides réactifs (bilan d'espèces et d'énergie).

II.1 Grandeurs de la thermochimie

On appelle «équations de l'aérothermochimie » le système composé des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, des espèces et de l'énergie.

II.1.1 Grandeurs Thermodynamiques

Les équations sont écrites pour un fluide hétérogène non isotherme composé de k espèces chimiques. Si on considère un mélange de masse volumique moyenne ρ et de masse molaire moyenne W , constitué d'un nombre N d'espèces de masse molaire W_k , on notera ρ_k la masse volumique de l'espèce k présente dans une unité de volume du mélange.

- Enthalpie de mélange et chaleur massique

L'enthalpie du mélange est obtenue à partir des enthalpies de chaque espèce. On appelle $h_k(T)$, l'enthalpie massique d'une espèce k à une température T (supérieure à sa température de formation T_0), représentative de son énergie interne à l'équilibre thermodynamique :

$$h_k(T) = \underbrace{\Delta h_{f,k}^\circ(T^\circ)}_{\text{Enthalpie de formation}} + \underbrace{\int_{T_0}^T C_{p,k} d(T')}_{\text{Enthalpie sensible}} \quad (\text{II.1})$$

Où $C_{p,k}$ représente la chaleur massique de cette espèce à pression constante tabulée.

La chaleur massique du mélange C_p peut être obtenue par la loi de mélange :

$$C_p = \sum_{k=1}^N C_{p,k}(T) Y_k \quad (\text{II.2})$$

De même, l'enthalpie massique h du mélange s'obtient par :

$$h = \sum_{k=1}^N h_k Y_k \quad (\text{II.3})$$

La chaleur spécifique à pression constante C_p est constante pour les liquides et les gaz à faible gradient de température. Par contre pour les gaz à grand gradient de température, la chaleur spécifique est exprimée en fonction de la température par des polynômes de degré 4 :

$$C_{pk} = a_{0k} + a_{1k} T + a_{2k} T^2 + a_{3k} T^3 + a_{4k} T^4 \quad (\text{II.4})$$

La chaleur spécifique à volume constant est donnée par : $C_v = C_p - R$

II.1.2 Propriétés de transport

Les trois propriétés de transport sont : le coefficient de diffusion Γ , la viscosité dynamique μ et la conductivité λ .

Si le fluide est supposé Newtonien (cas des majorités des gaz), le tenseur des contraintes visqueuses est relié au tenseur du taux de déformation par la relation :

$$\tau_{ij} = \mu \frac{du_i}{dx_j} \quad (\text{II.5})$$

Le coefficient de conductivité thermique relie le flux de chaleur par conduction au gradient de température par la loi de Fourier :

$$q = -\lambda \nabla T \quad (\text{II.6})$$

Le transport de masse dû au gradient de concentrations est important dans le cas des mélanges gazeux. Il est exprimé en fonction de la fraction massique de l'espèce k par la relation :

$$\frac{\dot{m}}{S} = \Gamma_k \nabla Y_k \quad (\text{II.7})$$

Γ_k est le coefficient de diffusion moléculaire massique de l'espèce k . Ce coefficient est une fonction complexe de la composition du fluide.

II.2 Equations de l'aérothermochimie

Les éléments de la thermodynamique et de la cinétique chimique, nous permettent de modéliser l'aspect énergétique (énergie d'origine chimique) d'un milieu réactif en posant l'équation de conservation des espèces et l'équation de conservation de l'énergie.

Ils interviennent aussi dans les équations permettant de résoudre l'aspect dynamique de l'écoulement via la masse volumique du mélange et l'influence des forces extérieures qui varient en fonction des espèces chimiques composant le mélange. Tout problème de modélisation en combustion se base sur les équations de l'aérothermochimie présentées ci-dessous sous leur forme générale. [13]

II.2.1 Equation d'état

Sous l'hypothèse des gaz parfaits, l'équation d'état s'écrit :

$$P = \rho r T \quad (\text{II.8})$$

Avec : $r = \frac{R}{W}$.

W : la masse molaire moyenne du mélange, elle reste constante au cours de la réaction, R la constante universelle des gaz parfaits ($R=8,314\text{J/mol.K}$).

W : est donnée par la relation :

$$W = \left(\sum_{k=1}^N \frac{Y_k}{W_k} \right)^{-1} \quad (\text{II.9})$$

On peut alors définir pour chaque espèce du mélange, sa fraction massique Y_k , la grandeur sans dimension, de la façon suivante :

$$Y_k = \frac{m_k}{m} = \frac{\rho_k}{\rho} \quad (\text{II.10})$$

Soit : $Y_k = \sum_{k=1}^N Y_k = 1$

Dans ce travail la masse volumique suit une loi dite des gaz parfaits incompressibles. Celle-ci est donnée par :

$$\rho = \frac{P}{RT \sum \frac{Y_k}{W_k}} \quad (\text{II.11})$$

Pour chaque espèce du mélange, on définit une autre grandeur adimensionnée, la fraction molaire X_k :

$$X_k = Y_k \frac{W}{W_k} \quad (\text{II.12})$$

Soit : $X_k = \sum_{k=1}^N X_k = 1$

Ainsi que sa concentration molaire C_k : $C_k = X_k \frac{P}{RT}$ (II.13)

On aura : $\sum_{k=1}^N C_k = \frac{P}{RT}$ et $P = \sum_{k=1}^N p_k$

Une autre façon de présenter les proportions des espèces dans un mélange est de les exprimer

en pressions partielles p_k : $p_k = \frac{\rho_k RT}{W_k}$ (II.14)

II.2.2 Equation de conservation de la masse

L'équation qui exprime la conservation de la masse est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (II.15)$$

II.2.3 Equation de la quantité de mouvement

L'équation de la quantité de mouvement est donnée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{(\rho u_i u_j)}_{\text{Transport convectif}} = \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_j}}_{\substack{\text{Forces dues} \\ \text{au pression}}} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho F_i \quad (II.16)$$

τ_{ij} : Désigne le tenseur des forces visqueuses.

F_i La force de volume agissant à distance sur le fluide.

Avec :
$$\tau_{ij} = \left[\underbrace{\mu_1 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)}_{\text{Forces de viscosité}} \right] \quad (II.17)$$

Si l'écoulement est turbulent l'équation (II.16) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{(\rho u_i u_j)}_{\text{Transport convectif}} = \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_j}}_{\substack{\text{Forces dues} \\ \text{au pression}}} + \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{\substack{\text{force de} \\ \text{viscosité}}} + \underbrace{\rho F_i}_{\text{force de volume}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{(-\rho \overline{u_i u_j})}_{\substack{\text{Forces générés par} \\ \text{la turbulence}}} \quad (II.18)$$

Avec :

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (\text{II.19})$$

II.2.4 Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est donnée comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_t) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho h_t u_j) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial J_j^h}{\partial x_j} + \frac{\partial (u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$J_j^h = -\frac{\mu_t}{P_r} \left[\frac{\partial h}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^N \left(\frac{P_r}{S_{ck}} - 1 \right) h_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{II.21})$$

II.2.5 Equation de conservation des espèces chimiques

La détermination de la fraction massique pour chaque espèce, Y_k , se fait par la solution de l'équation de transport de la $k^{\text{ième}}$ espèce, qui est de la forme suivante :

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial (J_j^k)}{\partial x_j} + \dot{\omega}_k \quad (\text{II.22})$$

Dans le cas d'un écoulement gazeux, on néglige généralement la diffusion de masse par gradient de température et par gradient de pression.

La diffusion moléculaire s'effectue uniquement par gradient de concentration, elle peut être modélisé par la loi de Fick :

$$J_j^k = -\rho D_k \frac{\partial (Y_k)}{\partial x_j} \quad (\text{II.23})$$

$\dot{\omega}_k$: Exprime le « taux (ou vitesse) de réaction » de l'espèce k donné par la [loi d'Arrhenius](#).

$$\dot{\omega}_k = A_k T^{\beta k} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) = A_k T^{\beta k} \exp\left(-\frac{T_{a,k}}{T}\right) \quad (\text{II.24})$$

A_k : Est le facteur pré-exponentiel.

$T_{a,k}$: La température d'activation.

E_k : L'énergie d'activation.

La température d'activation est donnée par la relation : $T_{a,k} = \frac{E_k}{R}$

Chapitre III

Procédure

et

Résultats expérimentaux

Introduction

Ce chapitre débute par une description du banc d'essais réalisé au laboratoire de mécanique des fluides, suivi d'une description des différentes opérations effectuées notamment à l'aide d'une caméra infrarouge, illustrées par des photos.

Le dispositif que nous avons réalisé nous permet de faire plusieurs études. Nous pouvons citer principalement :

- La détermination de l'émissivité de la flamme de diffusion (non-prémélangée), dont le but de déterminer la température.
- L'impact d'une flamme de diffusion (non-prémélangée), ou une flamme prémélangée sur une plaque.
- L'impact entre deux ou trois jets.

III.1 Description du banc d'essais

III.1.1 Description des organes mécanique

- **La table** : Elle supporte le dispositif expérimental (glissière, coulisseaux, injecteurs).



Figure III.1 : Table et glissière

-**Glissière** : Elle est l'élément qui assure le déplacement selon la direction x des deux portes flammes.

-**Coulisseau de glissière** : C'est une pièce prismatique rainurée en « T » pour assurer le déplacement sur la glissière.

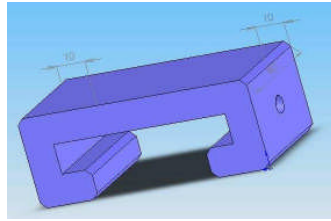


Figure III.2 : Coulisseau

- **Supports :** Ils sont au nombre de deux, et servent à la fixation de la glissière sur la table.

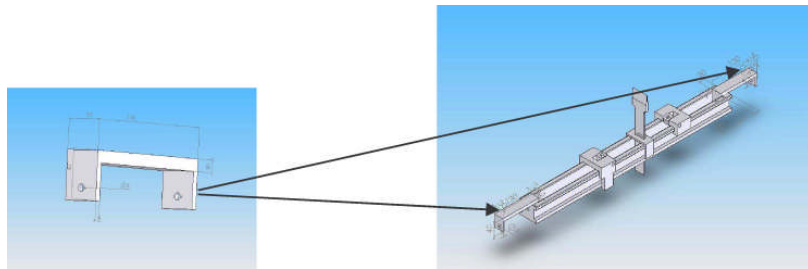


Figure III.3 : Supports de la glissière

- **L'injecteur :** L'injecteur assure la production de deux types de flammes : une flamme de diffusion sans l'utilisation de la cage et une flamme de prémélange par le biais d'une cage cylindrique .Il est en cuivre, et a comme dimension : diamètre de **5mm** et une longueur de **50mm**.



Figure III.4 : L'injecteur

- **Le corps noir :** C'est une plaque d'aluminium coloré en noir d'émissivité **0,95**, Il sert comme référence pour la mesure de l'émissivité de la flamme. Il a comme dimension **300mm** de longueur, une largeur de **300mm**, et **1mm** d'épaisseur.

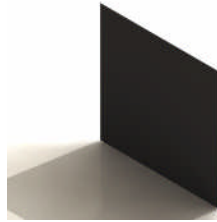


Figure III.5 : Le corps noir

- **Support d'injecteur :** C'est une plaque qui porte les injecteurs. Elle définit les différentes positions de ces injecteurs. Elle a comme dimensions **220mm** de longueur, une largeur de **100mm** et **10mm** d'épaisseur.

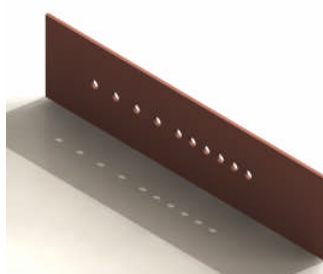


Figure III.6 : La plaque d'injecteur

- **Le cylindre :** C'est l'endroit où se fait le mélange (dans le cas de la flamme prémélangée). Donc elle n'a aucune utilité dans le cas de la flamme non-prémélangée.

- **La bouteille de gaz :** Assure l'alimentation en combustible (gaz du butane)



Figure III.7 : Bouteille de gaz

III.1.2 Appareillages de mesure

-La caméra FLIR A40M

Une caméra de thermographie infrarouge est un appareil qui capte un rayonnement invisible et le restitue sous forme d'une image visible. [14]

Une image thermique est définie comme une répartition structurée des données représentatives du rayonnement infrarouge en provenance d'une scène thermique. Une image thermique peut être obtenue à partir d'un balayage d'image en une ou plusieurs trames décalées spatialement.

- La camera utilisée peut travailler dans une plage de nombre d'onde de **11 μ m** à **15 μ m**.

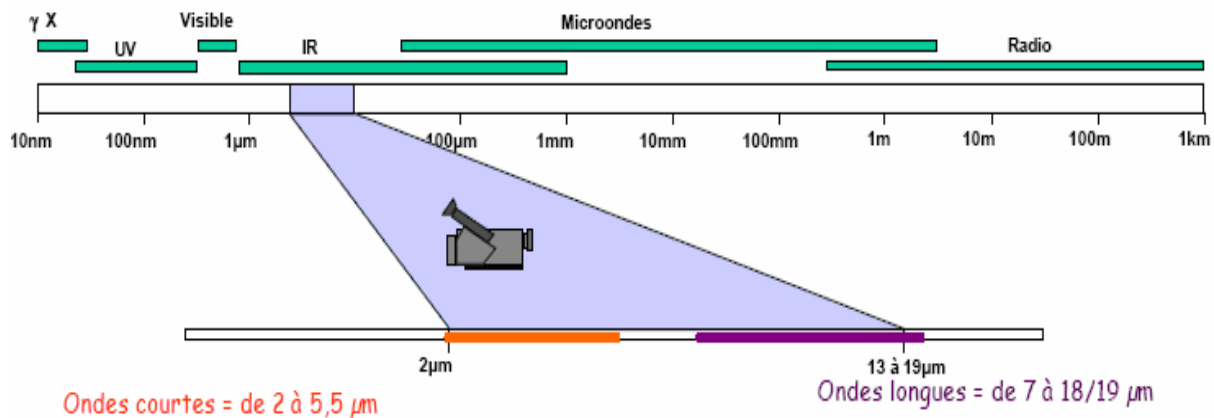


Figure III.8 : Schéma de travail de la caméra thermique

-Les caractéristiques de la caméra FLIR A40M

Les caméras **A40M** sont des caméras de thermographie infrarouge polyvalentes, destinées à des applications de **laboratoire** et/ou **industrielles** à poste fixe. Tous les modèles disposent de ports d'entrée/sortie pour une communication simple avec des automatismes. Certains sont radiométriques, c'est à dire qu'ils sont étalonnés et possèdent des capacités intégrées de mesurage en direct. Les thermogrammes (images infrarouges) sont sauvegardés soit en mémoire interne, soit transférés sur un PC. Elles utilisent un capteur matriciel micropolométrique de **320x240** (pixels), positionné derrière un objectif en germanium. [14]



Figure III.9 : La caméra thermique

- **Le débitmètre** : C'est un débit mètre à bulles de savon de **0-25ml**. Il sert à mesurer le débit du combustible réglé à partir d'une vanne à aiguilles.
- **Vanne de réglage** : C'est une vanne à aiguille. Elle règle automatiquement le débit de combustible qui vient de la bouteille de gaz butane



Figure III.10 : Débitmètre à bulles de savon

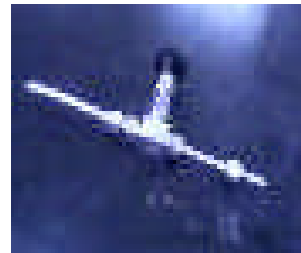


Figure III.11 : Vanne de réglage du débit

III.2 Méthode Expérimentale

III.2.1 Condition de fonctionnement du banc d'essais

Le rayonnement mesuré par la caméra dépend non seulement de la température de l'objet, mais également de l'émissivité. L'émissivité de l'objet, la température réfléchie, et l'humidité relative, sont des paramètres relatifs à l'objet et doivent être fournis à la caméra. Par contre, deux paramètres restent toujours fixes, ce sont : la distance objet caméra et la gamme de la température durant la prise de vue. Deux gammes sont fixées dans la caméra, les basses températures de (262,5K-863,6K) et les grandes températures (573K-1981,3K).

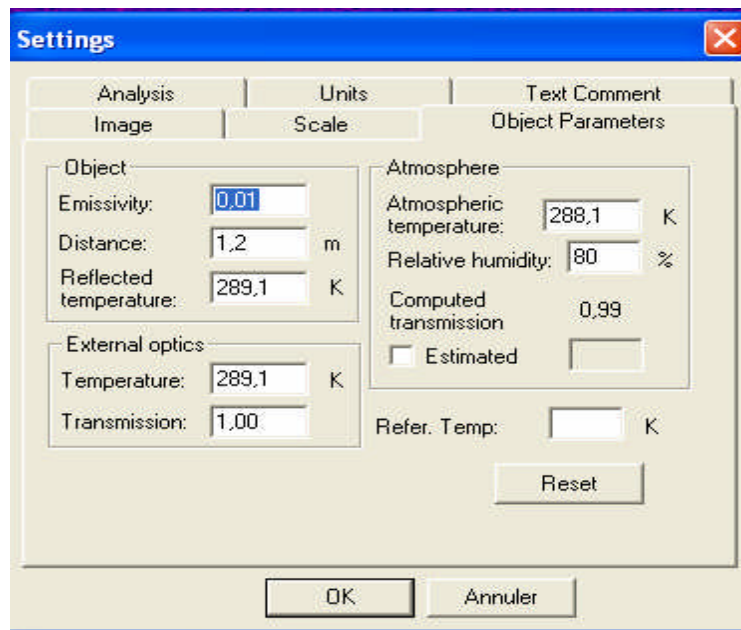
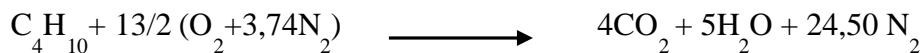


Figure III.12 : Les paramètres fixés dans la caméra

- Le gaz utilisé dans cette étude est le butane. C'est un hydrocarbure de formule brute C_4H_{10} .

La combustion du C_4H_{10} se fait suivant la réaction :



-La combustion s'effectue dans l'air ambiant, il y a lieu de considérer que ce dernier contient **23%** en poids d'oxygène, le reste étant pratiquement de l'azote qui n'intervient pas dans la combustion

Il est nécessaire de noter que :

- La température obtenue des différents éléments (corps noir, flamme, flamme et corps noir) est déterminée par l'analyse de l'image de la thermographie infrarouge en stationnaire. La température obtenue est une température locale (points, lignes ou surfaces).
- La même caméra a été utilisée dans les trois positions.
- La flamme réalisée est une flamme laminaire.
- Chaque position a été filmé pendant **2min** pour chaque range.
- La caméra donne une image en **2D**, l'axe horizontal est l'axe des x, l'axe vertical est l'axe des y.

III.2.2 Principe théorique

L'émissivité dépend de la nature de l'objet (solide, liquide ou gaz). C'est pour ce la que la manière d'étude prend différentes formes. On utilisant la caméra thermique infrarouge la méthode appliquée dans ce travail consiste à déterminer l'émissivité de l'objet en calculant la transmission de l'objet, la réflexion étant égale à 0. [1]

La théorie appliquées pour déterminer expérimentalement l'émissivité de la flamme on calculons la transmission est basée sur la loi de Stefan–Boltzman's.

Dans ce travail expérimental une caméra thermique de type **FLIR A40M** a été utilisée. Cette caméra est placée en trois positions de telle façon que deux soit perpendiculaire (**90°**) à la flamme position (1) et (2), et la troisième à (**45°**). La distance objet- caméra est de 1,2m. Une plaque en aluminium de **1mm** d'épaisseur et une émissivité de **0,95** a été utilisée comme corps noir.

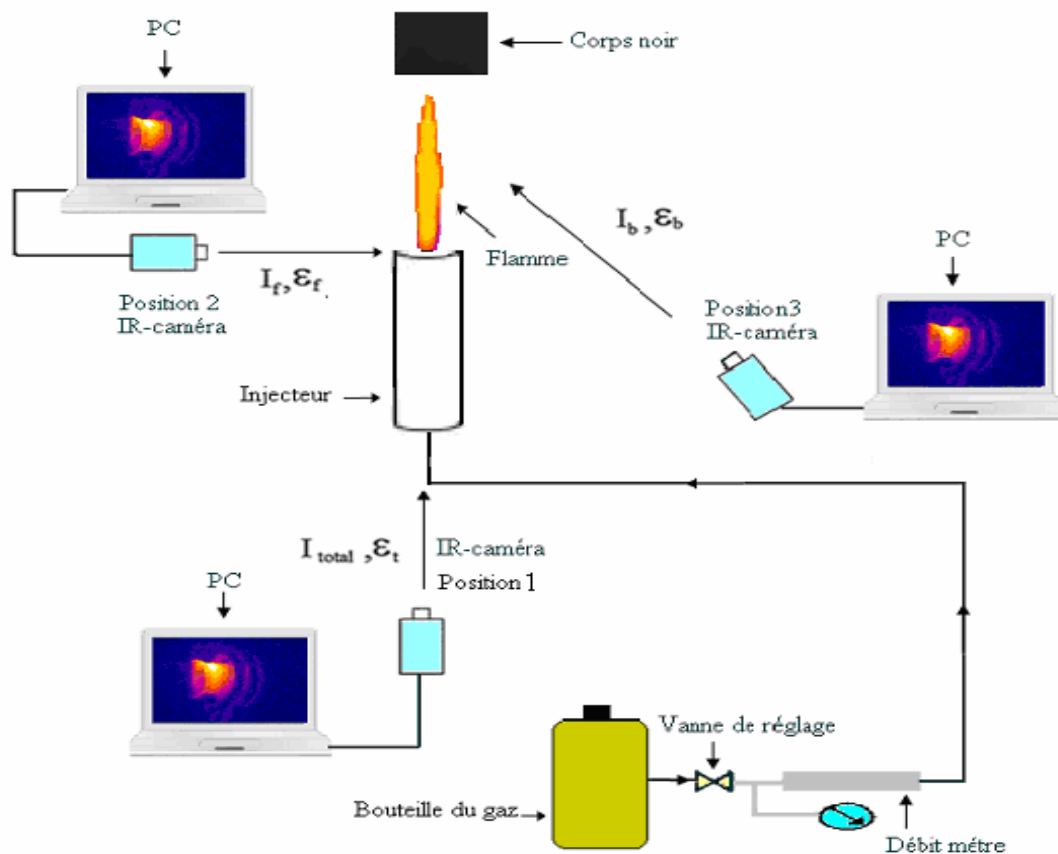


Figure III.13: Différents éléments et positions prises pour la détermination expérimentale de l'émissivité.

1- La caméra placée dans la position 2, mesure la radiation de la flamme seule :

$$I_f = \varepsilon_f \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (\text{III.1})$$

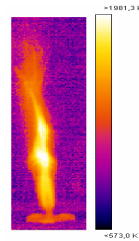


Figure III.14 : Image de la flamme

dans la position 2

2- La caméra placée dans la position 3, mesure la radiation de corps noir seul :

$$I_{bf} = \tau_f I_b = \tau_f \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4) \quad (\text{III.2})$$



Figure III.15 : Image de corps noir dans la position 3

3- La caméra placée dans la position 1, mesure la radiation totale (corps noir+flamme)

$$I_{\text{totale}} = I_f + I_{bf} \quad (\text{III.3})$$

$$I_{\text{totale}} = \varepsilon_t \sigma (T_t^4 - T_a^4) \quad (\text{III.4})$$

Si la réflectivité de la flamme est égale à 0 :

$$\varepsilon_f = 1 - \tau_f \quad (\text{III.5})$$

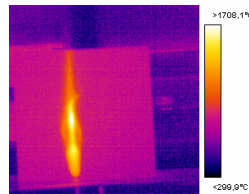


Figure III.16 : Image de la flamme et le corps noir dans la position 1

4- Le bilan de radiation mesuré dans les trois positions est :

$$I_{bf} + I_f - \underbrace{(I_f + I_{bf})}_{I_{totale}} = 0 \quad (III.6)$$

- On remplace chaque terme par sont expression et on trouve :

$$\varepsilon_f \sigma (T_f^4 - T_a^4) + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4) - \varepsilon_t \sigma (T_t^4 - T_a^4) = 0 \quad (III.7)$$

Pour déterminer l'émissivité de la flamme, il faut faire la résolution de l'équation (III.7). La résolution de cette équation nécessite de connaître quatre paramètres qui sont T_f , T_t , ε_b , ε_t .

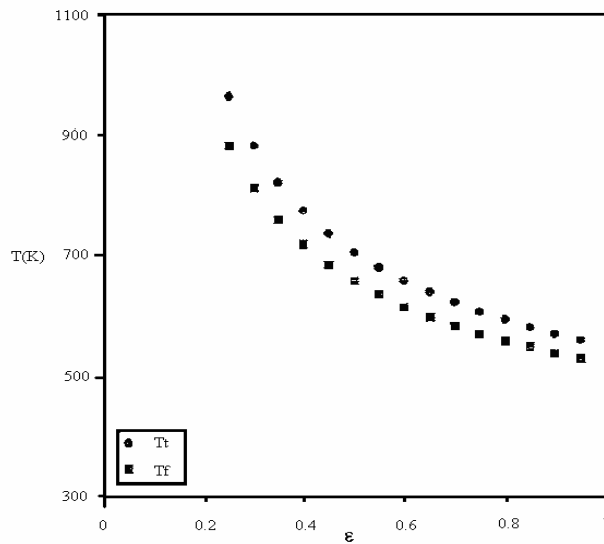


Figure III.17 : Variation de la température de la flamme (T_f), mesuré dans la position 2, et la température totale (T_t), mesuré par la flamme et le corps noir placé dans la position 1 en fonction de l'émissivité. [1]

À partir des résultats expérimentaux obtenus lors de l'analyse de l'image de la thermographie (changé l'émissivité pour obtenir la température), il a été observé que la relation [1] relie l'émissivité et la température de la forme :

$$T = A\varepsilon^B \quad (III.8)$$

- On remplace chaque terme par sont expression on trouve :

$$\underbrace{\varepsilon_f \sigma \left((A_f \varepsilon_f^{B_f})^4 - T_a^4 \right)}_{I_f} + \underbrace{(1 - \varepsilon_f) \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4)}_{I_{bf}} - \underbrace{\varepsilon_t \sigma \left((A_t \varepsilon_t^{B_t})^4 - T_a^4 \right)}_{I_{totale}} = 0 \quad (III.9)$$

$$\text{Donc : } f(\varepsilon) = \varepsilon_f \sigma \left((A_f \varepsilon_f^{B_f})^4 - T_a^4 \right) + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4) - \varepsilon_t \sigma \left((A_t \varepsilon_t^{B_t})^4 - T_a^4 \right) = 0 \quad (\text{III.10})$$

L'équation III.10 dépend uniquement de ε_t , ε_f . On change chaque fois la valeur de ε_t . Il faut trouver toutes les valeurs de ε_f qui annule la fonction $f(\varepsilon)$, donc résoudre l'équation $f(\varepsilon) = 0$.

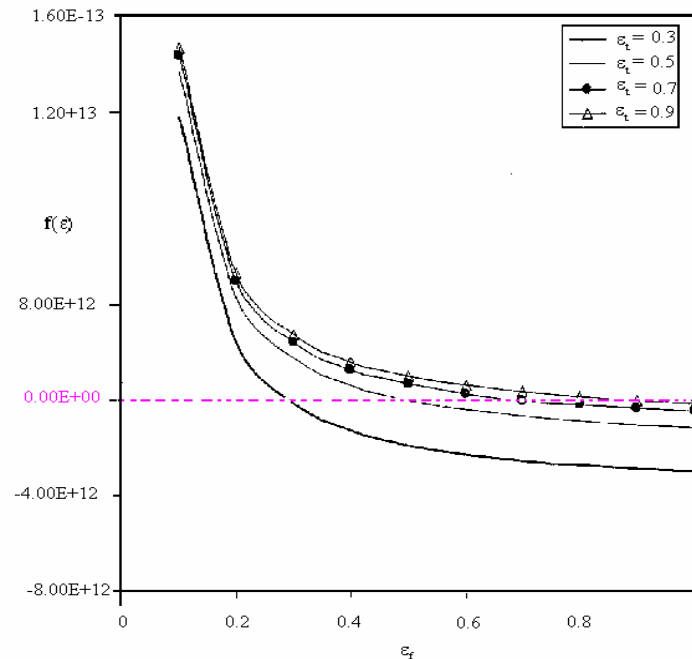


Figure III.18 : Résolution de l'équation $f(\varepsilon)$ en changeant de l'émissivité totale ε_t [1]

- On choisit, les valeurs qui vérifient ces 3 conditions : $\varepsilon_f < \varepsilon_b$, $\varepsilon_t > \varepsilon_f$, $\varepsilon_t > (1 - \varepsilon_f) \times \varepsilon_b$.

$(1 - \varepsilon_f)$: Représente la transmission de la flamme τ_f

III.2.3 Méthode d'analyse de l'image thermographique

Les données issues de la caméra sont stockées dans des fichiers avec extension « seq » ou « img ». Ces fichiers contiennent les données brutes issues de la caméra placée dans les trois positions, ainsi que de l'ensemble des paramètres de la session, nécessaires au calcul de la température de l'objet. La méthode employée pour extraire les données consiste à sauvegarder les températures obtenues chaque fois en changeant l'émissivité dans des fichiers sous **Excel**. [11]

III.2.4 Calcul d'erreur relative

Le calcul d'erreur relative entre les résultats d'analyse de l'image thermographique et la relation

$T = A\varepsilon^B$ [1] nous montrer la fiabilité de la méthode employer.

L'erreur relative est donnée par :

$$E_r = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_1^n T_{\text{réf}} - \sum_1^n T_{\text{exp}} \right)}{\frac{1}{n} \sum_1^n T_{\text{réf}}}$$

T_{exp} : Température données par l'expérimental.

$T_{\text{réf}}$: Température données par la relation. $T = A\varepsilon^B$

n : Nombre des (points, lignes, surfaces).

III.2.5 Détermination de l'émissivité de la flamme

- Procédure informatique

Comme on l'a expliqué précédemment pour déterminer l'émissivité de la flamme il faut faire la résolution de l'équation $f(\varepsilon) = 0$.

- L'équation $f(\varepsilon) = 0$ dépend uniquement de $\varepsilon_t, \varepsilon_f$, car les constantes A_t, A_f, B_t, B_f sont connues à partir de l'ajustement de l'évolution de la température en fonction de l'émissivité des résultats expérimentaux obtenus à partir de l'analyse de l'image thermographie.
- On change à chaque fois la valeur de ε_t . Il faut trouver toutes les valeurs de ε_f qui annule la fonction $f(\varepsilon)$, donc résoudre l'équation $f(\varepsilon) = 0$.
- Puis on choisi, les valeurs qui vérifient ces 3 conditions : $\varepsilon_f < \varepsilon_b$, $\varepsilon_t > \varepsilon_f$

$$\varepsilon_t > \underbrace{(1 - \varepsilon_f)}_{\tau_f} \times \varepsilon_b$$
- Une fois l'émissivité est déterminée, on revenant à la température donnée par la relation $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$.

La résolution de l'équation $f(\varepsilon) = 0$ sous un programme écrit en langage de programmation

Fortran [15], est donnée dans l'organigramme simplifier suivant :

Note : L'organigramme principal sera cité dans l'annexe G

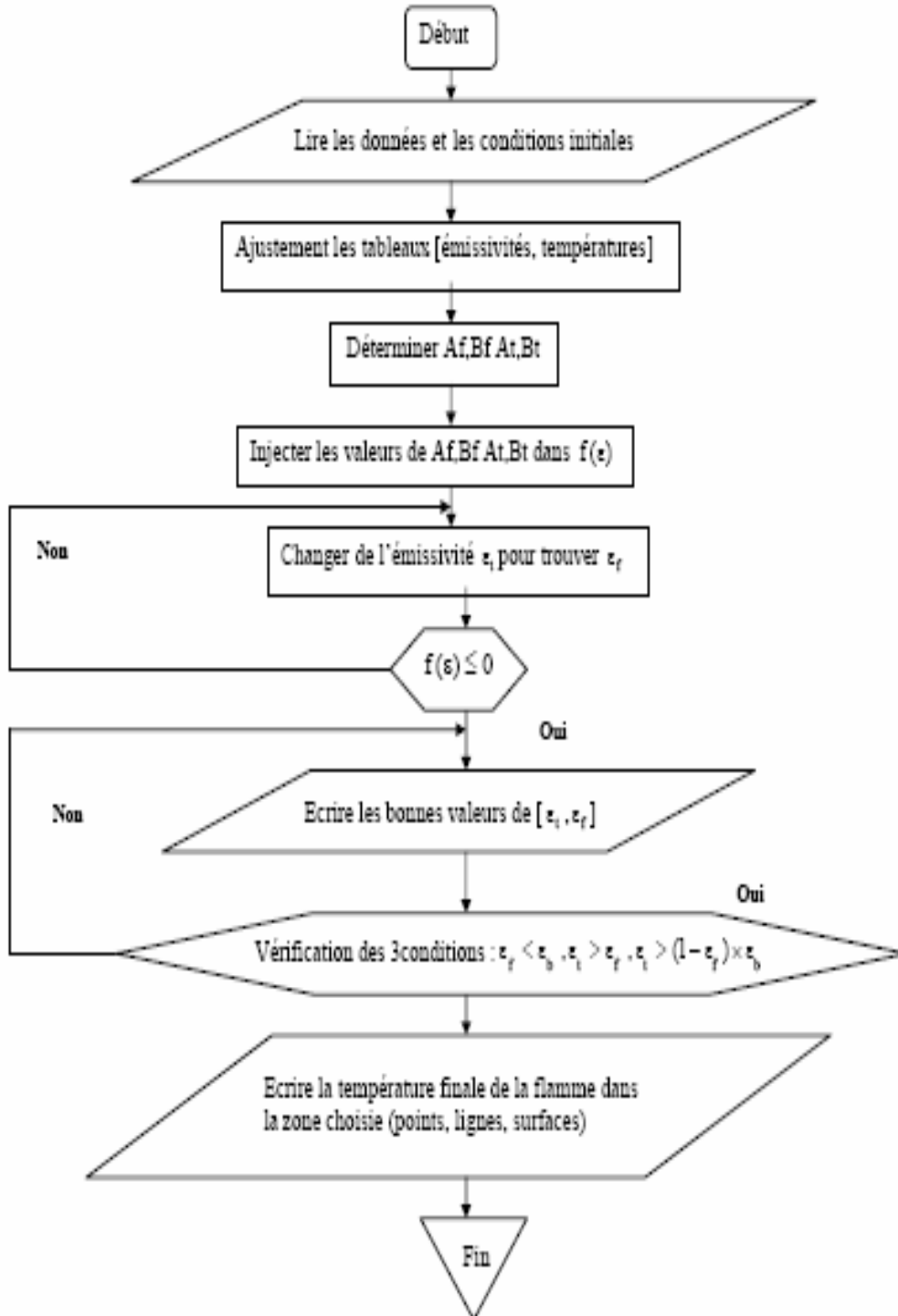


Figure III.19 : Organigramme simplifié de résolution de l'équation $f(\epsilon)$

III.3 Résultats

III.3.1 Résultats d'analyse de l'image thermographique

III.3.1.1 Résultats de l'analyse de l'image de la flamme et le corps noir (position 1)

L'analyse se fait pour une zone bien précise. La zone choisie peut être définie par : un ou plusieurs points, une ou plusieurs lignes, une surface ou plusieurs surfaces.

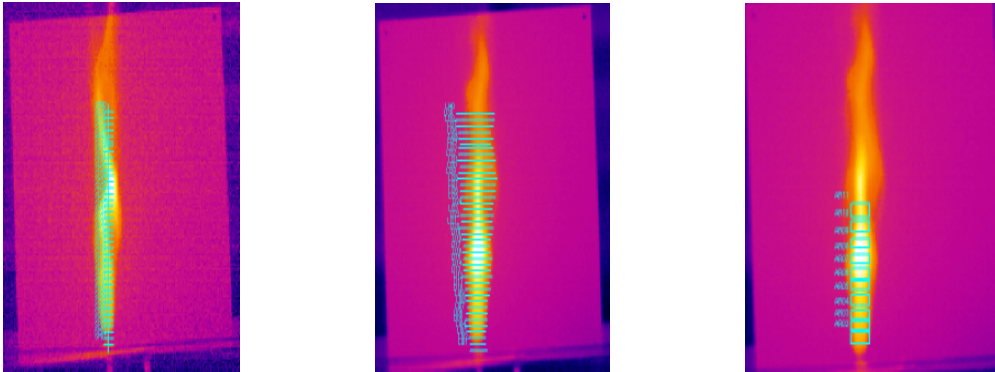


Figure III.20 : Différents zones choisies (la flamme et le corps noir)

▪ Cas des points

On a choisi des points suivant l'axe des y (exemple 40 points), 23 points ont vérifié les 3 conditions [1]. Et pour bien montrer les résultats on a divisé les 23 points en 2 figures.

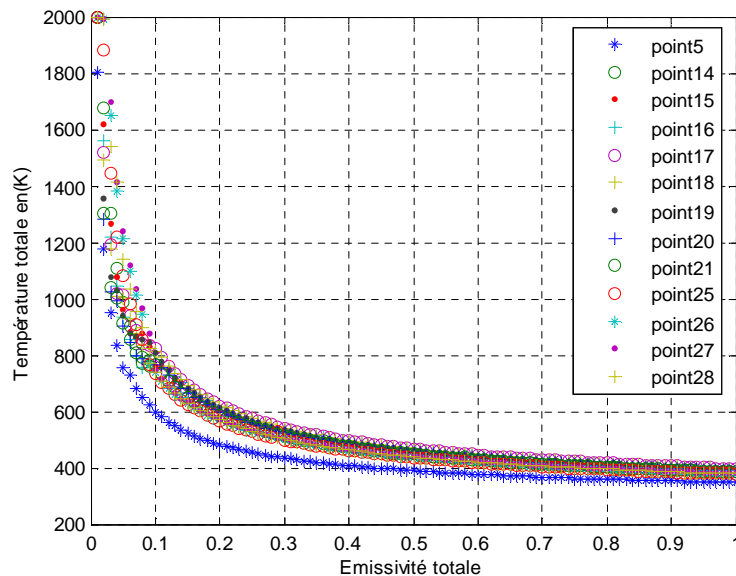


Figure III.21 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les points 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 28.

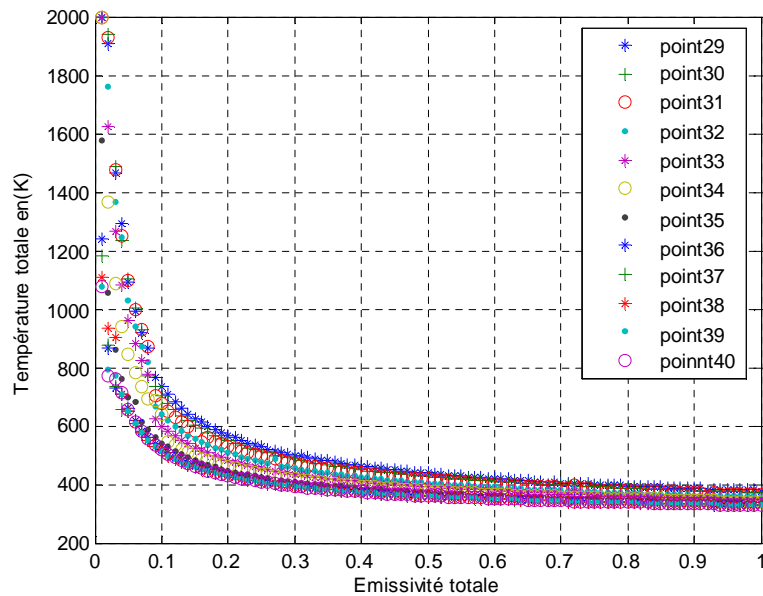


Figure III.22 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les points 30, 31, 32, 33, 34,35, 36, 37, 38, 39,40.

▪ **Cas des lignes**

On a choisie des lignes suivant l'axe des y (exemple 40 lignes), 9 lignes ont vérifié les 3 conditions [1].

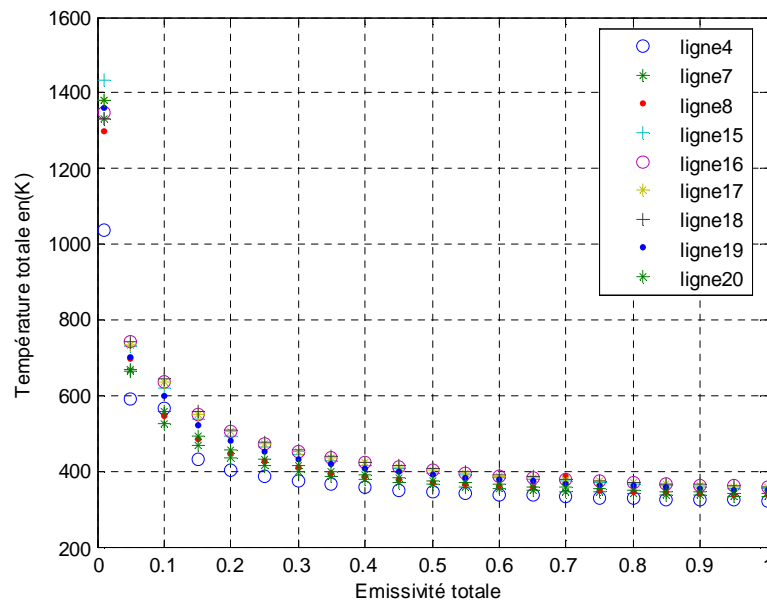


Figure III.23 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les lignes 4, 15, 16,17, 18, 19, 20.

- Cas des surfaces

On a choisie des surfaces (exemple 10 surfaces), 3 surfaces ont vérifié les 3 conditions [1].

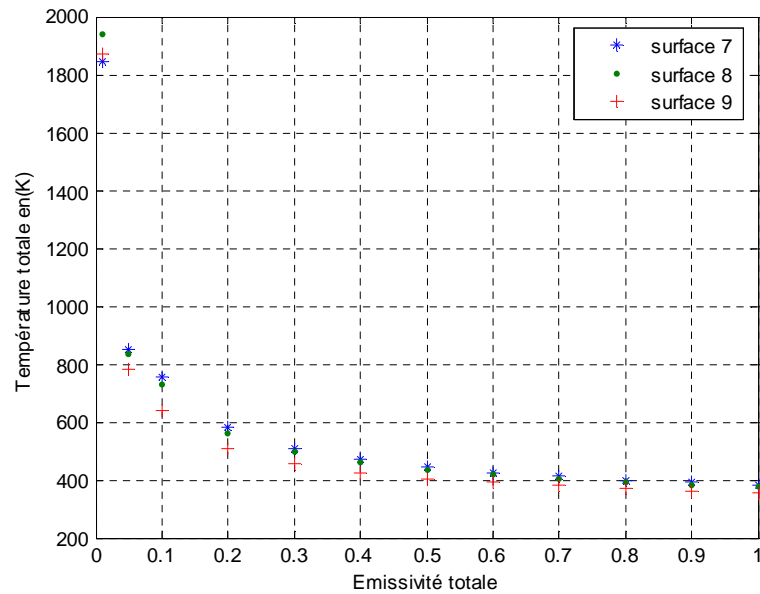


Figure III.24 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale pour les surfaces 7, 8,9.

III.3.1.2 Résultats d'analyse de la l'image de la flamme seule (position 2)

- La même procédure a été utilisée pour l'analyse de la flamme seule

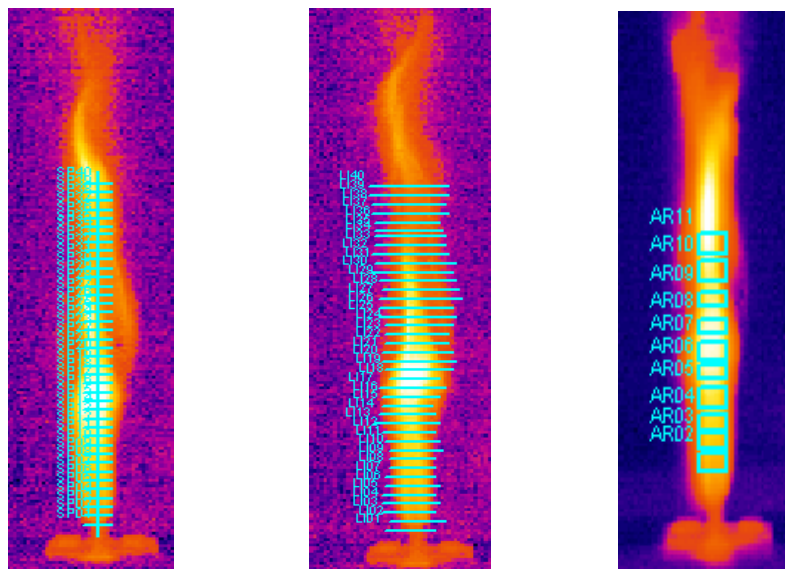


Figure III.25 : Différents zones choisies « la flamme seule »

▪ Cas des points

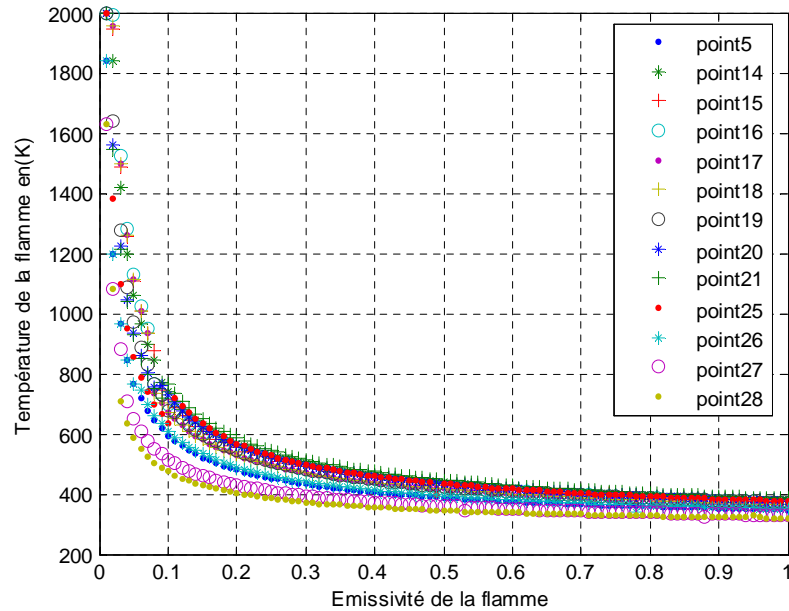


Figure III.26 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les points 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27,28.

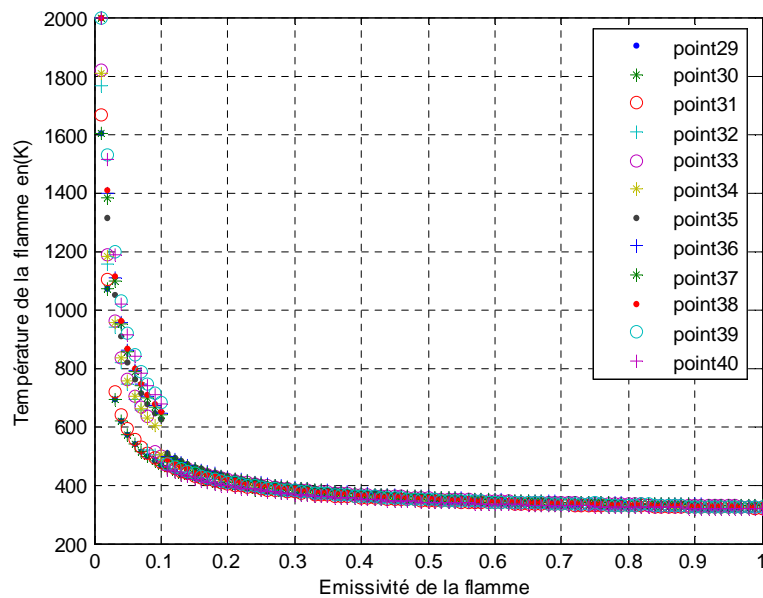


Figure III.27: Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les points 29,30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40.

- Cas des lignes

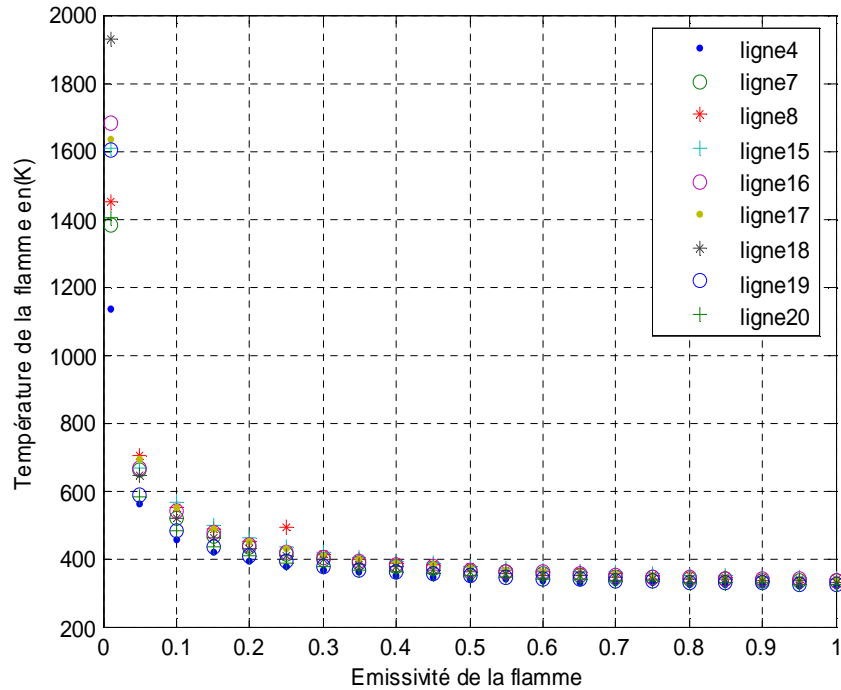


Figure III.28 : Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les lignes, 4, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

- Cas des surfaces

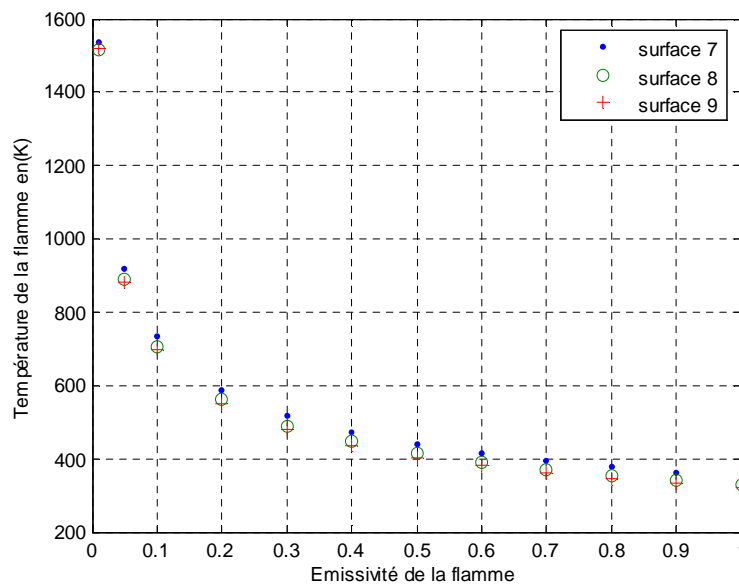


Figure III.29 Résultats expérimentaux de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme pour les surfaces 7, 8,9.

III.3.1.3 Résultats d'analyse de l'image de corps noir (position 3)

Le corps noir est un matériau solide. Contrairement à la flamme son émissivité ne change ni avec la température ni avec la position. Dans notre étude on fixe une émissivité de **0,95** et on a pris une zone quelconque. La température de corps noir sera obtenue exactement et directement (valeur fixée), $T_b=300,15\text{ K}$.

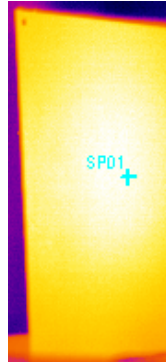


Figure III.30 : La zone choisie pour le corps noir

D'après toutes les figures représentées précédemment soient dans la position 1 ou 2, on remarque que l'allure des résultats trouvés suit la même allure trouvée par **Eulàlia Planas**. [1]

III.3.2.1 Résultats de la relation donnée par Eulàlia Planas pour la flamme et corps noir

Dans le cas de la flamme et du corps noir la relation relie l'émissivité à la température est donnée par : $T_t = A_t \varepsilon^{B_t}$. [1]

A partir de l'**ajustement** de l'évolution de la température totale en fonction de l'émissivité totale des résultats d'analyse de l'image thermographie, on détermine les constantes A_t et B_t (voir les résultats dans les tableaux : **2**(les points), **3**(les lignes), **4**(surfaces)). Puis on les injectent dans $T_t = A_t \varepsilon^{B_t}$ pour tracer l'allure de la relation donnée par **Eulàlia Planas**.

▪ Cas des points

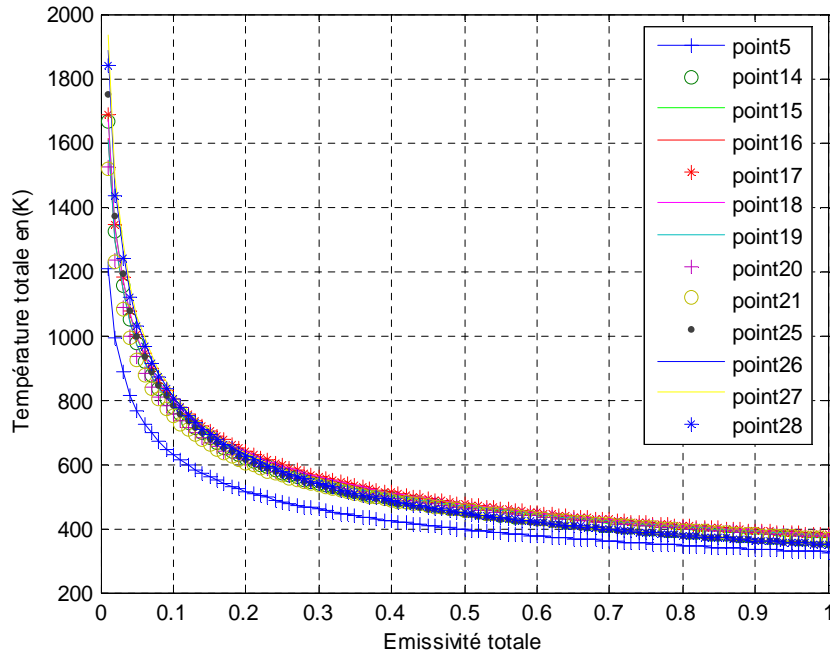


Figure III.31 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les points 5, 14, 15, 16,17, 18, 19, 20, 21,25, 26, 27,28.

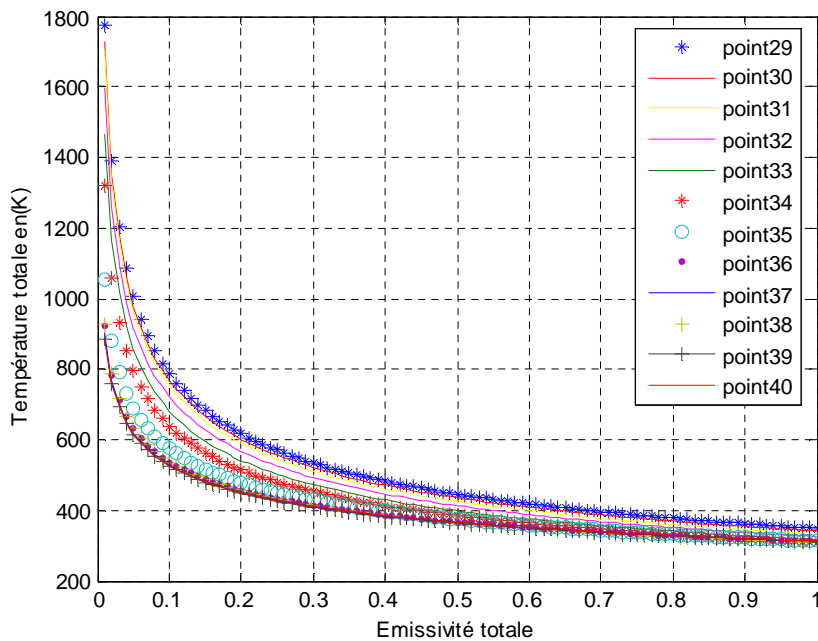


Figure III.32 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les points 29, 30,31, 32, 33, 34,35, 36, 37, 38, 39,40.

- Cas des lignes

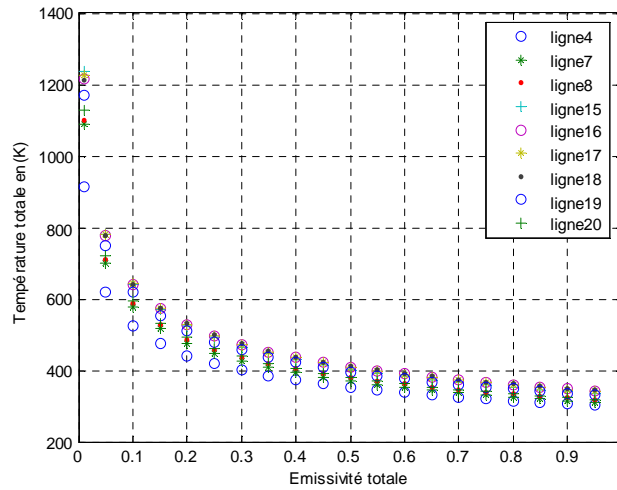


Figure III.33 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les lignes 4, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

- Cas des surfaces

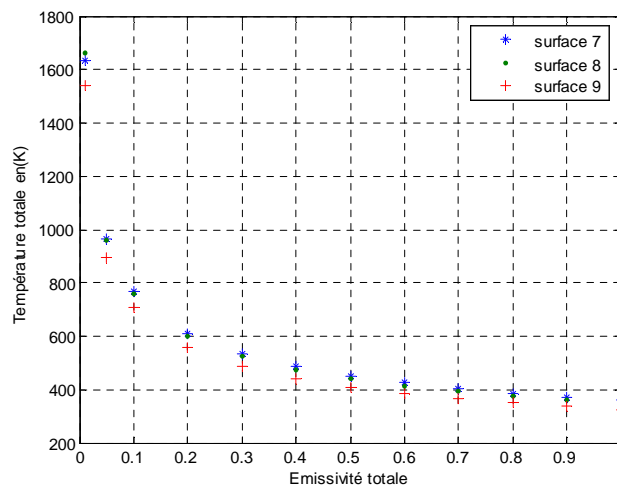


Figure III.34 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les surfaces 7, 8, 9.

III.3.2.2 Résultats de la relation donnée par Eulàlia Planas pour la flamme seule

On parle ici de l'émissivité de la flamme sans le corps noir, donc la relation devient $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$. A partir de l'ajustement de l'évolution de la température de la flamme en fonction de l'émissivité de la flamme des résultats d'analyse de l'image thermographie, on détermine les constantes A_f et B_f (voir les résultats dans les tableaux : **2**(les points), **3**(les

lignes) ,4(surfaces) cité après). Puis on les injectent dans $T_t = A_t \varepsilon_f^{B_t}$ pour tracer l'allure de la relation donnée par **Eulàlia Planas**.

▪ **Cas des points**

On trace l'évolution de cette relation dans les figures suivantes pour les 25 points cités précédemment.

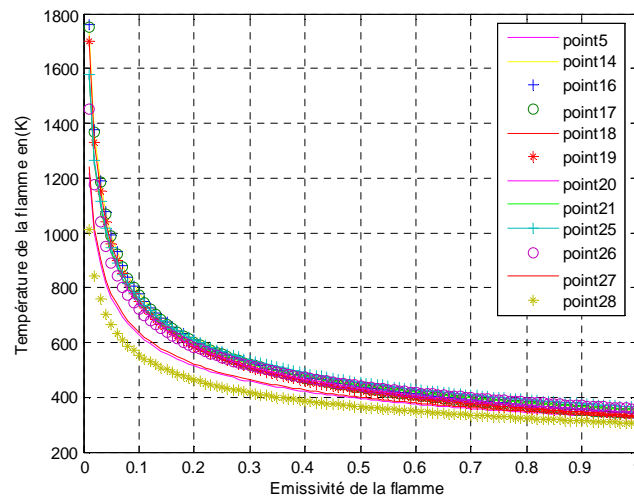


Figure III.35 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_f^{B_t}$ pour les points 5, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27,28.

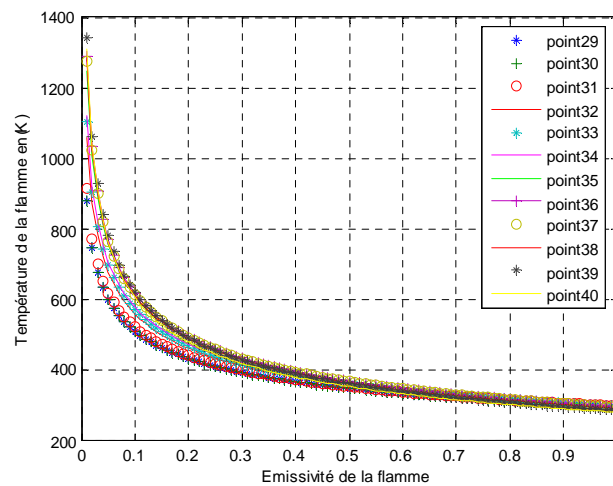


Figure III.36 : Evolution de la relation $T_t = A_t \varepsilon_f^{B_t}$ pour les points 29, 30,31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40.

- Cas des lignes

On trace l'évolution de cette relation dans les figures suivantes pour les 9 lignes citées précédemment.

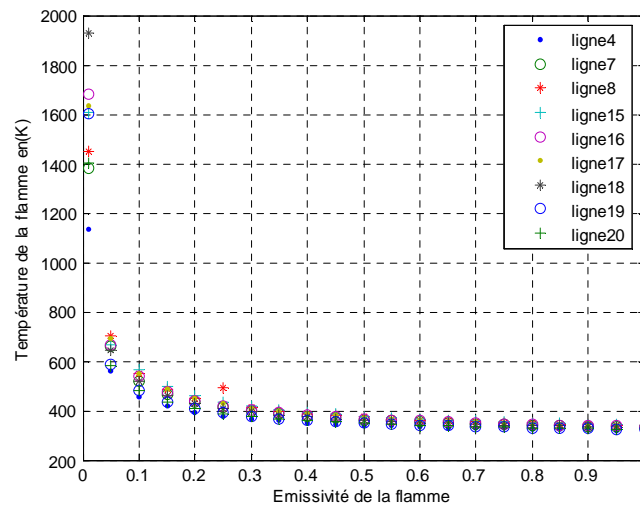


Figure III.37 : Evolution de la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$, pour les lignes 4, 15, 16, 17, 18, 19, 20.

- Cas des surfaces

On trace l'évolution de cette relation dans les figures suivantes pour les 3 surfaces citées précédemment.

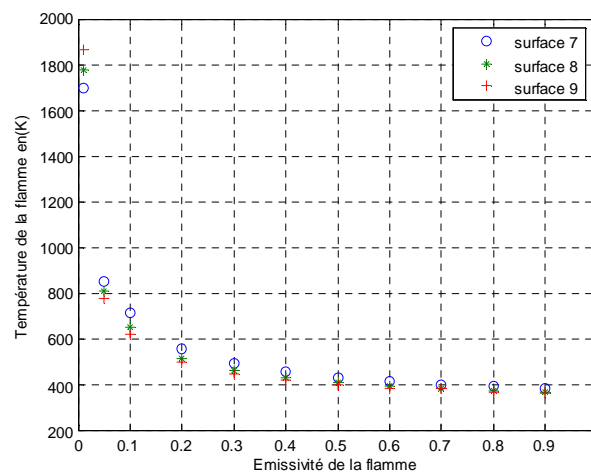


Figure III.38 : Evolution de la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les surfaces 7, 8, 9.

III.3.3 Comparaison des résultats expérimentaux et les résultats de la relation $T = A\epsilon^B$.

On trace l'évolution des résultats d'analyse de l'image thermographique et la relation $T = A\epsilon^B$ dans la même figure. Et pour bien définir cette comparaison on prend chaque point, ligne ou surface seule. On prend le point 5, la ligne 4 et la surface 7 comme exemple, les autres seront représentés dans l'annexe **B** (les points), l'annexe **C** (les lignes) et **D** (les surfaces).

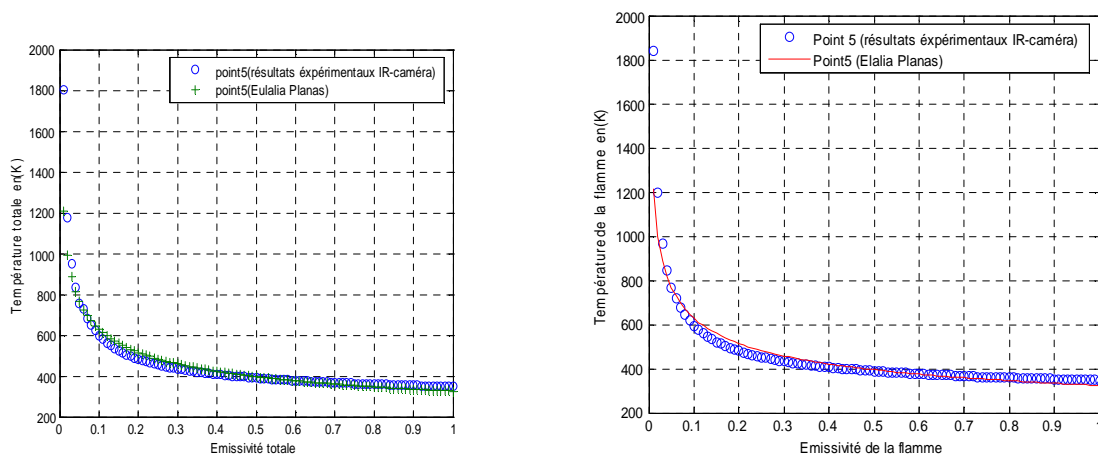


Figure III.39 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T = A\epsilon^B$ pour le point 5.

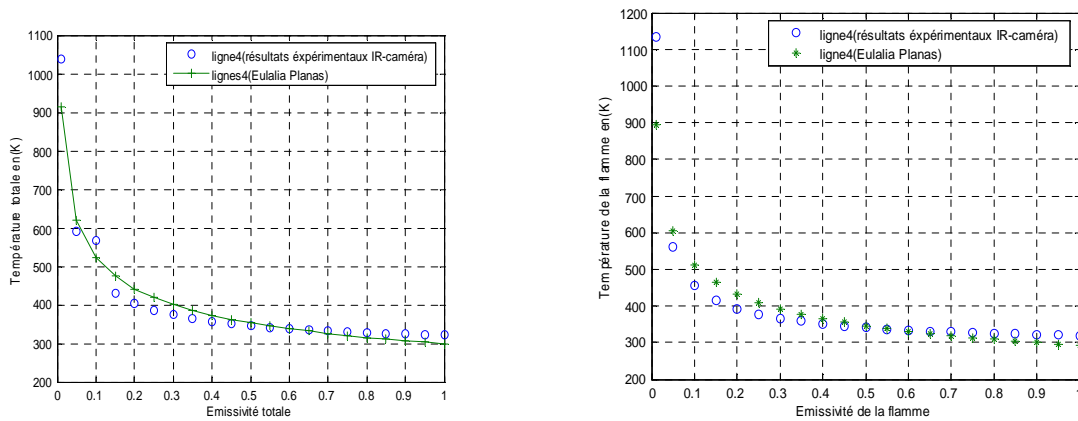


Figure III.40 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T = A\epsilon^B$ pour la ligne 4.

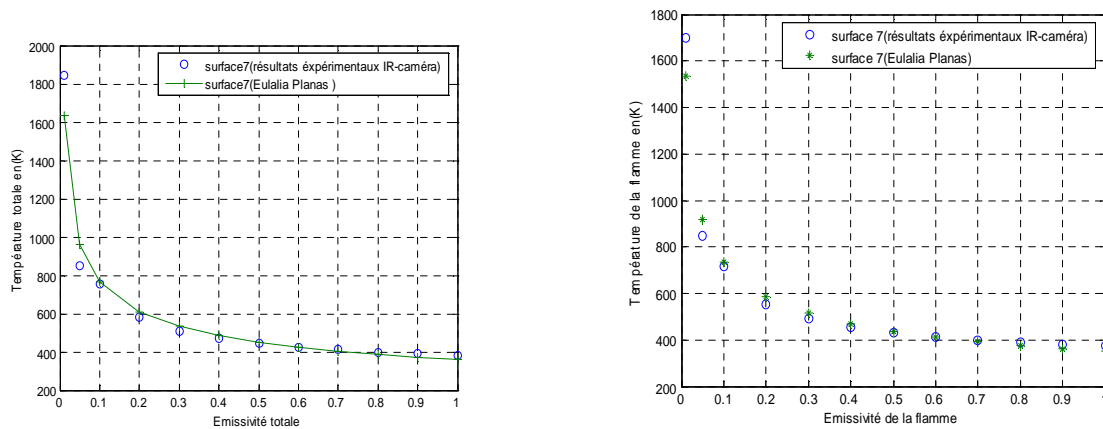


Figure III.41 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T = A\epsilon^B$ pour la surface 7.

III.3.4 Erreur relative

- L'erreur relative des points :

$$E_{rp} = \frac{\frac{1}{25} \left(\sum_1^{25} T_{réf} - \sum_1^{25} T_{exp} \right)}{\frac{1}{25} \sum_1^{25} T_{réf}}$$

- L'erreur relative des lignes :

$$E_{rl} = \frac{\frac{1}{9} \left(\sum_1^9 T_{réf} - \sum_1^9 T_{exp} \right)}{\frac{1}{9} \sum_1^9 T_{réf}}$$

- L'erreur relative de la surface :

$$E_{rs} = \frac{\frac{1}{3} \left(\sum_1^3 T_{réf} - \sum_1^3 T_{exp} \right)}{\frac{1}{3} \sum_1^3 T_{réf}}$$

Zone choisie	Points	Lignes	Surfaces
Erreur relative pour la flamme et le corps noirs	1,6	0,7	0,47
Erreur relative pour la flamme seule	2%	0,9%	0,50%

Tableau III.1 : Erreur relative entre les résultats d'analyse de l'image thermographie et la relation $T = A\epsilon^B$.

Après avoir calculé l'erreur relative, on remarque que cette erreur est **très faible**. Ce ci nous permet de dire que la fonction qui relie la température à l'émissivité est bien $T = A\epsilon^B$.

III.3.5 Profil de la température

L'exécution de programme écrit en langage de programmation **Fortran** [15], donne les résultats suivants :

- **Cas des points**

Points	y (mm)	y/d	A _f (K)	B _f	A _t (K)	B _t	ε _t	ε _{f(fin)}	T _{f(fin)} (K)
5	19,2	0	323,52	-0,28	325,42	-0,28	0,90	0,89	334,22
14	62,4	8,64	351,1	-0,34	362,53	-0,33	0,77	0,67	402,37
15	67,2	9,6	343,10	-0,35	369,60	-0,32	0,80	0,55	422,84
16	72	10,56	339,25	-0,35	377,64	-0,31	0,82	0,47	444,38
17	76,8	11,52	332,66	-0,35	379,97	-0,32	0,85	0,40	461,74
18	81,6	12,48	332,66	-0,35	380,32	-0,32	0,83	0,39	462,16
19	86,4	13,44	344,24	-0,33	377,60	-0,31	0,83	0,45	445,45
20	91,2	14,4	354,12	-0,32	373,98	-0,30	0,80	0,58	423,46
21	96	15,36	364,41	-0,31	367,90	-0,30	0,84	0,82	388,17
25	115,2	19,2	357,01	-0,30	349,85	-0,34	0,52	0,52	434,22
26	120	20,16	327,25	-0,28	346,58	-0,36	0,86	0,53	393,86
27	124,8	21,12	305,02	-0,26	348,19	-0,37	0,95	0,23	446,97
28	129,6	22,08	296,3	-0,24	349,09	-0,36	0,99	0,001	1569,98
29	134,4	23,04	294,45	-0,23	349,25	-0,35	0,99	0,001	1516,04
30	139,2	24	294,96	-0,23	341,55	-0,35	0,99	0,18	443,00
31	144	24,96	296,53	-0,24	332,85	-0,35	0,93	0,31	393,01
32	148,8	25,92	293,85	-0,27	325,92	-0,34	0,88	0,44	367,84
33	153,6	26,88	295,31	-0,28	316,76	-0,33	0,83	0,56	348,44
34	158,4	27,84	297,18	-0,28	310,35	-0,31	0,80	0,65	336,88
35	161,6	28,48	295,27	0,31	312,38	-0,26	0,76	0,65	337,76
36	166,4	29,44	293,56	-0,32	312,02	-0,23	0,81	0,70	329,69
37	171,2	30,4	292,79	-0,31	310,99	-0,23	0,82	0,70	327,28
38	176	31,36	289,70	-0,32	309,85	-0,23	0,80	0,67	329,39
39	180,8	32,32	284,4	-0,33	312,2	-0,22	0,77	0,61	335,19
40	185,6	33,28	278,04	-0,33	313,12	-0,22	0,78	0,55	338,81

Tableau III.2 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en **Fortran** pour les 25 points

La figure suivante montre le tracé de l'évolution de la fonction de l'émissivité $f(\epsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les points 5, 14, 15, 16, 17, 18, les autres points ont été tracés dans l'annexe B.

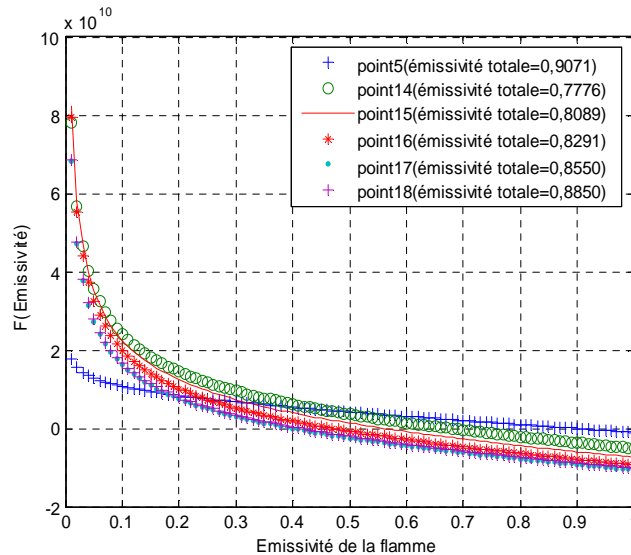


Figure III.42 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\epsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les lignes 5, 14, 15, 16, 17, 18.

▪ Cas des lignes

Lignes	y (mm)	y/d	A _f (K)	B _f	A _t (K)	B _t	ε _t	ε _{f(fin)}	T _{f(fin)} (K)
4	14,4	0	292,62	-0,24	298,99	-0,24	0,77	0,72	315,82
7	28,8	2,88	303,92	-0,27	305,88	-0,27	0,95	0,94	308,31
8	33,6	3,84	312,73	-0,29	314,72	-0,27	0,96	0,94	317,43
15	67,2	10,56	312,38	-0,29	330,47	-0,28	0,78	0,60	362,07
16	72	11,52	302,58	-0,30	337,96	-0,27	0,83	0,45	383,81
17	76,8	12,48	306,68	-0,30	337,06	-0,28	0,82	0,49	378,76
18	81,6	13,44	293,20	-0,32	340,23	-0,27	0,85	0,39	394,48
19	86,4	14,4	289,22	-0,29	326,63	-0,27	0,85	0,44	365,34
20	91,2	15,36	289,82	-0,27	314,43	-0,27	0,82	0,55	340,4

Tableau III.3 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en Fortran pour les 9 lignes.

La figure suivante montre le tracé de l'évolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour lignes 4, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 19,20.

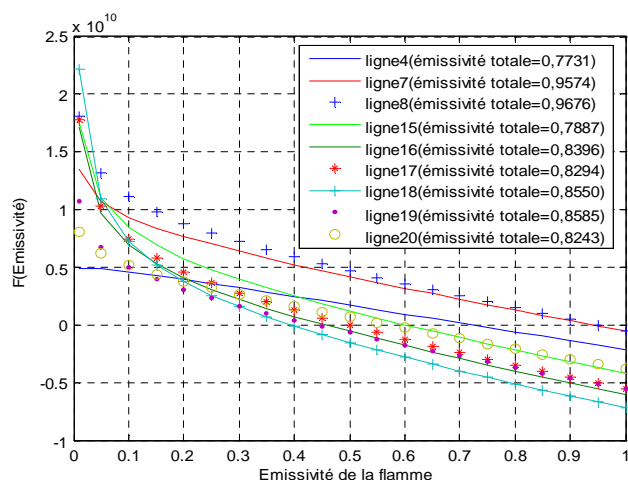


Figure III.43 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les lignes 4, 7, 8, 15, 16, 17, 18, 19,20.

▪ Cas des surfaces

surfaces	$y_1 - y_2$ (mm)	$y_1 / d - y_2 / d$	A_f (K)	B_f	A_t (K)	B_t	ε_t		$T_{f(fin)}$ (K)
7	275,2-281,6	55,04-56,32	350,86	-0,32	359,48	-0,32	0,78	0,67	397,41
8	165-270,4	33 -54,08	328,87	-0,33	348,82	-0,33	0,80	0,58	392,7
9	157-259,2	31,4-51,84	320,06	-0,33	324,7	-0,33	0,76	0,73	355,19

Tableau III.4 : Tableau récapitulatif des résultats d'exécution de programme écrit en Fortran pour les surfaces 7, 8,9.

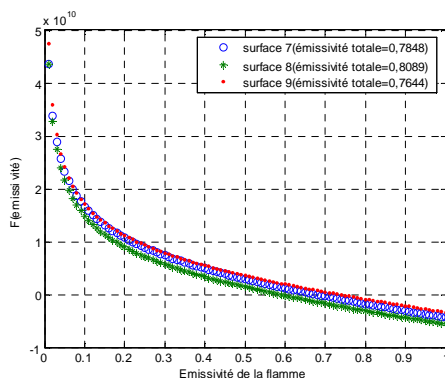


Figure III.44 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les surfaces 7, 8,9.

- Cas des points

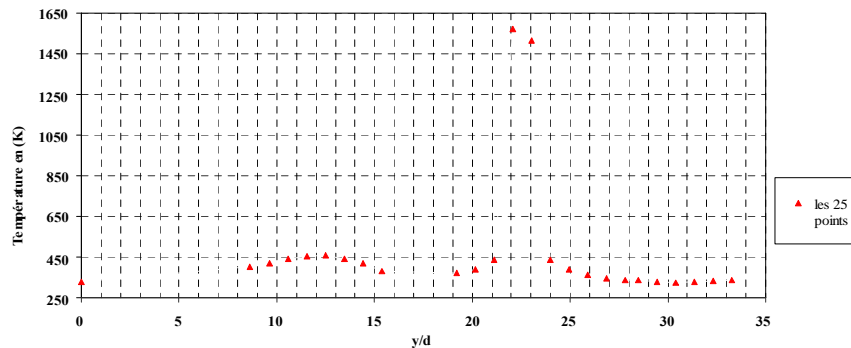


Figure III.45 : Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 25 points

La figure III.45 représente le profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 25 points parmi les 40 points, qui ont vérifié les 3 conditions [1].

- De $y/d = 0$ (points 5) jusqu'à $y/d = 8,5$ (point 18), un réchauffement de la température, on constate que cette zone représente la zone de mélange.
- De y/d (point 18) jusqu'à $y/d = 15,5$ (point 21), la flamme se refroidit un peu, à cause des perturbations, dues au phénomène de la turbulence imposée par l'extérieur (courant d'air, marche des gents,...).
- De $y/d = 19$ (point 25) jusqu'à $y/d = 22$ (point 28), la température atteint son maximum de 1570 K, on constate que cette zone représente la zone de réaction.
- De $y/d = 23$ (point 29) jusqu'à $y/d = 34,5$ (point 40), la flamme se refroidit une autre fois et la température diminue, on constate que cette zone représente la zone des produits de combustion.

- Cas des lignes

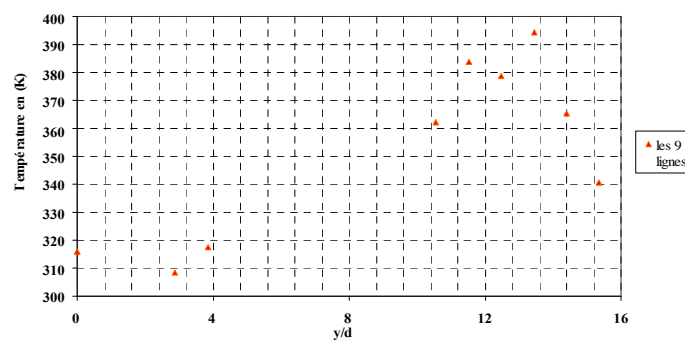


Figure III.46 : Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 9 lignes

La figure III.46 représente le profil radial de la température dans la zone de la flamme, pour les 9 lignes parmi les 40 lignes, qui ont vérifiés les 3 conditions.

- De $y/d=0$ (ligne 4) jusqu'à $y/d =3$ (ligne7), un refroidissement du à la diminution de la température (phénomène due à la turbulence extérieur),
- De $y/d =4$ (ligne8) jusqu'à $y/d =14,5$ (ligne18), un réchauffement du à une augmentation de la température, elle atteint une température maximum de 400K.

47

- De $y/d =14,5$ (ligne18) jusqu'à $y/d =15,5$ (ligne20), la flamme se refroidie une autre fois, cet perturbation et due au phénomène extérieur qui influe sur les résultats obtenues.
- **Cas des surfaces**

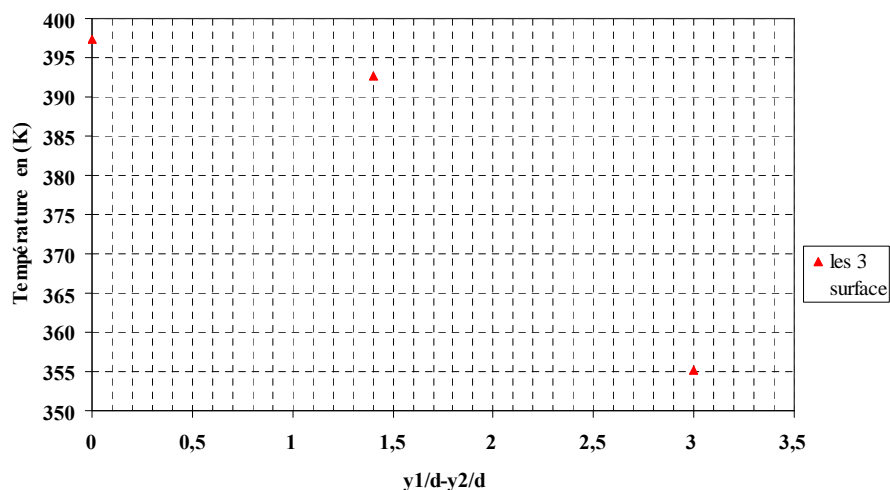


Figure III.47 : Profil radial de la température dans la zone de la flamme pour les 3 surfaces

La figure III.47 représente le profil radial de la température dans la zone de la flamme, pour les 3 surfaces parmi les 10 surfaces, qui ont vérifié les 3 conditions.

- De $y/d =0$ (surface 7) jusqu'à $y/d = 3$ (surface 9), la flamme se refroidie et la température diminue de 397 K jusqu'à 355 K.

Chapitre IV

Méthode et Résultats numériques

Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter, la démarche numérique utilisée, les différents schémas numériques existants dans le logiciel **FLUENT**, ainsi d'expliquer le déroulement des points suivants :

1. La création de la géométrie sous le logiciel **GAMBIT** ;
2. La stratégie de maillage;
3. Le choix et la définition des conditions aux limites dans **GAMBIT** ;
4. Définition du problème sous le logiciel **FLUENT** (choix des paramètres) ;
5. Le calcul avec **FLUENT** pour les différents cas retenus ;
6. L'analyse des résultats obtenus ;

La figure IV.1 représente les différentes étapes à suivre pour la simulation sur les logiciels **FLUENT** et **GAMBIT**. [16]

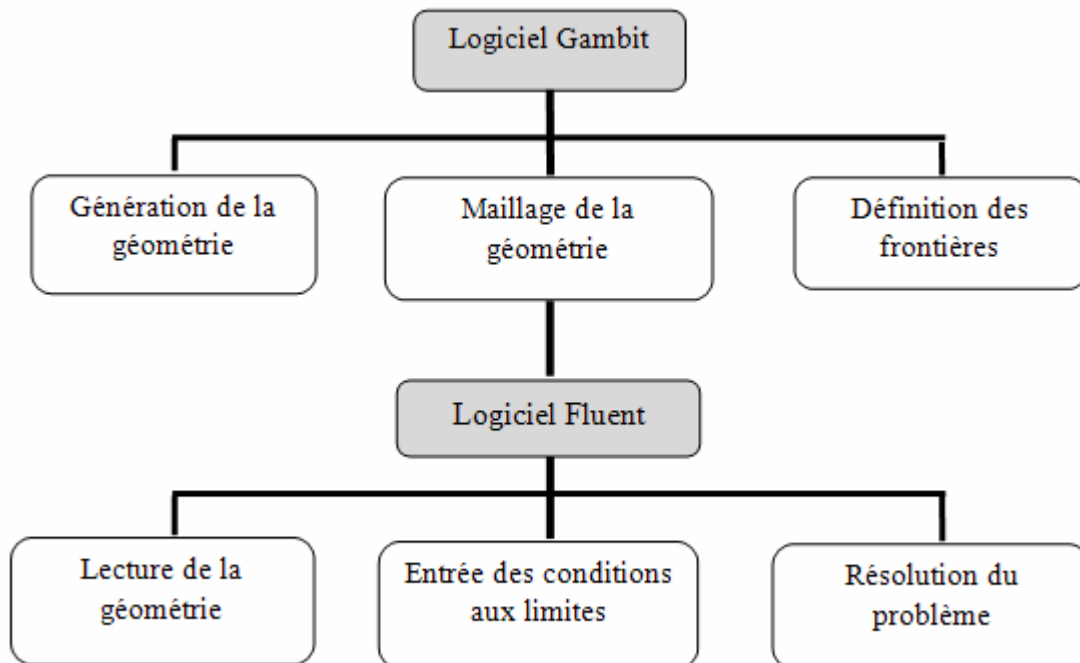


Figure IV.1 : Les étapes de la simulation sur les logiciels **FLUENT** et **GAMBIT**

IV.1 Construction de la géométrie

IV.1.1 Conception de la géométrie et génération de maillage

Le premier travail à accomplir dans une simulation numérique est la conception de la géométrie et le choix du maillage adapté à la nature de l'écoulement en particulier, le maillage doit être fin dans les zones où l'on atteint **des gradients très importants** des grandeurs physiques.

Une connaissance à priori des ces grandeurs tiré des expériences sur des écoulements similaires est donc utile pour l'établissement du maillage.

La construction de la géométrie a été faite suivant les étapes ci dessous :

1- La conception de la géométrie

- Génération des points
- Génération des lignes
- Génération des surfaces

2- Génération de maillage

Le maillage **quadratique structuré** a été utilisé dans ce travail

3- Définition des conditions aux limites

Dans le présent travail la géométrie a été dessinée possible grâce au logiciel de conception de géométrie **GAMBIT**.

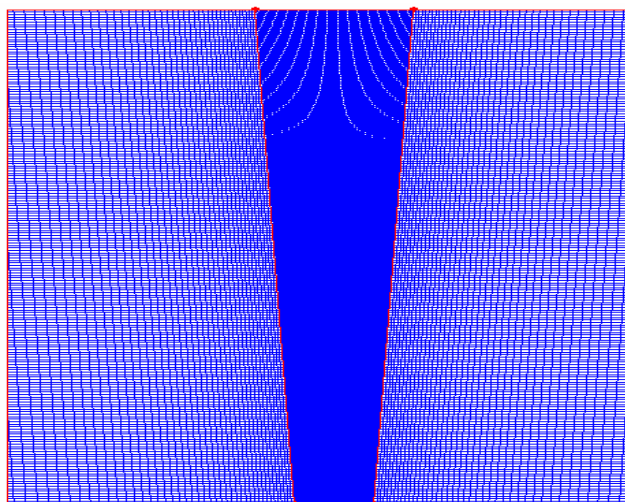


Figure IV.2 : Maillage utilisé

IV.1.2 Conditions aux limites

La résolution numérique de l'équation de transport nécessite la définition des conditions initiales et aux limites. On définit les conditions aux limites suivantes :

- **Entrée combustible (butane)**

- L'entrée de combustible est liée au débit mètre où une vitesse de **0,3m/s** a été mesurée. Nous avons donc imposé la condition « **vélocity inlet** », et une température de l'écoulement entrant de **300K**.

Les fractions massiques d'entrées: $Y_{C_4H_{10}} = 1$, $Y_{O_2} = 0$, $Y_{H_2O} = 0$, $Y_{CO_2} = 0$.

- **Sortie combustible (butane)**

Par contre à la sortie la flamme est à l'air ambiant, la condition « **pressure outlet** » a été choisie.

- **Entrée oxydant (air)**

L'air est ouvert à l'atmosphère, par conséquent à l'entrée la condition « **pressure inlet** » a été imposée, et une température de l'écoulement d'air entrant de **300K**.

Les fractions massiques d'entrées $Y_{C_4H_{10}} = 0$, $Y_{O_2} = 0,23$, $Y_{H_2O} = 0$, $Y_{CO_2} = 0$.

- **Sortie oxydant (air)**

La sortie est ouverte à l'atmosphère, la condition « **pressure outlet** » a été imposée.

- On initialise les paramètres de calcul par rapport aux conditions aux limites choisies

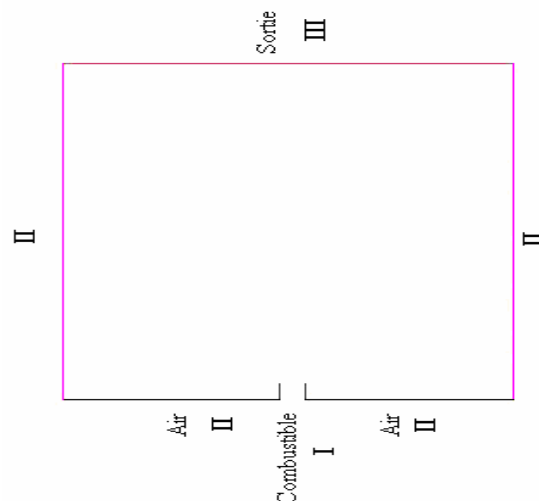


Figure IV.3 : Conditions aux limites imposées

I : Vitesse imposée, **II** : Pression à l'entrée imposée, **III** : Pression à la sortie imposée

IV.2 Choix des paramètres sous FLUENT

IV.2.1 Modes de calcul

- **Simple précision ou double précision**

" FLUENT " offre deux modes de calcul : le mode "double précision" et le mode "simple précision". Dans le mode "double précision" : les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant **64 bits**, alors que le mode "simple précision" : utilise une représentation à **32 bits**. Dans notre travail le mode "simple précision" a été choisi. [16]

IV.2.2 Choix de la formulation du solveur

Une fois que le chargement de fichier de maillage (réaliser avec le logiciel GAMBIT) est effectuée sous FLUENT, nous devons mettre à l'échelle la géométrie sous " FLUENT ", on peut choisir entre plusieurs formulations du solveur.

Le solveur découplé "**Segregated**", choisi comme le solveur le plus rapide pour ce projet. [16]

IV.2.3 Modèles de calcul utilisés

Dans le présent travail, on utilise un modèle géométrique en **2D** et les équations régissant l'écoulement en régime stationnaire. L'algorithme **SIMPLE** est adoptée pour le couplage " Vitesse -Pression ". (Tableau IV.1). [16]

Modèles	Options
Géométrie	2D
Discrétisation temporelle	Stationnaire
Modèle de turbulence	Le modèle laminaire
Couplage Vitesse Pression	Simple

Tableau IV.1 : Modèles de discrétisation

Les paramètres thermodynamiques tel que : la viscosité thermique, le coefficient de diffusion, les chaleurs spécifique et la conductivité thermique des différentes espèces sont tirés de la bibliothèque des caractéristiques thermo-physique implanté dans la version **6.3** du logiciel FLUENT. [16]

IV.2.4 Schémas d'interpolation

Les résolutions effectuées, ici, utilisent la variante du schéma «Standard» (disponible dans **FLUENT**) pour la pression. Ce schéma est assez stable et précis, et pour les autres variables on utilise le schéma « Amont deuxième ordre ». [16]

Le tableau III. 2 résume les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail.

Variable	Schémas d'interpolation
Pression	Standard
Quantité de mouvement	Amont deuxième ordre
Energie	Amont deuxième ordre
Fraction de Mélange	Amont deuxième ordre

Tableau IV.2 : Schémas numériques utilisés

IV.3.5 Facteurs de relaxation

On utilise des paramètres de relaxations présentées dans le (Tableau IV.2). Ces paramètres permettent d'accélérer la convergence du calcul.

Variables	Facteurs de Relaxation
Pression	0,75
Densité	1
Forces de volume	1
Quantité de mouvement	0,75
Energie	1
Fraction de Mélange	0,95

Tableau IV.3 : Paramètres de relaxation.

Après avoir choisi les différents paramètres de **FLUENT**, on passe à l'étape de lancement des calculs. Il est important de vérifier que le maillage utilisé est suffisamment fin pour que les résultats numériques soient aussi proches que possible de la solution exacte. Plusieurs grilles ont été réalisées pour tester le maillage du point de vue convergence de la solution, et temps de calcul. La grille retenue est à **66000** nœud.

IV.3 Résultats numériques et interprétations

Nous présenterons ici les résultats de la simulation numérique de la flamme de diffusion laminaire butane/air.

IV.3.1 Contour des différents paramètres

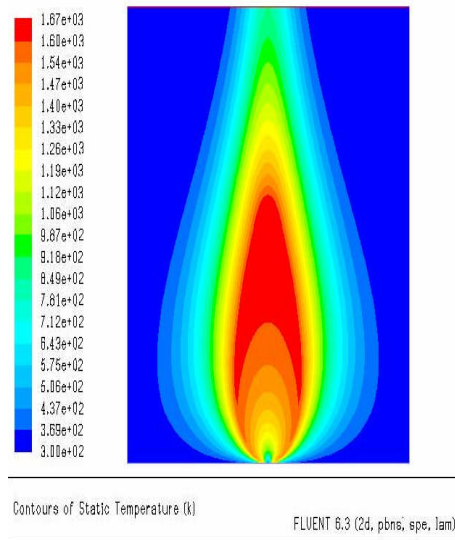


Figure IV.4 : Contour de la température statique de la flamme C₄H₁₀/Air

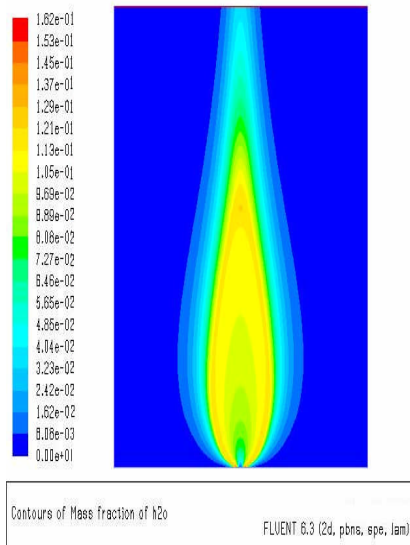


Figure IV.5 : Contour de la fraction de H₂O de la flamme C₄H₁₀/Air

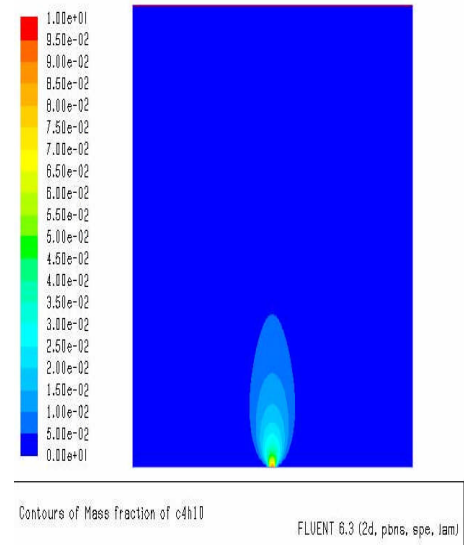


Figure IV.6 : Contour de la fraction de C₄H₁₀ de la flamme C₄H₁₀/Air

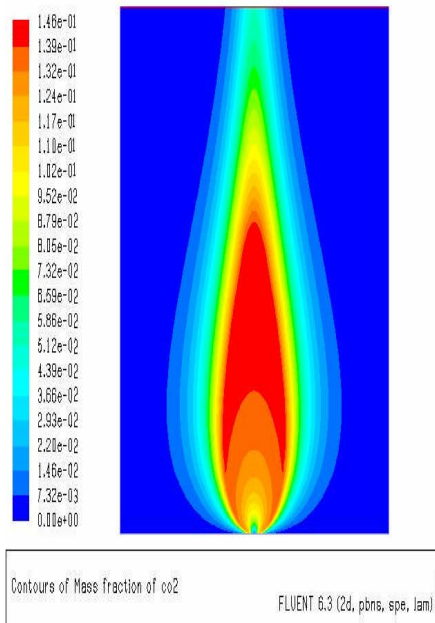


Figure IV.7 : Contour de la fraction de CO₂ de la flamme C₄H₁₀/Air

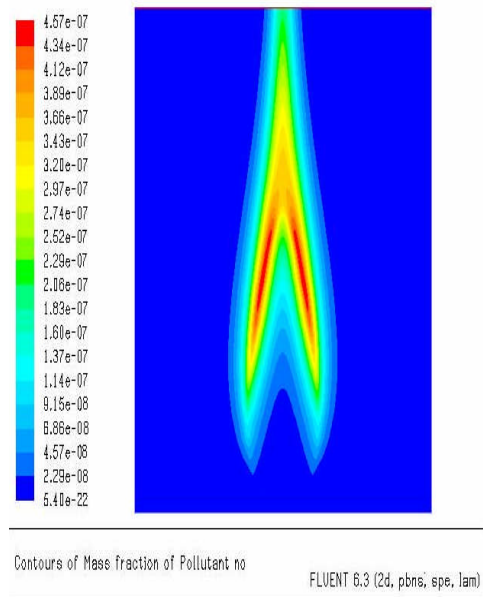


Figure IV.8 : Contour de la fraction de NO_x de la flamme C₄H₁₀/Air

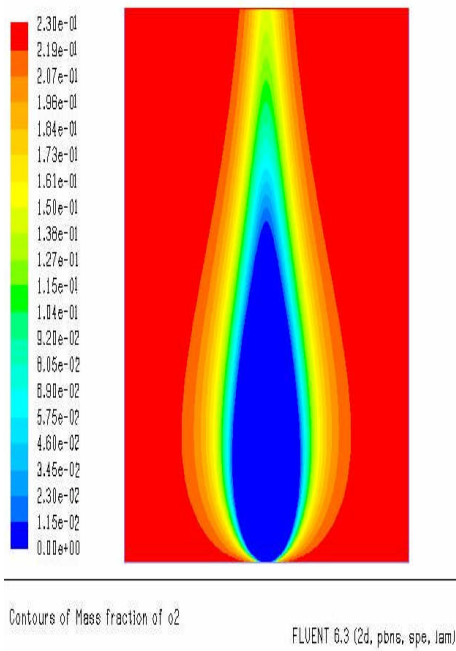


Figure IV.9 : Contour de la fraction de O₂ de la flamme C₄H₁₀/Air

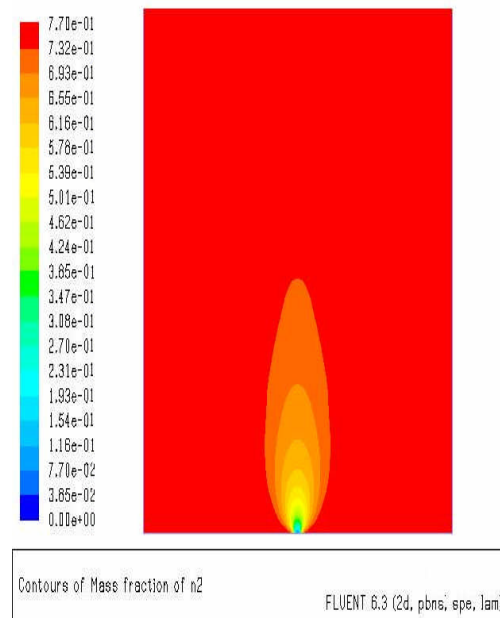


Figure IV.10 : Contour de la fraction de N₂ de la flamme C₄H₁₀/Air

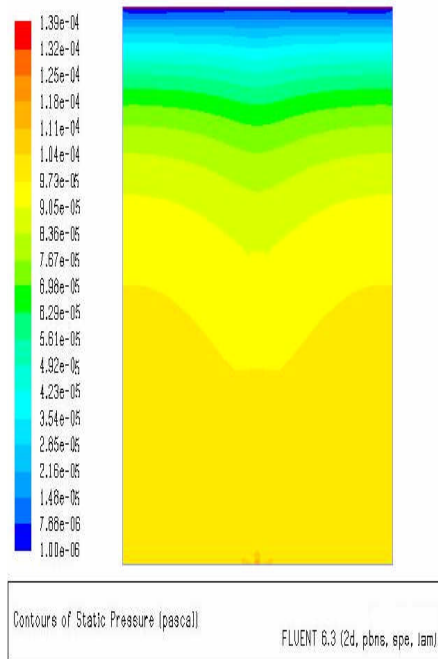


Figure IV.11 : Contour de la pression statique de la flamme C_4H_{10}/Air

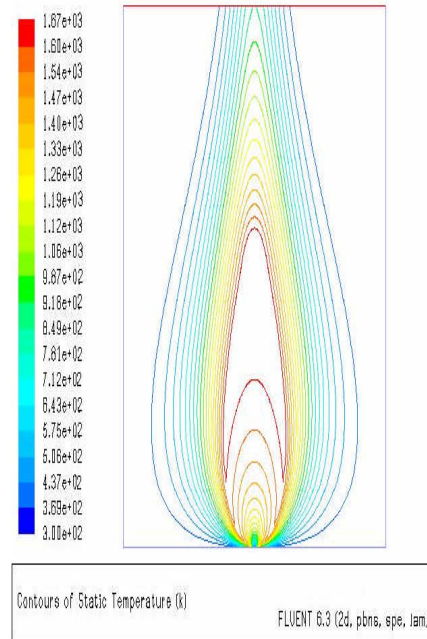


Figure IV.12 : Ligne de contour de la température statique de la flamme C_4H_{10}/Air

IV.4.2 Profil de la température

On trace le profil de la température le long de tout le volume de contrôle, car on'a pas assez d'information sur les cordonnés expérimentaux qui peuvent être coincide avec les cordonnés numériques.

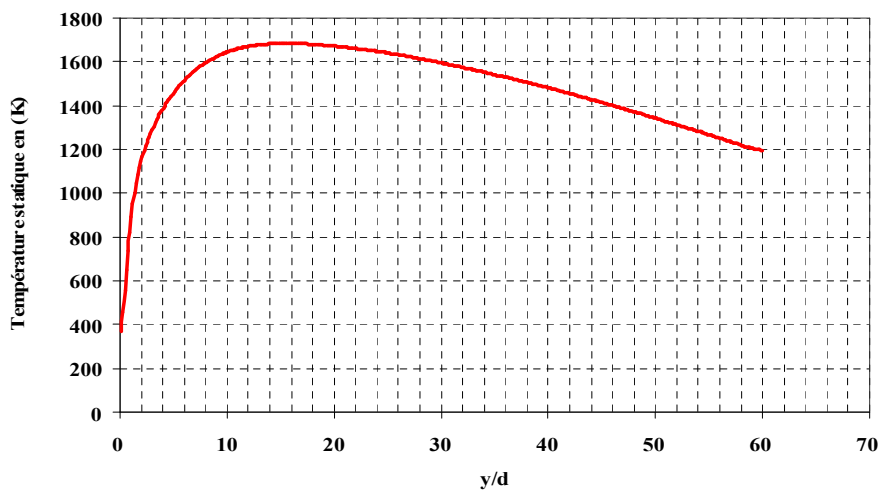


Figure IV.13 : Profil radial de la température dans la zone de la flamme C_4H_{10}/Air

La figure IV.13 représente le profil radial de la température dans la zone de la flamme C_4H_{10}/Air

- De $y/d=0$ on remarque que la température est de à 300 K, on constate que cette zone correspond au zone du gaz pur.
- De $y/d=0$ jusqu'à $y/d= 12$ un réchauffement du au augmentation de la température jusqu'à 1670K, on constate que cette zone correspond à la zone du gaz et les produit de la combustion.
- De $y/d =12$ jusqu'à $y/d =20$ la flamme attend sont maximum est reste stable en 1670K, on constate que cette zone est la zone de réaction.
- De $y/d = 20$ jusqu'à $y/d= 60$, un refroidissement du au diminution de la température, on constate que cette zone est la zone de l'air et les produits de la combustion.

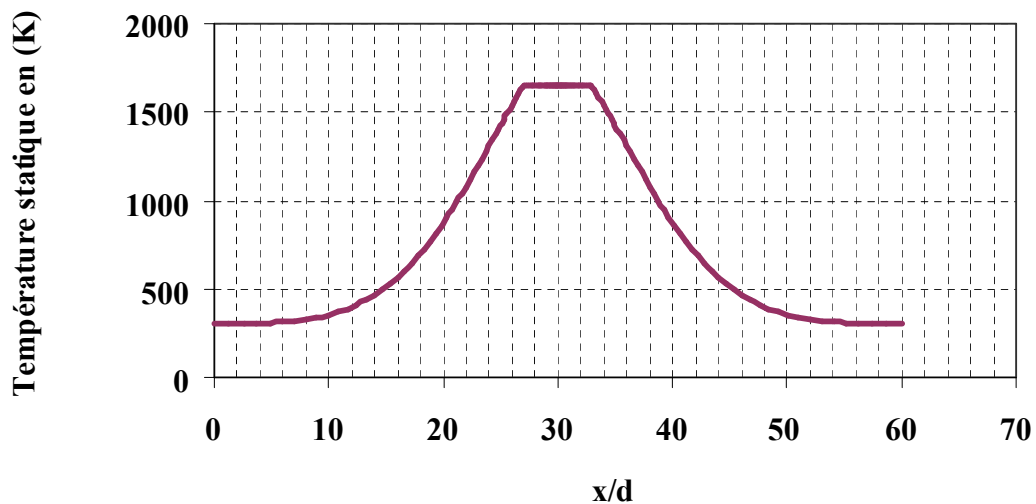


Figure IV.14 : Profil axial de la température dans la zone de la flamme C_4H_{10}/Air

La figure IV.14 représente le profil axial de la température dans la zone de la flamme C_4H_{10}/Air .

- En $x/d= 0$ c'est de l'air pur (ambiant) il est à une température de 300K.
- De $x/d=1$ jusqu'à $x/d= 27$ un réchauffement due au augmentation de la température jusqu'à 1670K, on constate que cette zone est la zone de air et les produits de la combustion.
- De $x/d=27$ jusqu'à $x/d= 35$ la flamme attend sont maximum et reste constante, on constate que cette zone est la zone de réaction à 1670 K.

- De $x/d=35$ jusqu'à $x/d=60$ un refroidissement due au diminution de la température, on constate que cette zone est la zone de gaz et les produits de la combustion.
 - On remarque bien que le profil de la température suivant l'axe des x est symétrique.

IV.4.3 Profil des polluants NOx et CO₂

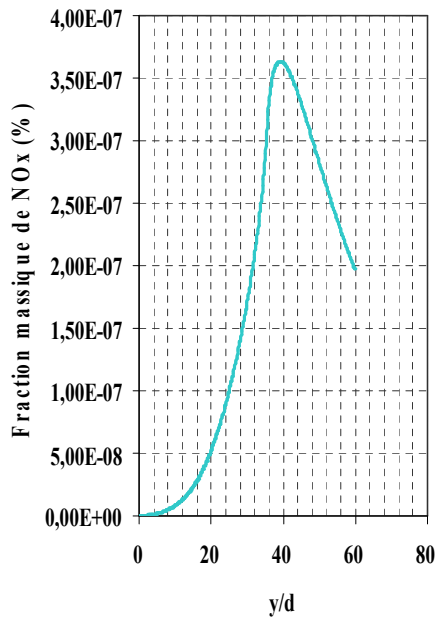


Figure IV.15 : Profil radial de NO_x de la flamme C₄H₁₀/Air

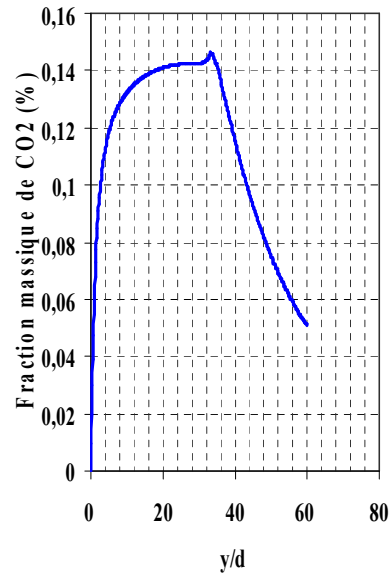


Figure IV.16 : Profil radial de CO₂ de la flamme C₄H₁₀/Air

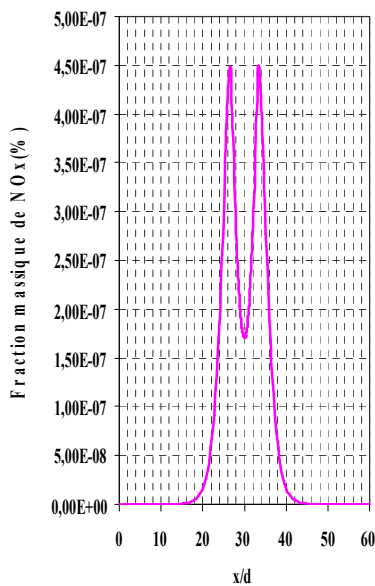


Figure IV.17 : Profil axial de NO_x de la flamme C₄H₁₀/Air

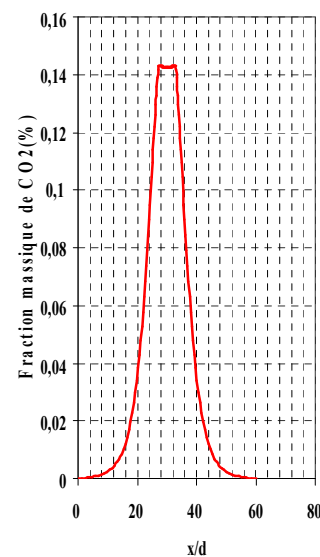


Figure IV.18 : Profil axial de CO₂ de la flamme C₄H₁₀/Air

IV.4 Comparaison des résultats expérimentaux et de la simulation numérique

IV.4 .1 Résultats expérimentaux

On a utilisé la méthode proposée par **Eùlalia Planas** pour déterminer à partir de l'émissivité la température de la flamme, le profil de la température dans plusieurs zones (points, lignes, surfaces). A partir de l'analyse des résultats expérimentaux , on peut dire que l'émissivité et la température sont des grandeurs locales, qui changent chaque fois que l'on change la zone d'étude.

IV.4 .2 Résultats de la simulation numérique

On a tracé les profils radiaux et axiaux de la température dans toute la flamme a cause de manque d'information des cordonnés qui peuvent être coïncide avec les cordones expérimentaux.

La simulation numérique sous **FLUENT** nous a permis de déterminer directement la température sans passer par l'émissivité.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques n'a pas été fait a cause du manque d'informations sur les dimensions caractéristiques du domaine physique

En effet, le retard pris dans l'acquisition du débitmètre électronique qui n'a pas été lévré à temps ,nous a pas permis de réaliser une cartographie exacte de la flamme expérimentale. Ceci sera fait dans les travaux futures que seront réalisés.

Conclusion générale
Et
Perspectives

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire, constitue une contribution aux recherches consacrées à la flamme laminaire non prémélangée, utilisant le butane comme combustible, et l'air ambiant comme oxydant. L'étude était divisée en deux parties :

La première partie de ce travail a pour but d'expérimenter une technique, pour déterminer à partir de l'émissivité, la température d'une flamme laminaire de diffusion. Ceci se fait en utilisant la thermographie infrarouge (IR-caméra), et en appliquant la méthode proposée par **Eulàlia Planas** [1].

La complexité des phénomènes mis en jeu et les difficultés techniques des études expérimentales sur des configurations réelles, dans le domaine de la combustion, met en évidence l'intérêt d'une approche numérique. C'est dans cette optique que s'inscrit la seconde partie de ce travail. Dans le but à comparer les résultats expérimentaux obtenus, avec la simulation numérique sous **FLUENT** de la phénoménologie impliquée.

Sur le plan théorique, notre travail a consisté d'abord à mieux appréhender la formulation générale des équations permettant la description de ce type d'écoulement réactif monophasique.

Les équations dynamiques ont été établies dans le cas stationnaire bidimensionnel. Le modèle retenu par notre étude est le modèle laminaire.

La cinétique chimique est supposée infiniment rapide devant tous les autres phénomènes. Toutes les grandeurs thermochimiques importantes, comme la température ou la fraction massique de combustible, peuvent être déduites de la fraction de mélange.

L'approche numérique nous conduit à adopter, pour la résolution, une stratégie de solution itérative basée sur l'algorithme **SIMPLE** de Patankar et Spalding.

Le degré de raffinement du maillage peut influe sur les résultats de calcul. Aussi, il est important de vérifier que le maillage utilisé est suffisamment fin pour que les résultats numériques soient aussi proches que possible de la solution exacte. Plusieurs grilles ont été réalisées pour choisir le bon maillage du point de vue convergence de la solution et temps de calcul.

Conclusion générale

A partir de l'analyse des résultats expérimentaux on peut dire que l'émissivité est une grandeur locale elle dépend de plusieurs paramètres tel que : le diamètre, la nature de l'écoulement, la nature de combustible, etc.

La méthode proposée par **Eulalia Planas** montre sa fiabilité pour le suivi et l'analyse de l'image de la caméra thermique dont on détermine à partir de l'émissivité, la température de la flamme.

Comme on l'a expliqué précédemment l'émissivité est une grandeur locale, un programme écrit en langage de programmation **Fortran** nous sert de faire la résolution de la fonction de l'émissivité.

L'avantage de la simulation numérique est que elle donne l'accès d'étude de plusieurs variables tel que (la température, la vitesse, la pression, la densité la pollution,...). Dans ce travail la température (ou un profil de la température) est déterminé directement sans passer par l'émissivité.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques n'a pas été faite à cause du manque d'informations sur les dimensions caractéristiques du domaine physique.

Le retard pris dans l'acquisition du débitmètre électronique qui n'a pas été livré à temps, nous a pas permis de réaliser une cartographie exacte de la flamme expérimentale. Ceci sera fait dans les travaux futures que seront réalisés.

Perspectives

Le banc d'essais nous a permis de faire plusieurs études, donc il est judicieux de continuer l'étude on étudie l'émissivité de la flamme turbulente en 3D. Ainsi étudier l'influence de quelques paramètres tel que (diamètre, différents types de combustible,...) sur l'émissivité ce qui nous permet de dire la température.

Lors de la réalisation de bons d'essais plusieurs pièces ont été réalisées dans le but de l'utiliser en future étude comme exemple :

- L'impact d'une flamme sur une plaque.
- L'impact de plusieurs jets entre eux.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : **E.Planas-Cuchi, J.Ma-Chatris, C. Lopez, J. Arnaldos**, «Determination of Flame Emissivity in Hydrocarbon Pool Fires Using Infrared Thermography »,fire thecnology , 39, 261-273, 2003.
- [2] : **J.Ming-Char, J-Hsein-Yeh** «The mesurment of open propane flame température using infrared thechnique »Aeronautical Engineering Department, February 1996.
- [3] : **F. RINIERI** « Mesure de la température dans une flamme au moyen d'une caméra infrarouge », Université de CORSE, France. Novembre 2005.
- [4] : **Victor V. Ghiea (Ghia)** « Method using infrared thermography for combustion testing of fuel oil » Polytechnic University of Bucharest, Thermo-Mechanical Engineering Dep, 313 Spl. Independentei, Sector 6, Romania,p.219 – 228,2002.
- [5] : **C. Qiaq-Ghassan Tashtoush, A. Ito, K. Saito** « Structure of large scale pool fires» International Conference on Fire Research and Engineering, September 10-15,1995.
- [6] : **J.Luc-Dupuy, Ph.Vachet, J.Marechal, J.Melendez, Antonio J. de Castro** « Emission-transmission measurements in flames using an infrared camera, Forest Ecology and Management, Madrid, Spain , 2006.
- [7] : **D. Manaca , M. Rovaglio** « Infrared Thermographic Image Processing for the Operation and Control of Heterogeneous Combustion Chambers», Dipartimento di Chimica, Materialie Ingegneria Chimica “G. Natta”, Politecnico di Milano, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, March, 2002.
- [8] : **Akira Yamaguchi, Yuji Tajim** « A numerical study of radiation heat transfer in sodium pool combustion and response surface modling of lamininous flame emissivity »nuclear engineering and design, 236,1179-1191,2006.
- [9] :**H. Chun, K.D-Wehrstedt, I. Vela, A. Schonbucher**, «Thermal radiation of di-tert-butyl peroxide pool fires -experimental investigation and CFD simulation», Journal of Hazardous Materials, 2008.
- [10] :**V. Novozhilov , H. Koseki** « Computational fluid dynamics prediction of self-sustained pool fire combustion »,Journal of The Institution of Engineers, Singapore Vol.1 ,2004.
- [11] : **Philippe Vachet** «Emission et transmission d'une flamme axi-symétrique », Institut National de la Recherche Agronomique, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes,2003.
- [12] :**Valérie DESPREZ** « Thermographie aeriene infrarouge de l'agglomération », Presse ,Dunkerque, le 16 mars 2004.

Bibliographie

- [13] :**Luc Vervisch, Denis Veynante**, « Combustion turbulente » Institut national des sciences appliquées de Rouen, Laboratoire E.2M.C, Cedex, France.
- [14] :**Manuel d'utilisation** « ThermoVision™ A40 M » Publ.No.1558 090 Rev. a72-France -October 29, 2004.
- [15]: **O.LOUISNARD,J.-LETOURNEAU,P. GABORIT**« Initiation au Fortran » , Ecole des mines d'albi,1997- 2000.
- [16] :**FLUENT Inc.** FLUENT6.3 User Guide.
- [17] :**Garyl Borman, Kenneth W.Ragland** « Combustion engineering », département of mechanical engineering, université of Wisconsin-Madison,page122,1984.
- [18] :**David DEMARE** «Stabilisation d'une flamme suspendue non-prémélangée Influence d'un champ acoustique»,These pour l'obtention du doctorat, Université de Rouen, 2003.
- [19]:**Corine LACOUR** «Stabilité de flammes laminaires partiellement prémélangés-application aux brûleurs domestiques» ,These pour l'obtention de Doctorat, Université de Rouen, 2006.
- [20] :**Jean-Luc BEDUNEAU** «Caractérisation expérimentale des flammes non-prémélangés H₂/O₂ : Application aux cas des injecteurs coaxiaux de moteurs fusées» ,These pour l'obtention de Doctorat, Université de Rouen, 2001.
- [21] : **Guillaume LEGROS**« Etude du comportement radiatif d'une flamme de diffusion établie en micropésanteur » ,These pour l'obtention de Doctorat, université de poitiers,2002
- [22]:**BOURAS FETHI** «Simulation de la combustion turbulente non-prémélangé par le modèle « L.E.S » » ,These pour l'obtention de magistere , Université de Batna ,2006
- [23]:**Hung-Yi Li** «Thermal performance measurement of heat sinks with confined impinging jet by infrared thermography » , , Huafan University, Shihtin, Taipei 22305, September 2005.
- [24] :**Marie-Yvonne Perrin**, «Approximate radiative properties of methane at high temperature » Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer ,103, 3-13,2007.
- [25] : Salvador Rego-Barcena « Particle effects on the emissivity and temperature of optically thick, mixed media retrieved by mid-IR emission spectroscopy » Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer ,109, 1325-1334,2008.
- [26] :**F. Tabet-Helal** « Etude par simulation numérique des caractéristiques d'une flamme de diffusion turbulente avec co-courant d'air d'un mélange de CH₄-H₂ » Institut pour la Combustion, l'Aérothermique, Cedex 2, France ,2007.

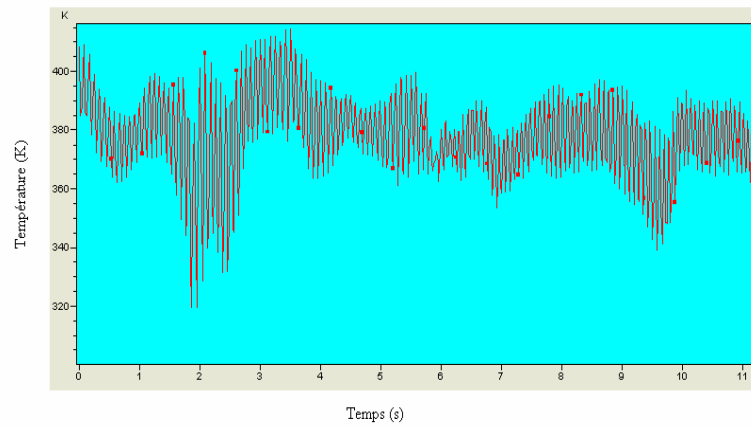


Figure 1 : Variation de la température en fonction de temps.

Le temps en second(s)	le volume en (ml)	Le débit volumique moyen En m^3/s	La surface $=3,14 \times d^2/4$	La vitesse en m/s	Nombre De Reynolds
1,78	10	$5,7471 \times 10^{-6}$	$1,962510^{-5}$	0,3	527
1,76	10		$1,962510^{-5}$		
1,72	10		$1,962510^{-5}$		
1,78	10		$1,962510^{-5}$		
1,70	10		$1,962510^{-5}$		
1,72	10		$1,962510^{-5}$		
Temps moyenne = 1,74	10		$1,962510^{-5}$		

Tableau 1 : Conditions expérimentaux

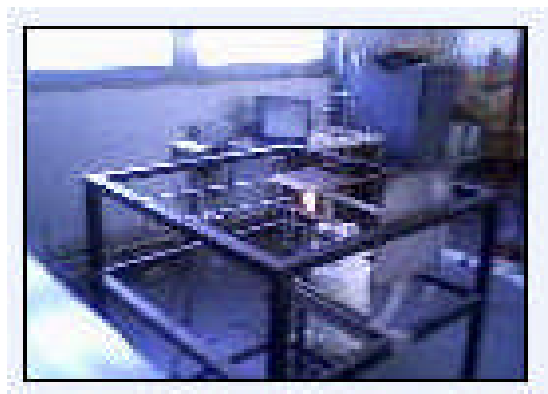


Figure 2 : Le banc d'essais

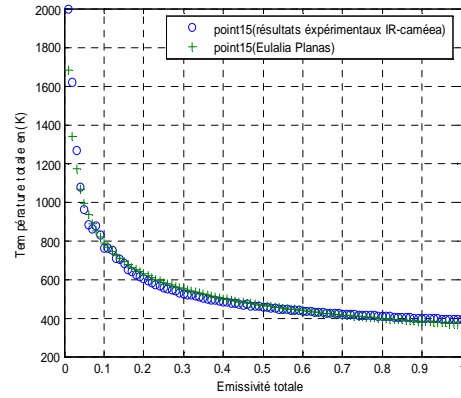
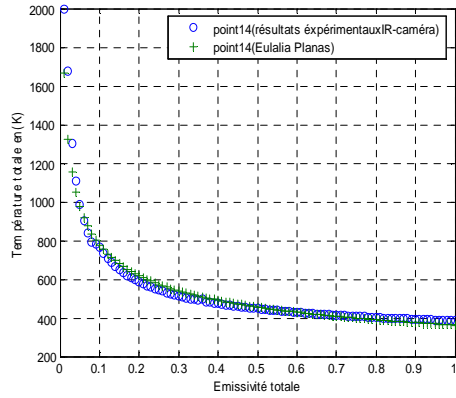
Cas des points

Figure 3 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les points 14 et 15.

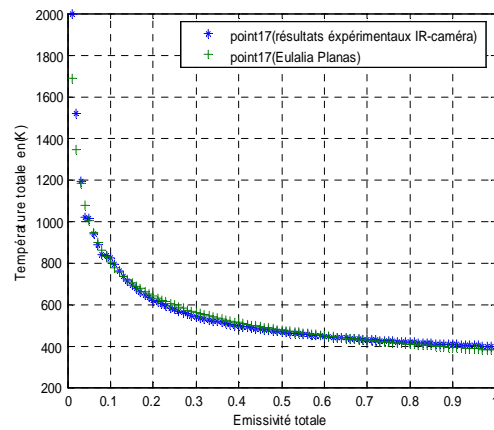
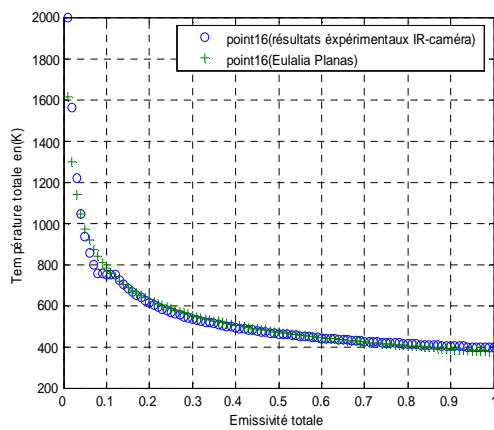


Figure 4 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ les points 16 et 17.

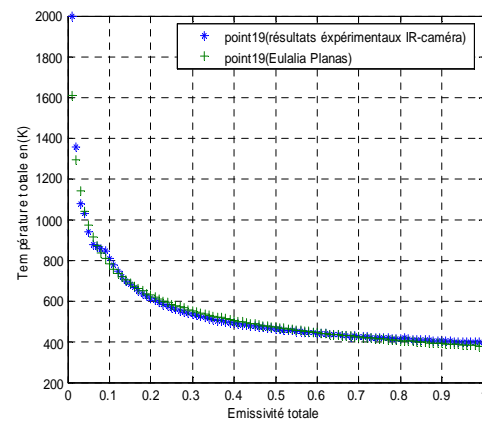
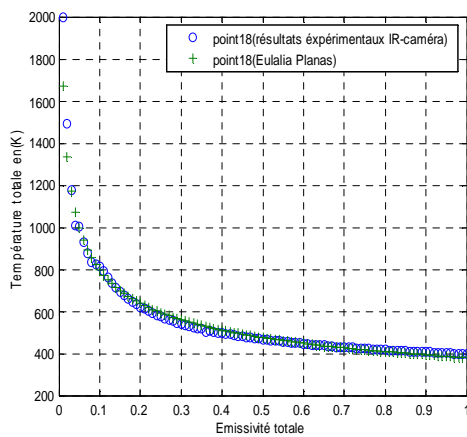


Figure 5 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les points 18 et 19.

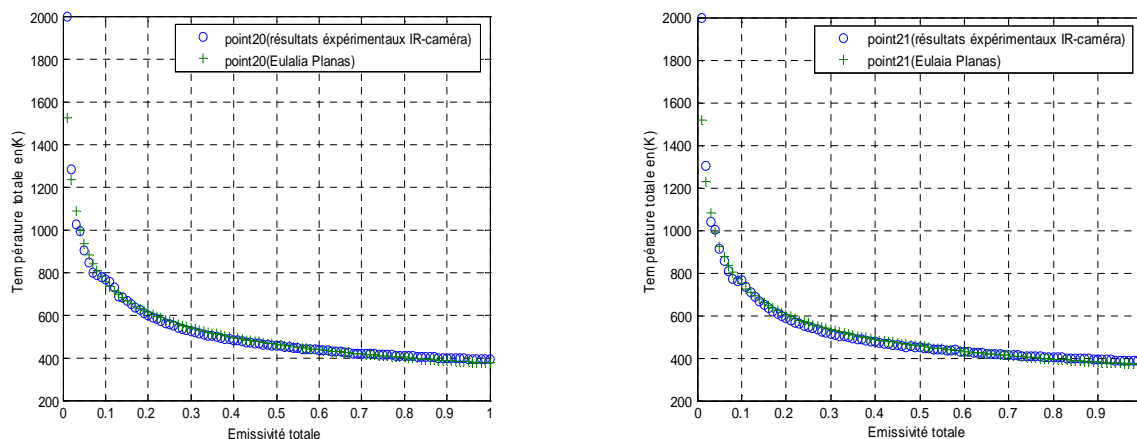


Figure 6 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les points 20 et 21.

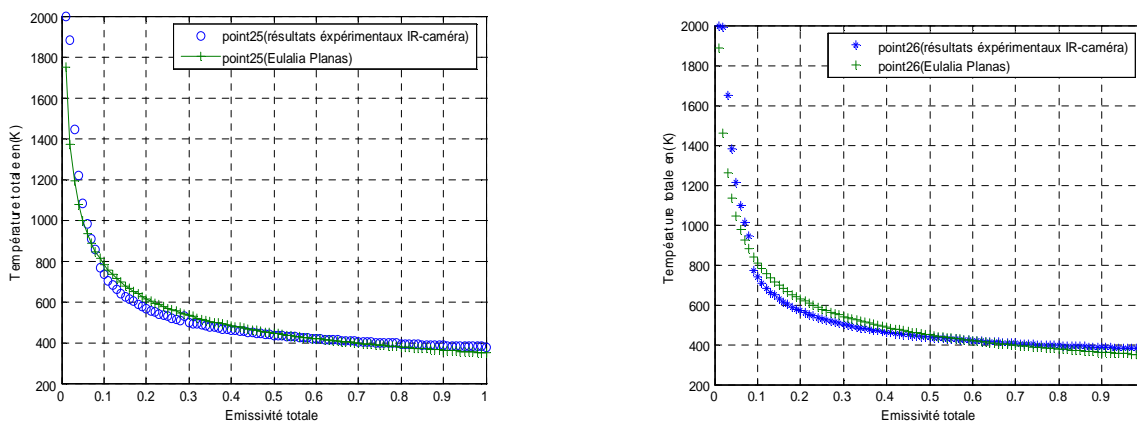


Figure 7 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les points 25 et 26.

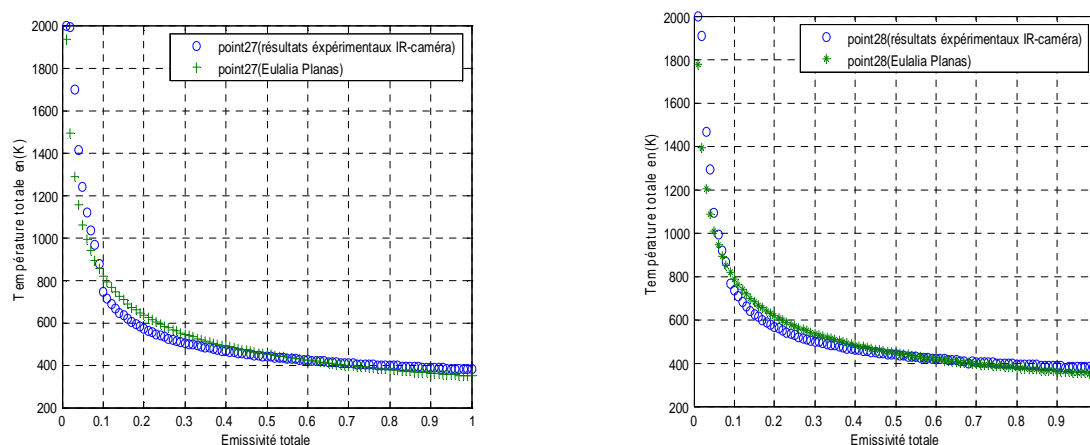


Figure 8 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les points 27 et 28

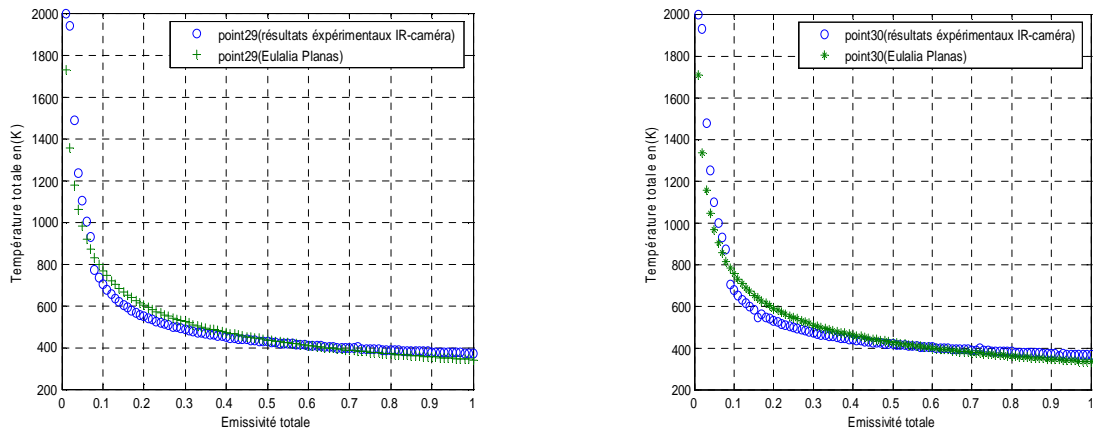


Figure 9 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 29 et 30.

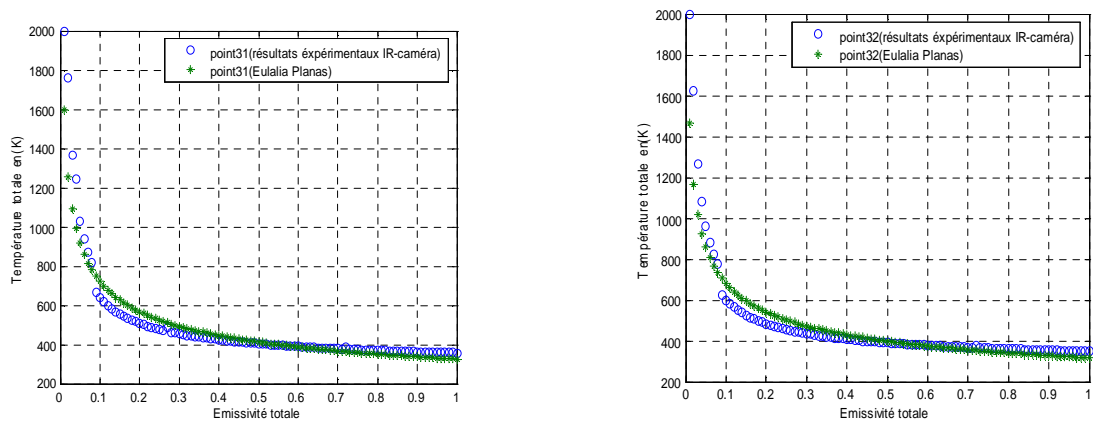


Figure 10 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 31 et 32.

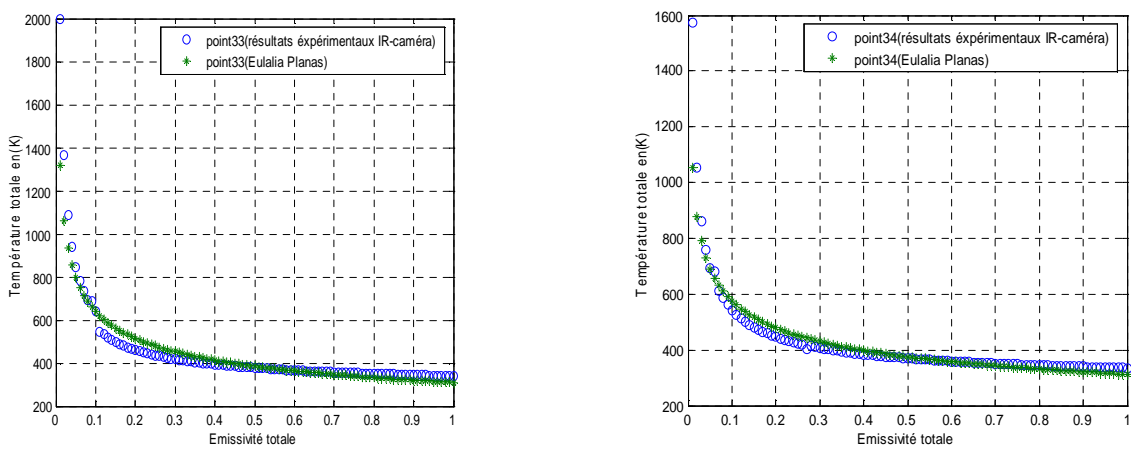


Figure 11 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 33 et 34.

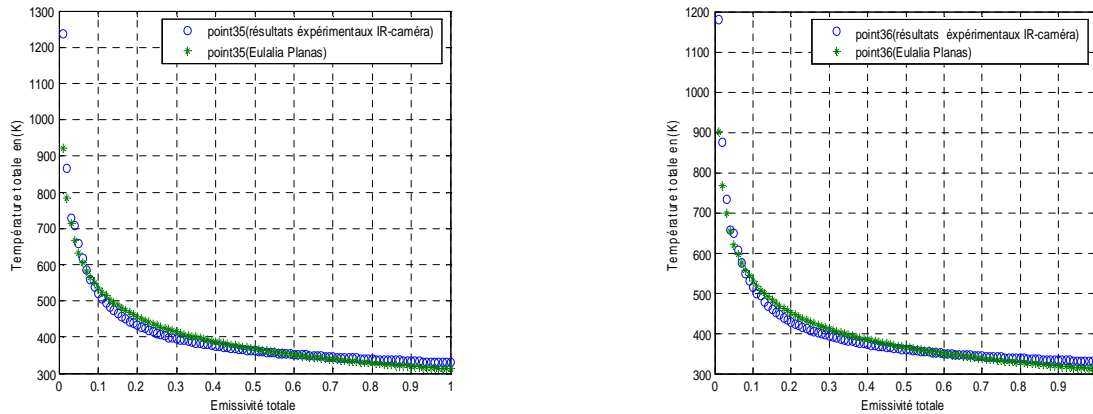


Figure 12 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 35 et 36.

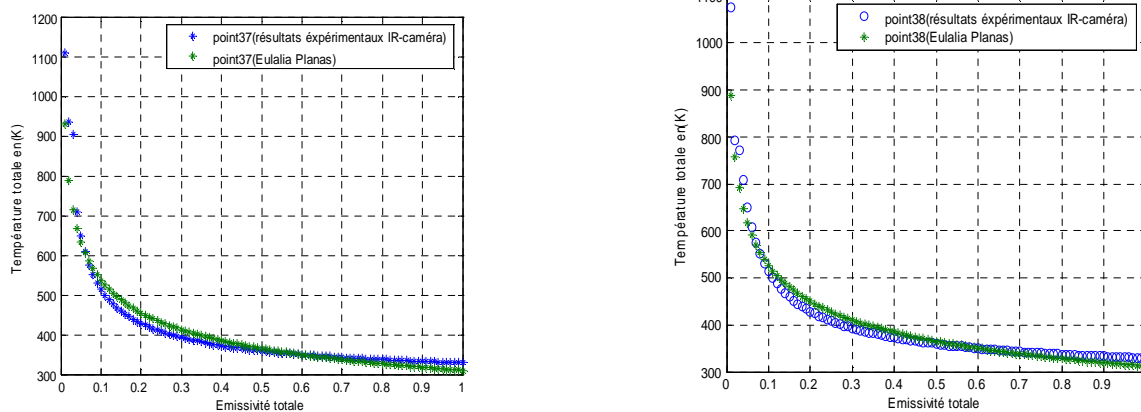


Figure 13 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 37 et 38.

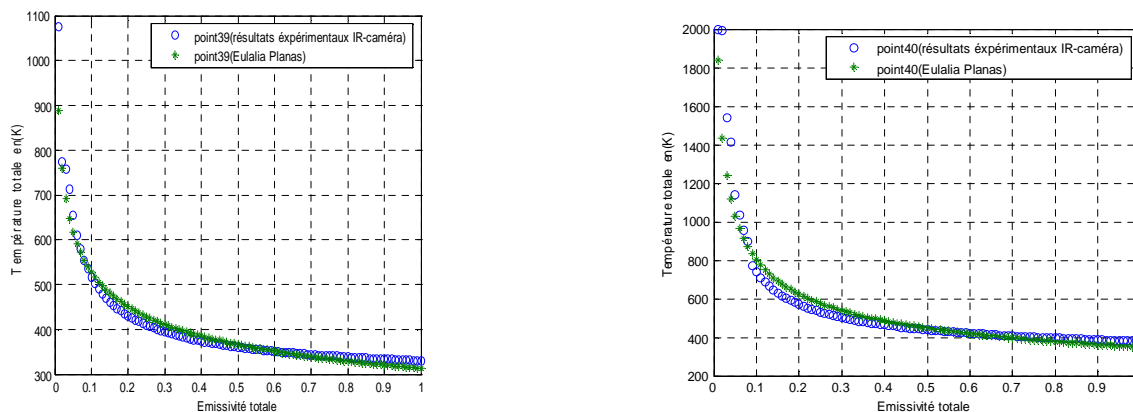


Figure 14 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \epsilon_t^B$ pour les points 39 et 40.

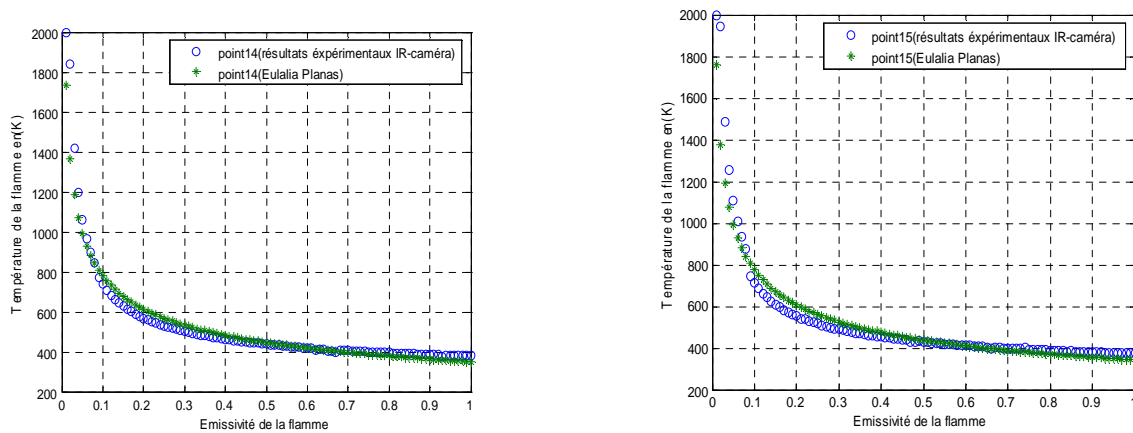


Figure 15 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 14 et 15

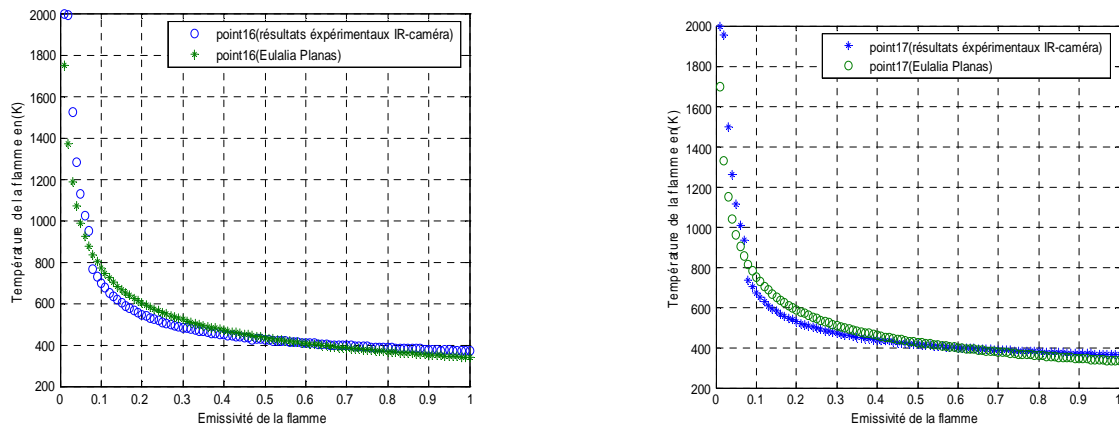


Figure 16 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 16 et 17.

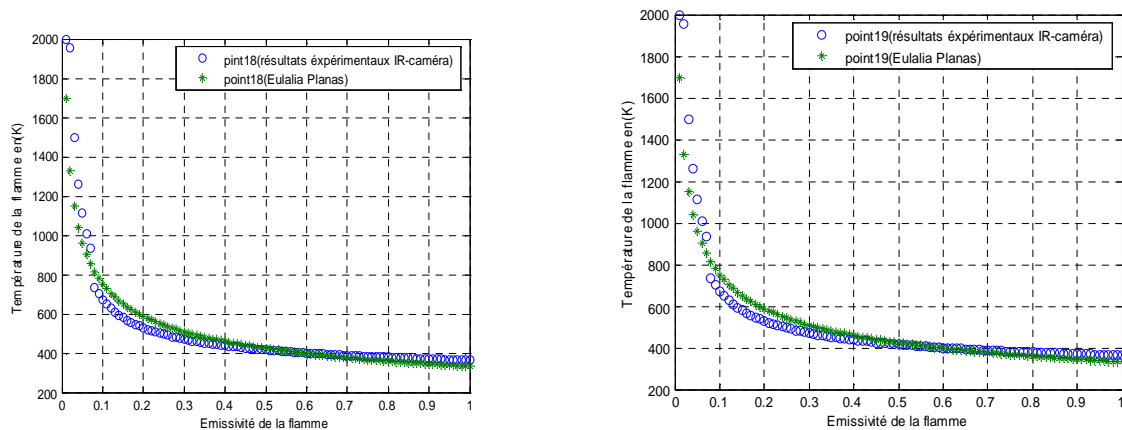


Figure 17 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 18 et 19.

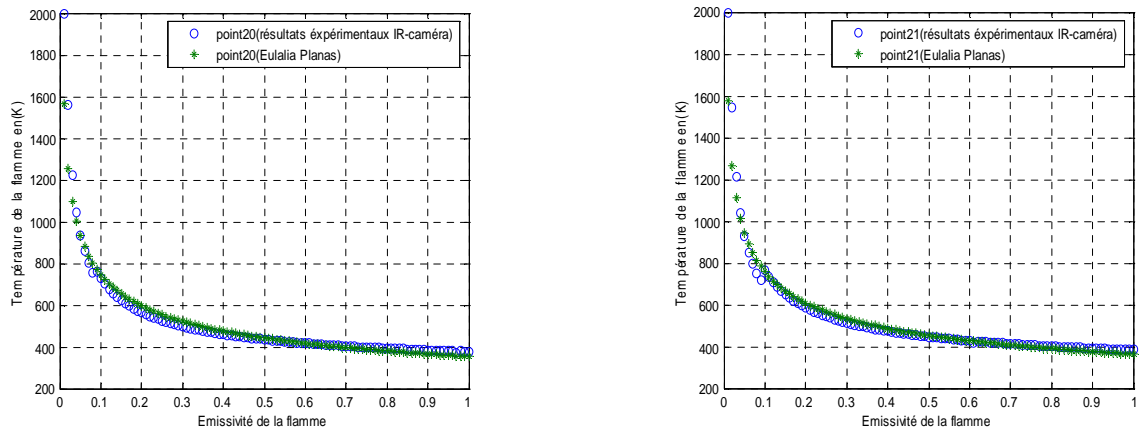


Figure 18 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 20 et 21.

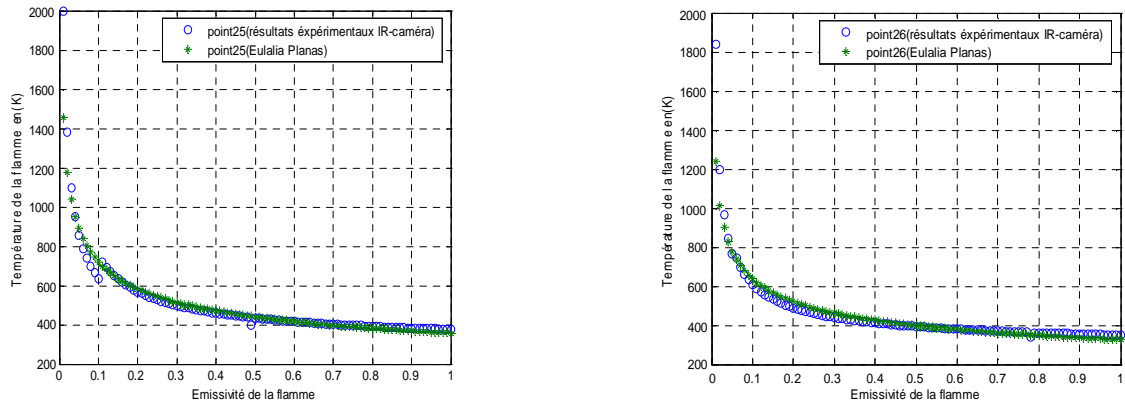


Figure 19 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 25 et 26.

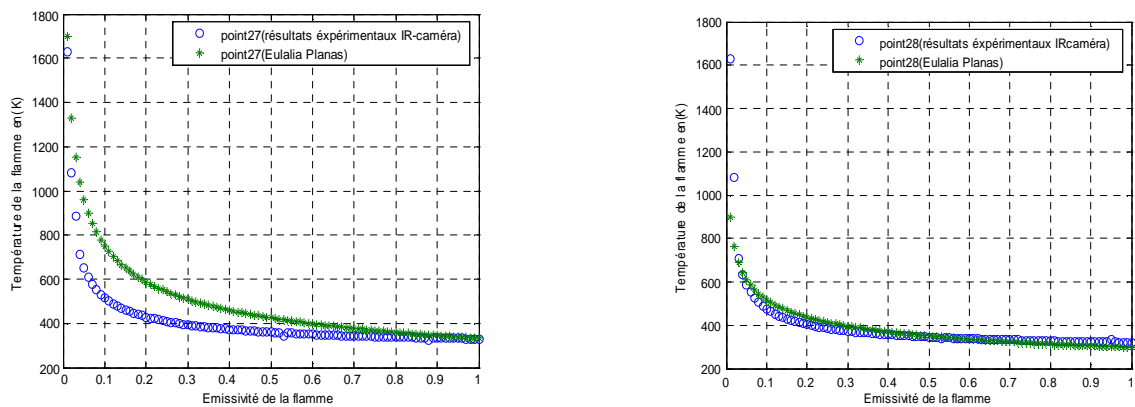


Figure 20 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 27 et 28.

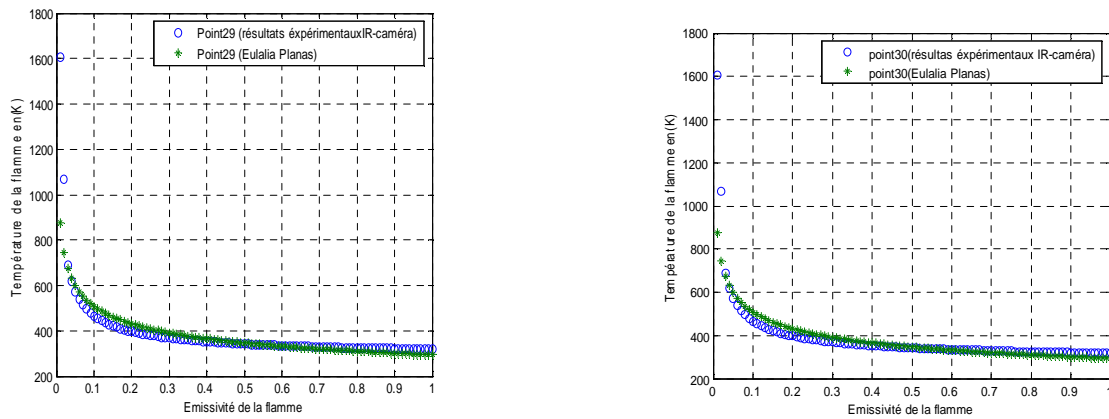


Figure 21 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 29 et 30.

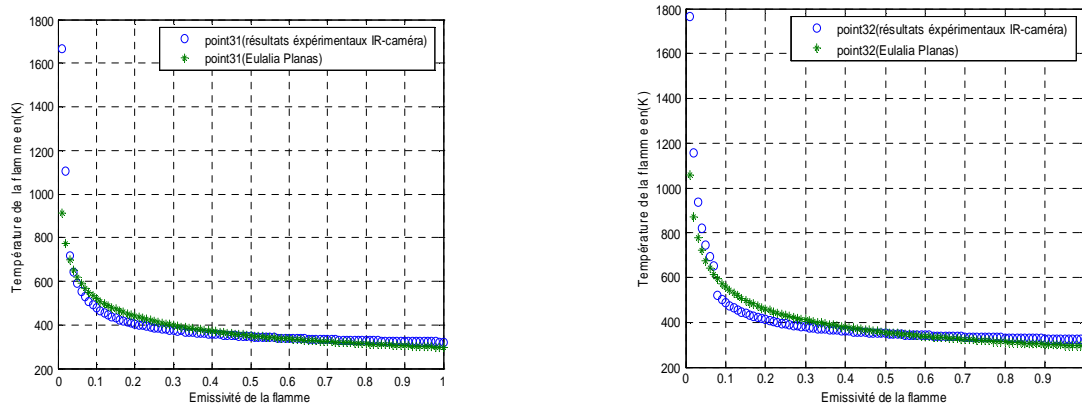


Figure 22 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 31 et 32.

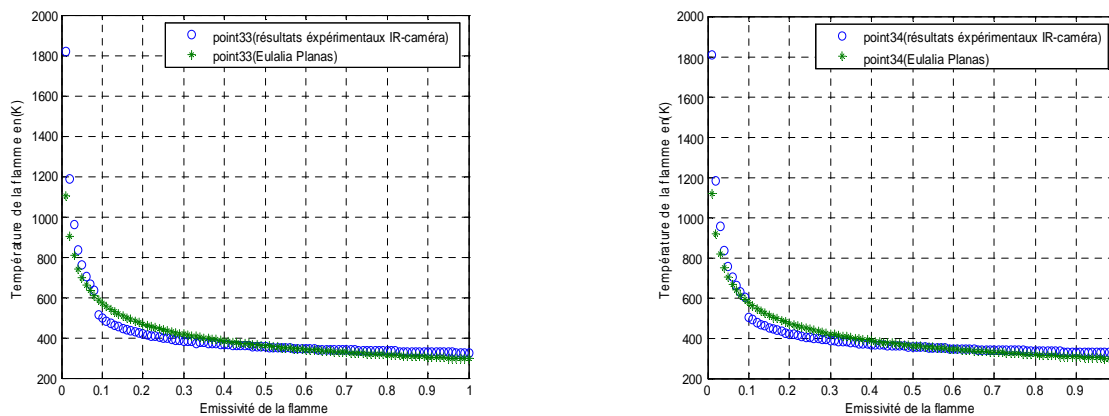


Figure 23 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 33 et 34.

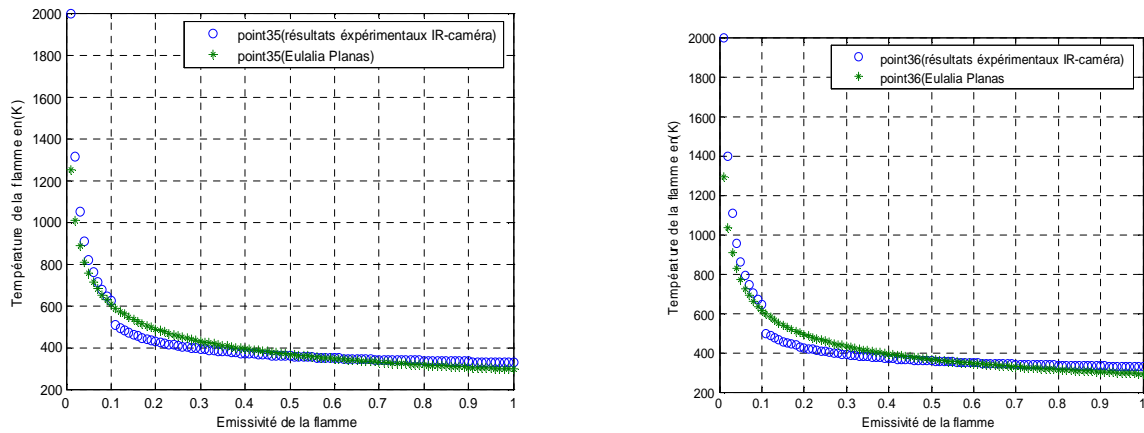


Figure 24 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 35 et 36.

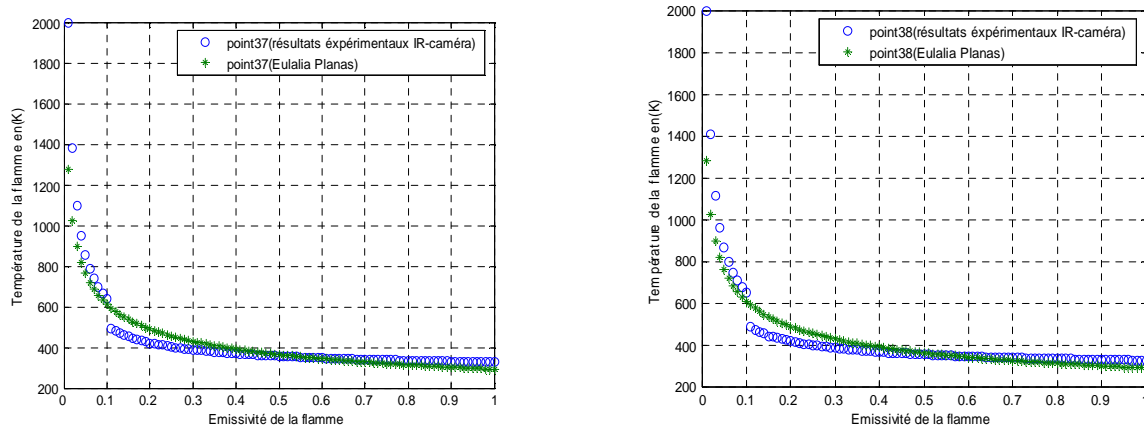


Figure 25 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 37 et 38.

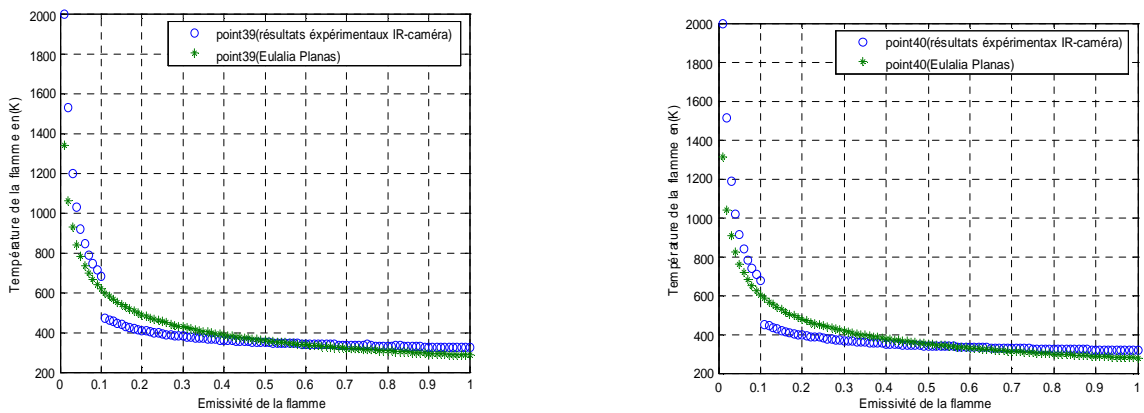


Figure 26 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \epsilon_f^{B_f}$ pour les points 39 et 40.

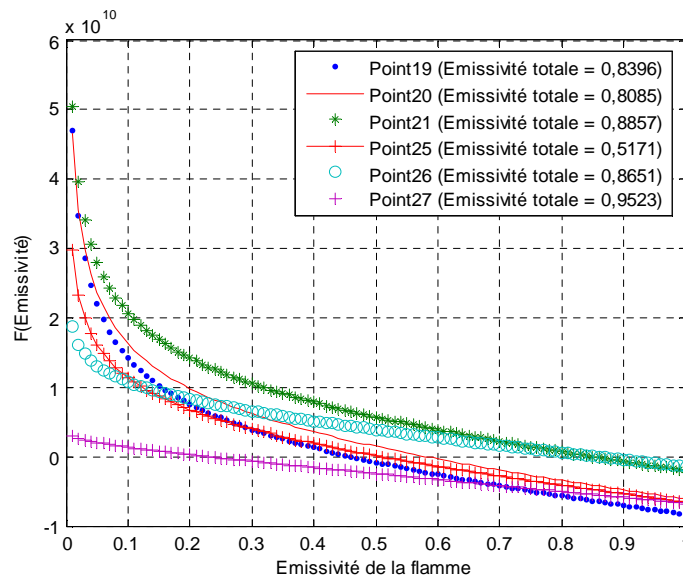


Figure 27 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les points 19, 20, 21, 25, 26, 27.

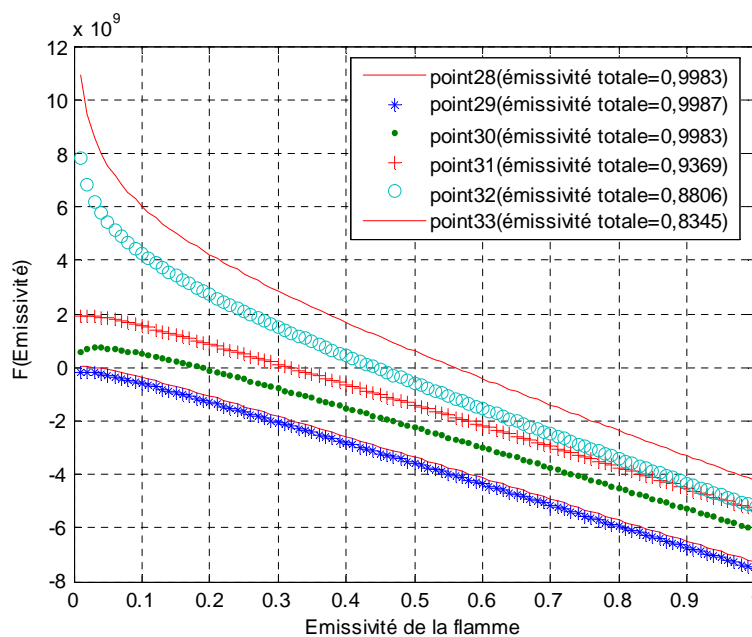


Figure 28 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\varepsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les points 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35.

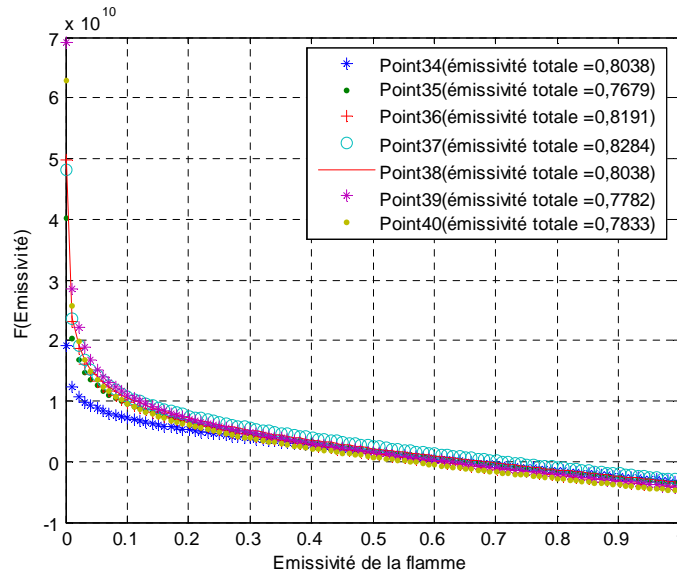


Figure 29 : Evolution de la fonction de l'émissivité $f(\epsilon)$ en fonction de l'émissivité totale changée pour les points 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40.

```

c est le nombre des points
25
323.5273      -0.2874505      325.4295      -0.2852520      0.9067440
0.8929921
351.1000      -0.3468047      362.5347      -0.3310170      0.7736257
0.6749949
343.1040      -0.3549274      369.6017      -0.3289535      0.8038334
0.5549964
339.2523      -0.3565397      377.6494      -0.3153424      0.8253371
0.4689975
332.6674      -0.3539428      379.9790      -0.3235626      0.8519607
0.3959984
332.6674      -0.3539428      380.3256      -0.3211876      0.8519607
0.3949985
344.2431      -0.3300693      377.6035      -0.3146246      0.8366010
0.4579976
354.1233      -0.3231266      373.9817      -0.3048795      0.7997374
0.5749962
364.4104      -0.3182955      367.9023      -0.3079126      0.8488888
0.8199930
357.0132      -0.3047483      349.8596      -0.3494105      0.5294049
0.5259968
327.2510      -0.2892613      346.5876      -0.3687803      0.8570006
0.5269968
305.0215      -0.2600067      348.1950      -0.3723336      0.9517995
0.2300003
296.3004      -0.2413878      349.0938      -0.3610711      0.9978788
1.0000000E-03
294.4511      -0.2372332      349.2531      -0.3530321      0.9978788
1.0000000E-03
294.9629      -0.2395025      341.5543      -0.3521348      0.9978788
0.1830002
296.5399      -0.2444954      332.8556      -0.3548705      0.9369516
0.3159995
293.8526      -0.2781393      325.3925      -0.3456139      0.8760244
0.4459978
295.3197      -0.2861755      316.7633      -0.3328386      0.8350649
0.5609964
297.1839      -0.2879768      310.3554      -0.3117523      0.7997374
0.6469952
295.2755      -0.3131836      312.3835      -0.2669691      0.7674818
0.6509952
293.5648      -0.3215576      312.0207      -0.2354036      0.8089533
0.6969946
292.7939      -0.3198467      310.9988      -0.2300047      0.8156092
0.7059945
289.7032      -0.3230534      309.8532      -0.2384858      0.7900096
0.6719949
284.4016      -0.3368762      312.2578      -0.2268188      0.7679938
0.6139957
278.0400      -0.3367668      313.1277      -0.2261752      0.7792577
0.5559964
Press any key to continue
1 334.2257
2 402.3743
3 422.8480
4 444.3893
5 461.7466
6 462.1601
7 445.4551
8 423.4607
9 388.1723
10 434.2244
11 393.8685
12 446.9771
13 1569.986
14 1516.047
15 443.0085
16 393.0135
17 367.0442
18 348.4447
19 336.8848
20 337.7627
21 329.6968
22 327.2823
23 329.3998
24 335.1923
25 338.8119
Press any key to continue

```

Tableau 2 : Fenêtre d'exécution du programme écrit en langage de programmation Fortran ($A_f, B_f, A_t, B_t, \epsilon_t, \epsilon_{f(fin)}, T_{f(fin)}$) respectivement pour les 25 points .

Cas des lignes

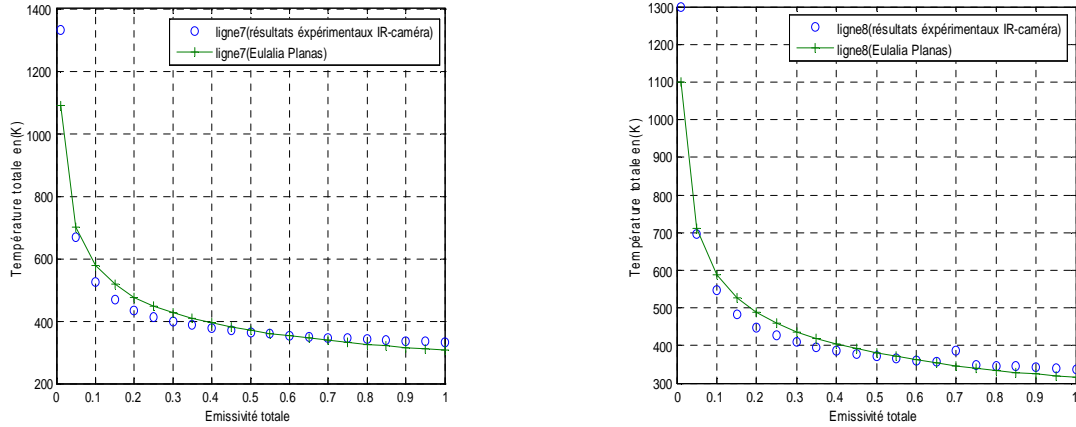


Figure 30 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les lignes 7 et 8.

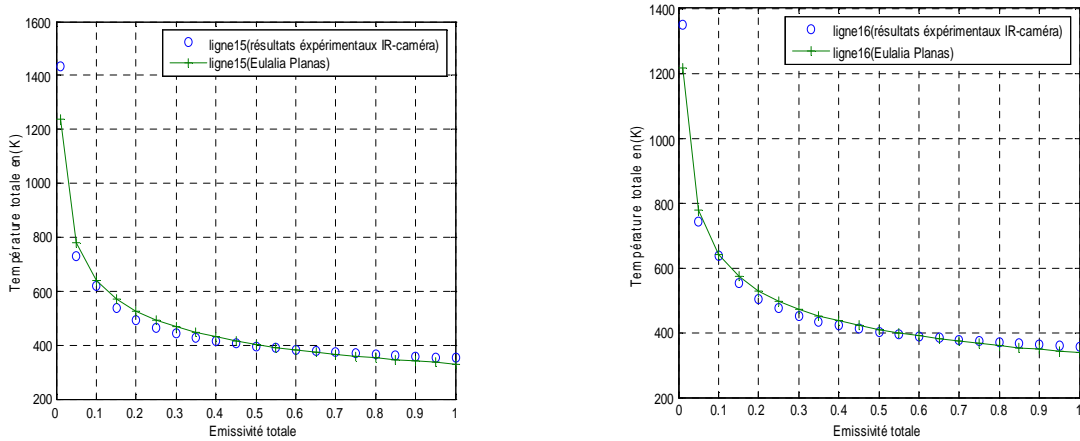


Figure 31 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les lignes 15 et 16.

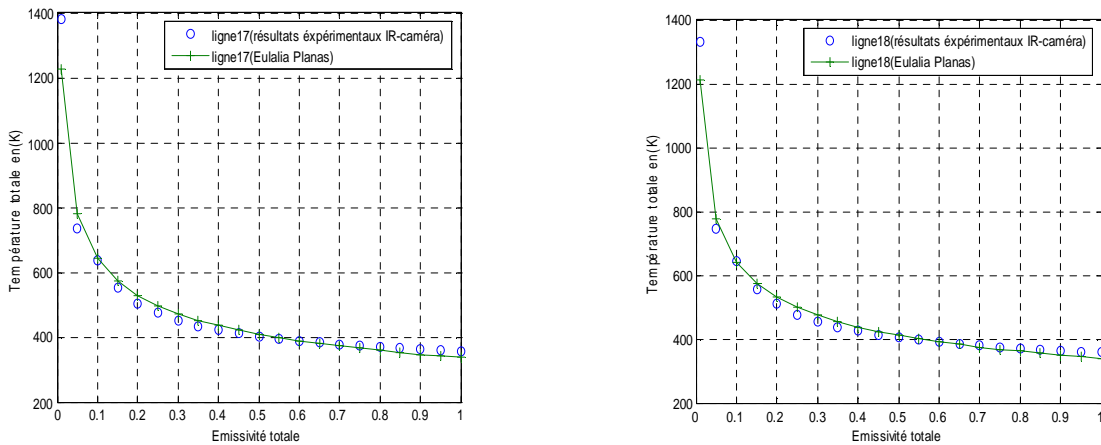


Figure 32 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^B$ pour les lignes 17 et 18.

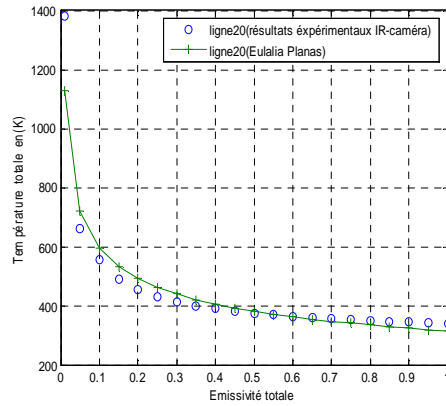
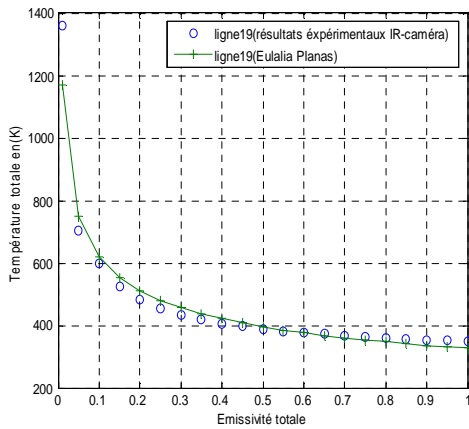


Figure 33 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_t = A_t \varepsilon_t^{B_t}$ pour les lignes 19 et 20.

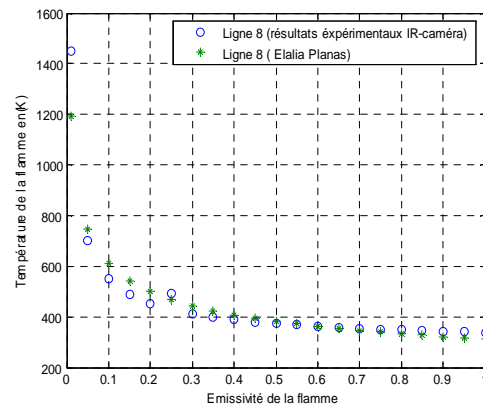
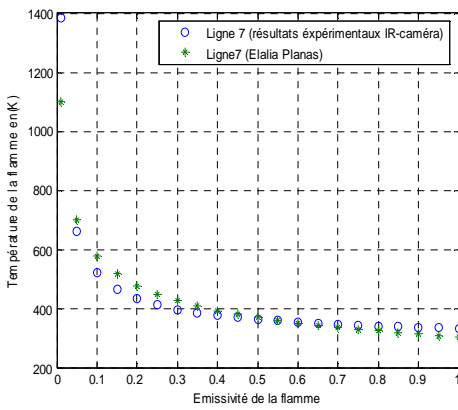


Figure 34 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$ pour les lignes 7 et 8.

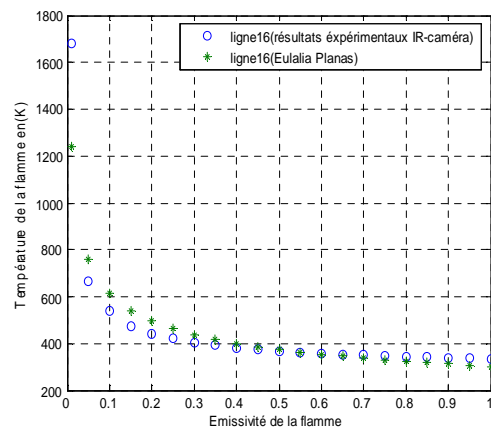
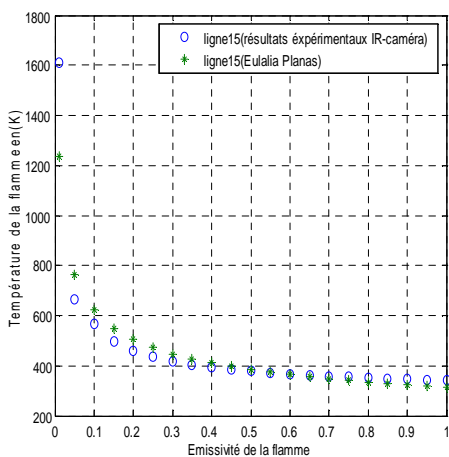


Figure 35 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$ pour les lignes 15 et 16.

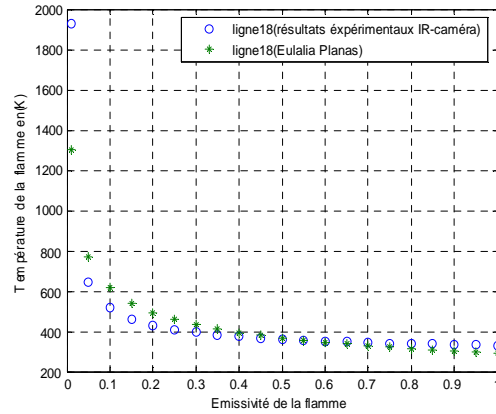
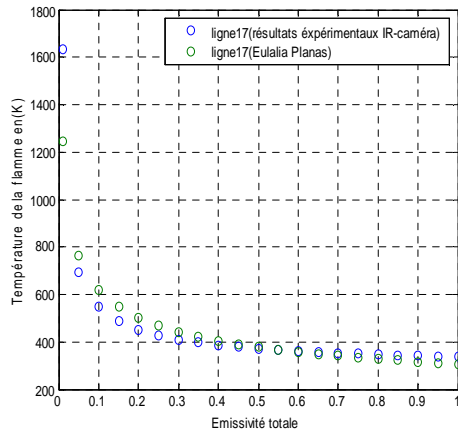


Figure 36 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$ pour les lignes 17 et 18.

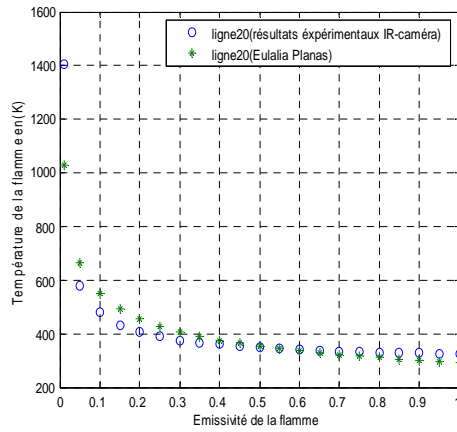
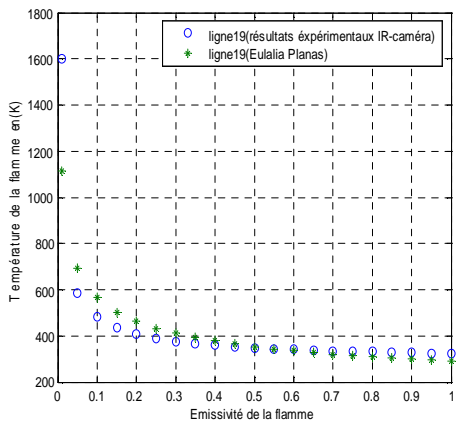


Figure 37: Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T_f = A_f \varepsilon_f^{B_f}$ pour les lignes 19 et 20.

```

c est le nombre des lignes
9
292.6239      -0.2424028      298.9959      -0.2428283      0.7731196
0.7299996
303.9277      -0.2792521      305.8853      -0.2755690      0.9574394
0.9499994
312.7383      -0.2905939      314.7267      -0.2714607      0.9676794
0.9499994
312.3855      -0.2986471      330.4726      -0.2864822      0.7987196
0.6099997
302.5807      -0.3062477      337.9695      -0.2777334      0.8396795
0.4599998
306.6876      -0.3045385      337.0648      -0.2802736      0.8294396
0.4999998
293.2034      -0.3238276      340.2366      -0.2756396      0.8550395
0.3999999
289.2295      -0.2925858      326.6310      -0.2774012      0.8550395
0.4499998
289.8251      -0.2778310      314.4314      -0.2774546      0.8243195
0.5599998
1 315.8209
2 300.3124
3 317.4348
4 362.0775
5 383.8141
6 378.7664
7 394.4873
8 365.3488
9 340.4844
Press any key to continue
    
```

Tableau 3 : Fenêtre d'exécution du programme écrit en langage de programmation Fortran (Af, Bf, At, Bt, ε_t , $\varepsilon_{f(fin)}$, $T_{f(fin)}$) respectivement pour les 9 lignes.

Cas des surfaces

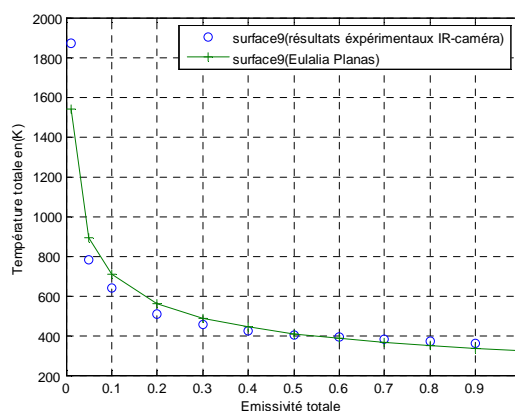
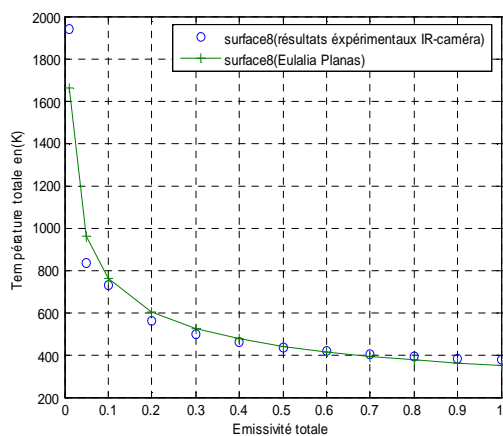


Figure 38 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T = Ae^B$ pour les surfaces 8 et 9.

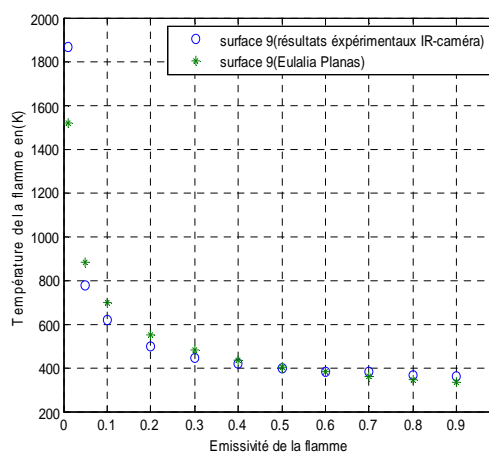
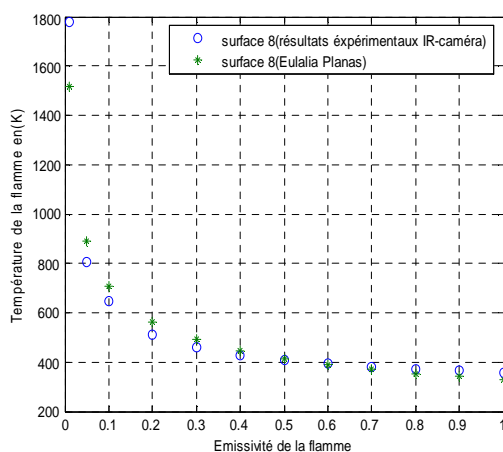


Figure 39 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et la relation $T = Ae^B$ pour les surfaces 8 et 9.

```

350.8602      -0.3206131      359.4888      -0.3288461      0.7843776
0.6779248
0.8089533
328.8733      -0.3319076      348.8215      -0.3387537      0.8089533
0.5859600
0.7644098      -0.3383284      324.7095      -0.3381845      0.7644098
0.7349941
1      397.4158
2      392.7047
3      355.1994
Press any key to continue
    
```

Tableau 4 : Fenêtre d'exécution du programme écrit en langage de programmation Fortran ($A_f, B_f, A_t, B_t, \epsilon_t, \epsilon_{f(fin)}, T_{f(fin)}$) respectivement pour les 3 surfaces.

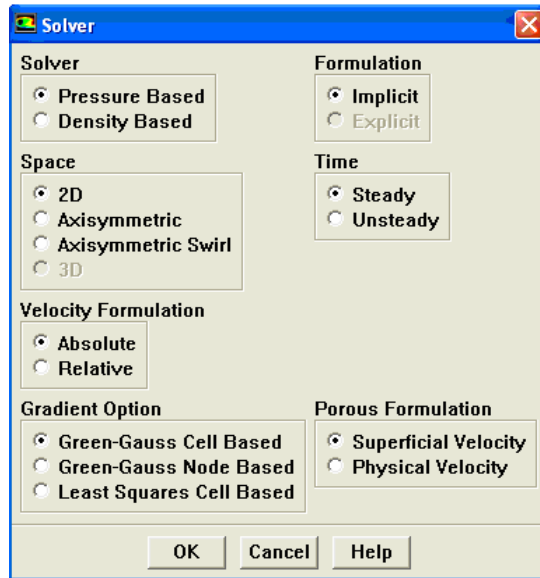


Figure 40 : Solver choisie

- Technique de patch

Le cas traité dans notre étude est une flamme laminaire donc pour avoir de la combustion il faut initialisé la combustion avec un **patch**.

Allez à « **Adapt** » sélectionnée la région ou vous voulez faire le patch, puis allez à « **initialize patch** » et initialisé les paramètre nécessaire : comme exemple la température à **1000°K**, fraction de (C_4H_{10} et O_2 à **0,07-0,1**).

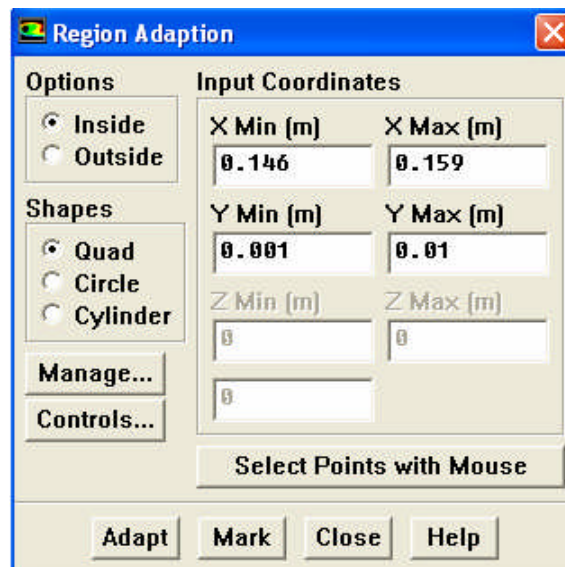


Figure 41 : La région patc

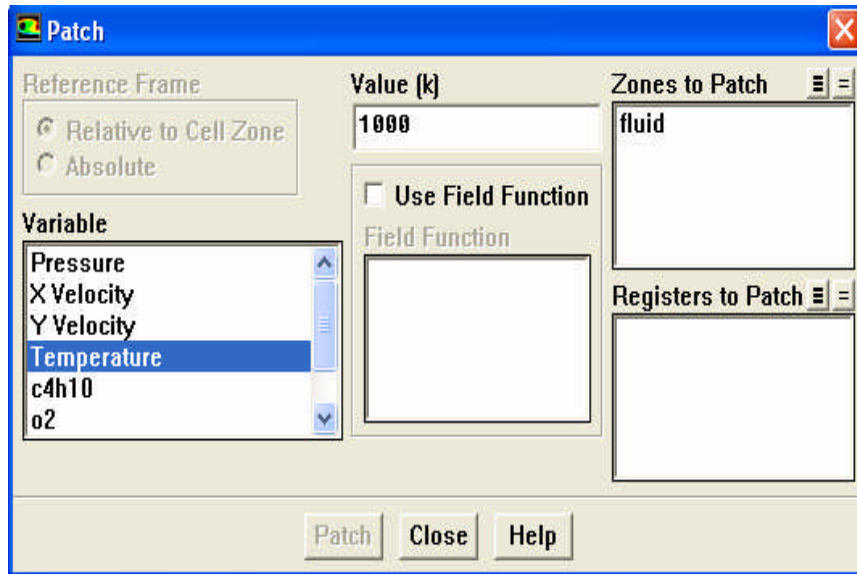


Figure 42 : Paramètres initialisées au patch

Combustible	A (one-step)	A (tow-step)	E (kcal/gmol)	a	b
CH ₄	$1,3 \times 10^9$	$2,8 \times 10^9$	48,4	-0,3	1,3
CH ₄	$8,3 \times 10^6$	$1,5 \times 10^7$	30	-0,3	1,3
C ₂ H ₆	$1,1 \times 10^{12}$	$1,3 \times 10^{12}$	30	0,1	1,65
C ₃ H ₈	$8,6 \times 10^{11}$	$1,0 \times 10^{12}$	30	0,1	1,65
C ₄ H ₁₀	$7,4 \times 10^{11}$	$8,8 \times 10^{11}$	30	0,15	1,6
C ₅ H ₁₂	$6,4 \times 10^{11}$	$7,8 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
C ₆ H ₁₄	$5,7 \times 10^{11}$	$7,0 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
C ₇ H ₁₆	$5,1 \times 10^{11}$	$6,3 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
C ₈ H ₁₈	$4,6 \times 10^{11}$	$5,7 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
C ₈ H ₁₈	$7,2 \times 10^{11}$	$9,6 \times 10^{12}$	40	0,25	1,5
C ₉ H ₂₀	$4,2 \times 10^{11}$	$5,2 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
C ₁₀ H ₂₂	$3,8 \times 10^{11}$	$4,7 \times 10^{11}$	30	0,25	1,5
CH ₃ OH	$3,2 \times 10^{11}$	$3,7 \times 10^{12}$	30	0,25	1,5
C ₂ H ₅ OH	$1,5 \times 10^{12}$	$1,8 \times 10^{12}$	30	0,15	1,6
C ₆ H ₆	$2,0 \times 10^{11}$	$2,4 \times 10^{11}$	30	-0,1	1,85
C ₇ H ₈	$1,6 \times 10^{11}$	$1,9 \times 10^{11}$	30	-0,1	1,85

Tableau 5: Variation de facteur pré-exponentiel et l'énergie d'activation pour quelque combustible [16]

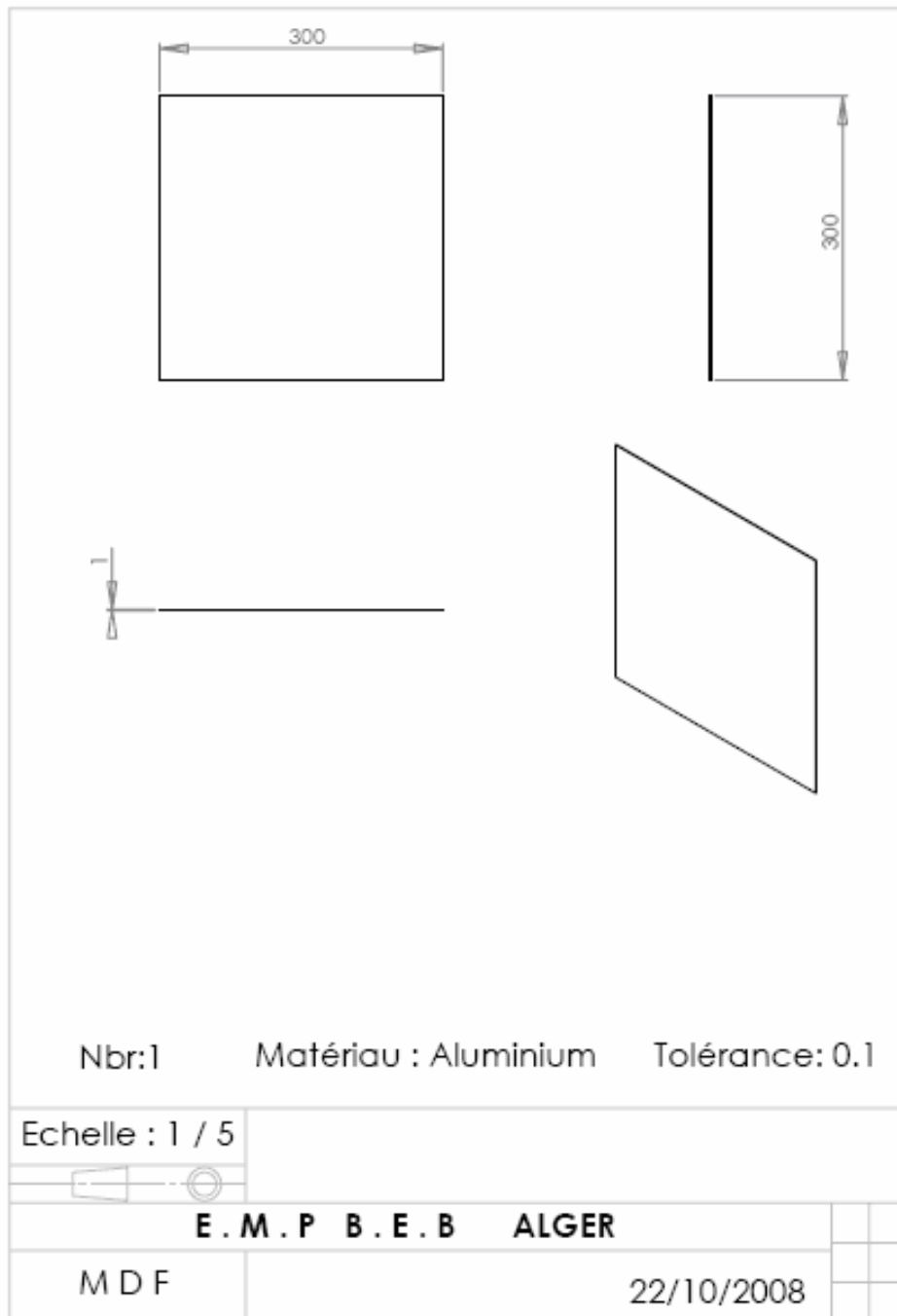


Figure 43 : Mise en plan de corps noir réalisé

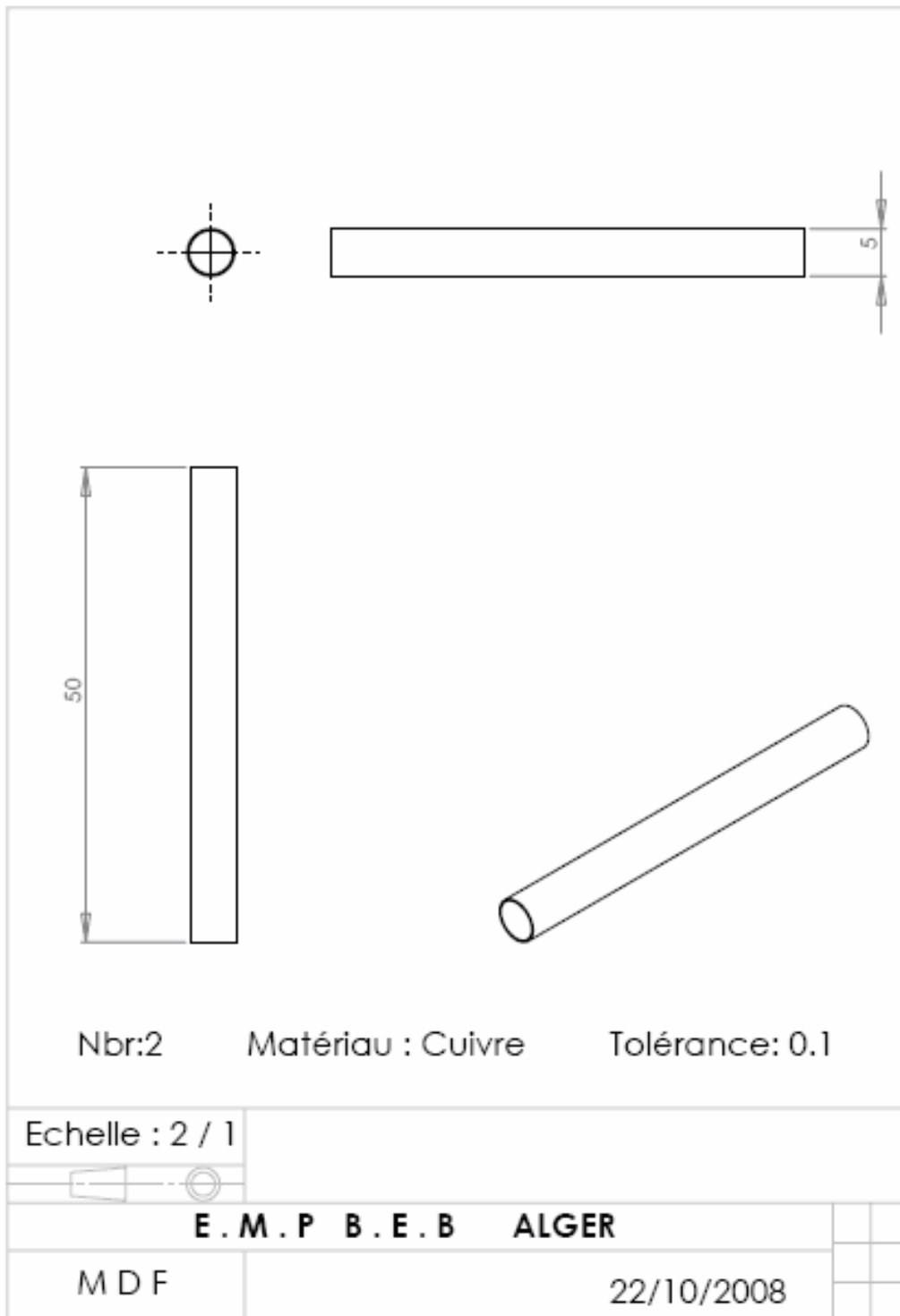


Figure 44 : Mise en plan de l'injecteur réalisé

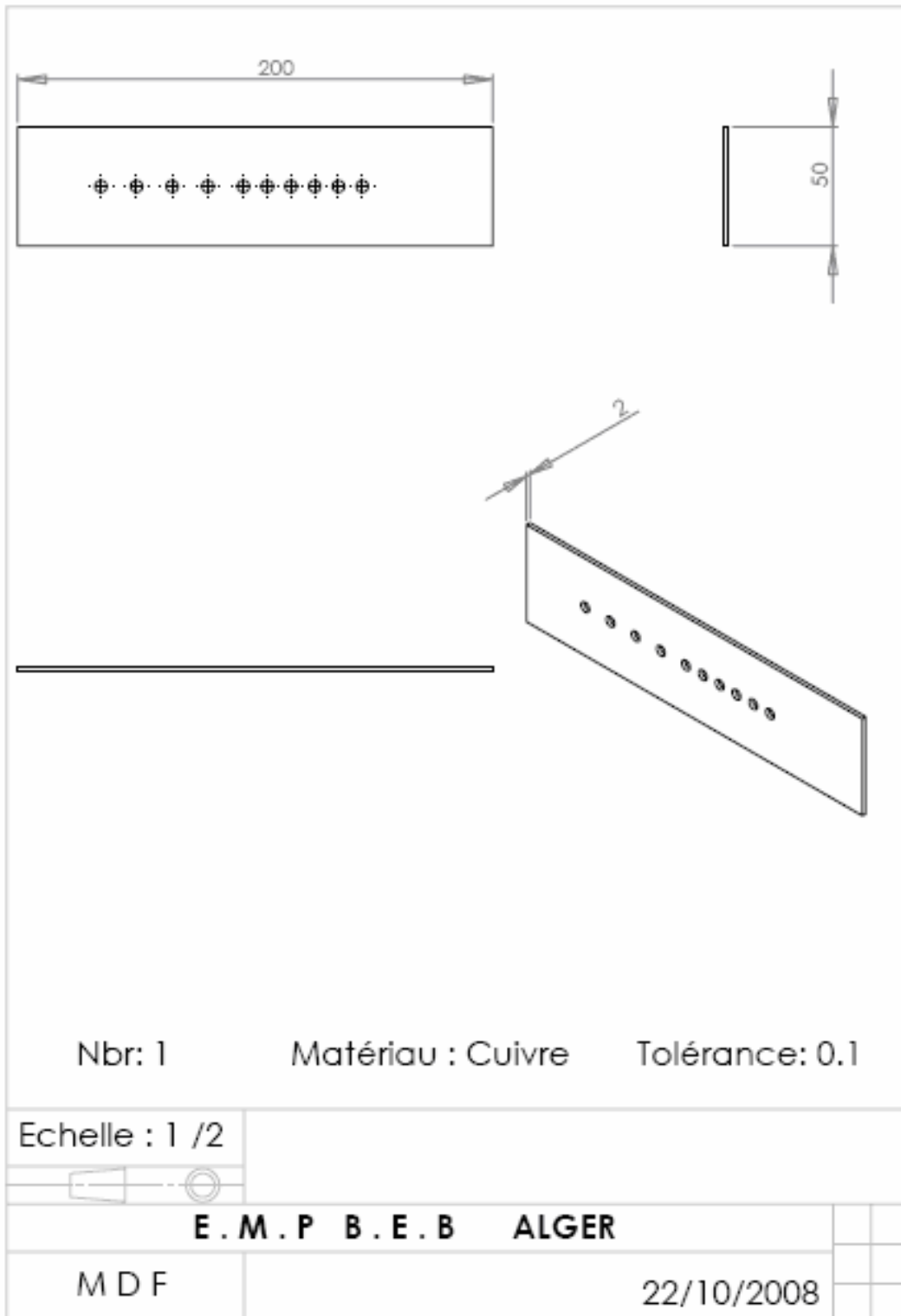
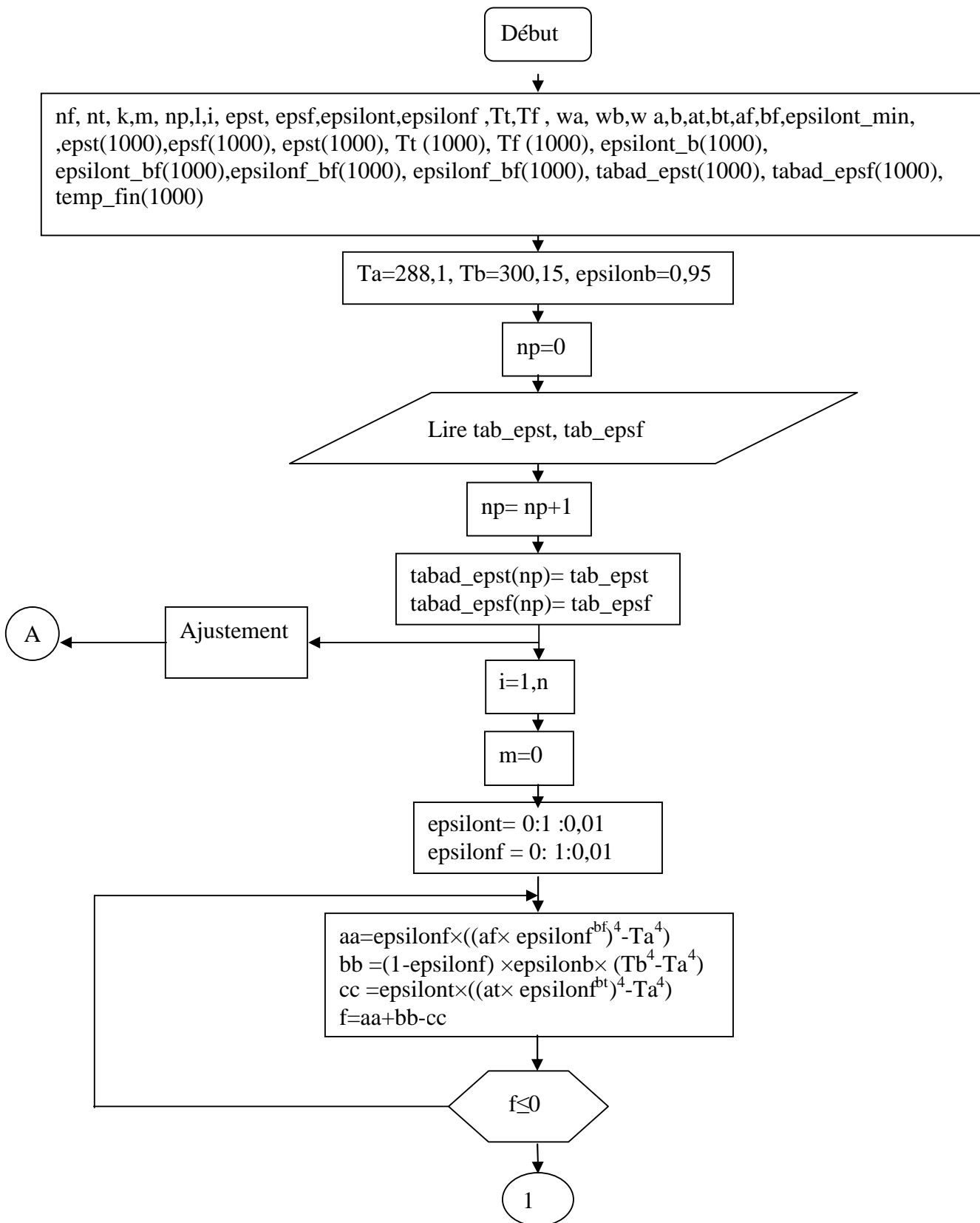
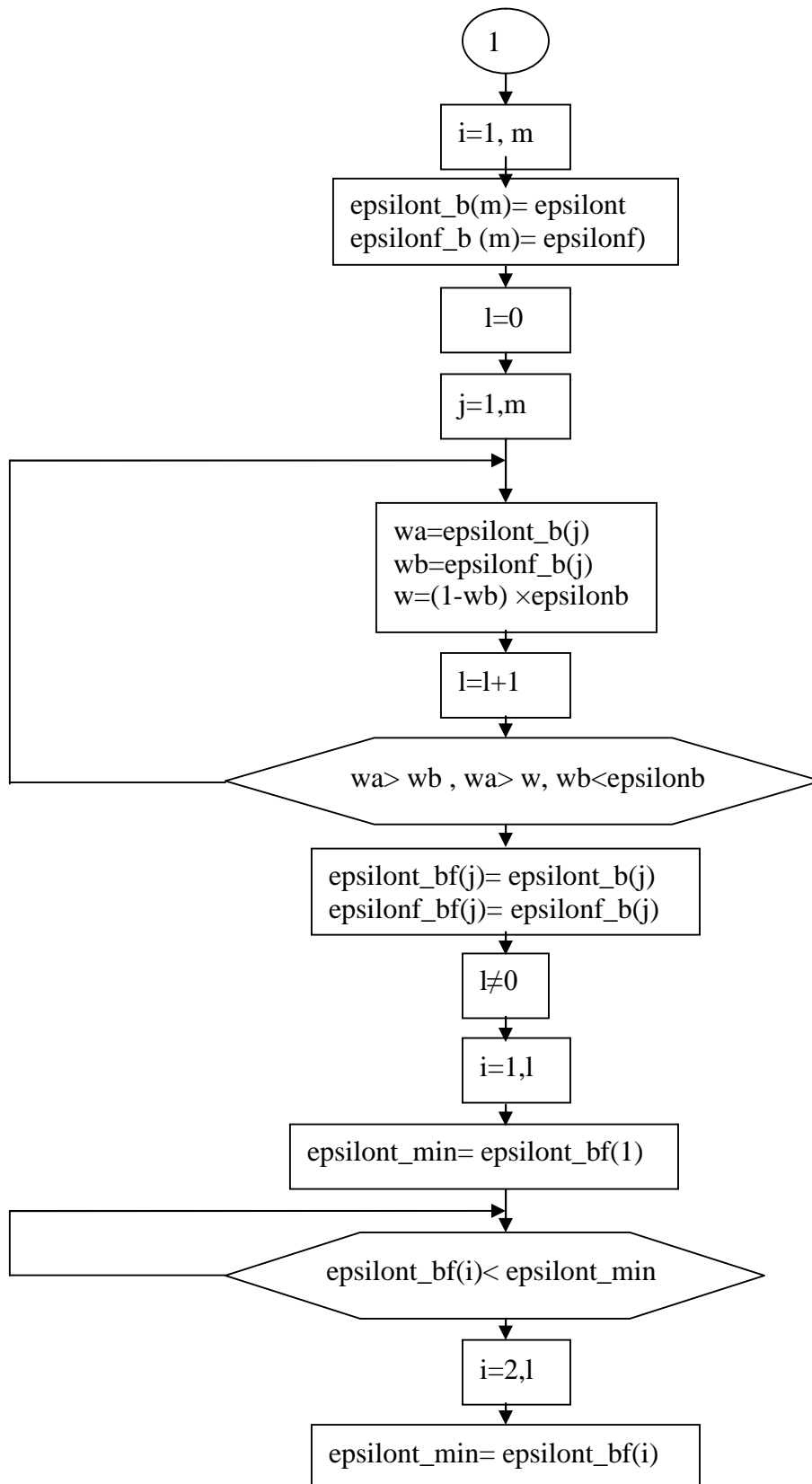


Figure 45 : Mise en plan de la plaque qui porte les injecteurs





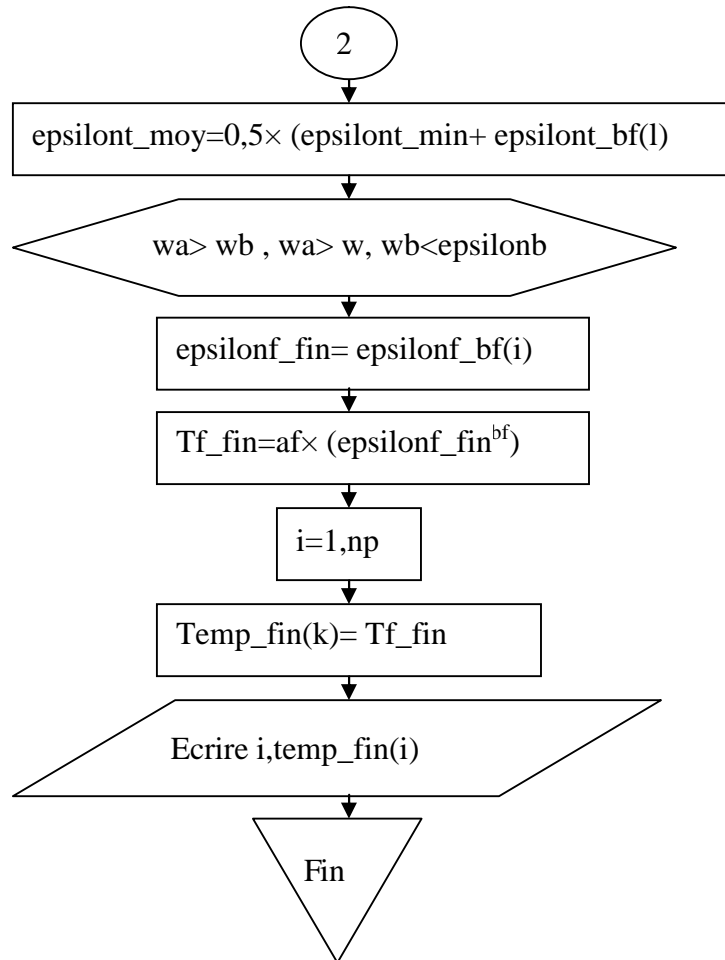


Figure 46 : Organigramme principale de résolution de l'équation $f(\varepsilon) = 0$

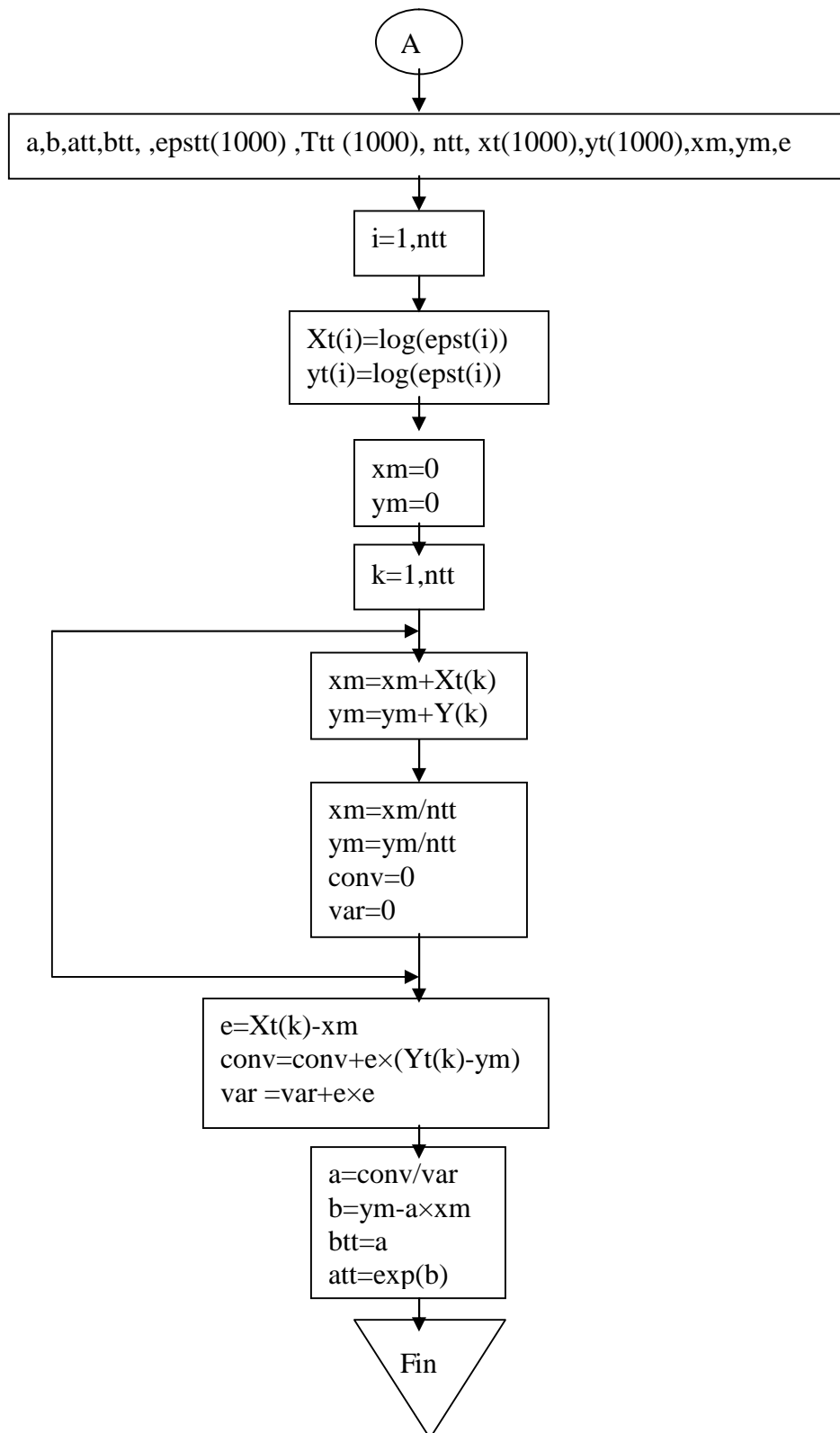


Figure 48 : Subroutine d'ajustement

Résumé :

Ce travail est divisé en deux parties, on cherche dans la première partie à expérimenter une technique, pour déterminer à partir de l'émissivité la température d'une flamme laminaire de diffusion. Ceci se fait en utilisant la thermographie infrarouge (IR-caméra), et en appliquant la méthode proposée par **Eulàlia Planas**.

À partir de l'analyse de l'image thermo-graphique dans plusieurs zone (**points, lignes, surfaces**).

- On a montré la fiabilité de la méthode proposée par **Eulàlia Planas**.
- On a remarqué que l'émissivité et la température changent avec le changement de la zone étudié.

Dans la seconde partie, on compare les résultats obtenus par une simulation numérique faite en utilisant le code **FLUENT** avec les résultats expérimentaux.

Elle nous a permis de :

- Déterminer la température directement sans passer par l'émissivité.
- Etudier d'autres variables telles que : la pression, la vitesse, la fraction massique, la pollution, etc.

Mots clés : Thermographie infrarouge, émissivité de la flamme, Mesure de la température, flamme laminaire de diffusion.

Abstract:

This work is devised in tow parts, we seek in the first part to experiment technic to determine the temperature of diffusion laminar flame from determining the flame emissivity, by using an infra-red camera and applying of **Eulàlia Planas's** method.

Through analyses of the temperature distribution image in several regions (**points, lines, surfaces**).

- We show the trustworthy of the applied of **Eulàlia Planas's** method.
- We observe that the value of emissivity and temperature change with changing studied regions.

In a second party we compare the experimental results with the results of a numerical simulation of the same problem by using **FLUENT** code.

This study allowed us to:

- Obtaining the temperature directly without passing through the emissivity.
- Study of several parameters like: the velocity ,pressure, the mass fraction, pollutant, etc

Key words: Infrared thermography, Flame emissivity, Measure of temperature, Diffusion laminar flame.

ملخص :

هذه المذكرة تضم قسمين، نبحث في القسم الأول عن طريقة تجريبية للحصول على درجة حرارة اللهب الرقائقي المنتشر من خلال الانبعاثية ، يتم ذلك باستعمال كاميرا ذات أشعة تحت الحمراء و باعتماد تطبيق طريقة الباحث **Eulàlia**

Planas

من خلال تحليل صور التوزيع الحراري في عدة مناطق (**نقاط، خطوط، مساحات**).

- تحققنا من مدى فعالية تطبيق طريقة الباحث **Eulàlia Planas** لتحديد الانبعاثية.

- لاحظنا أن قيمة الانبعاثية و درجة الحرارة تتغير بتغير المكان المدروس .

في القسم الثاني نقوم بمقارنة نتائج الدراسة التجريبية مع النتائج المتحصل عليها في الدراسة الرقمية باعتماد برنامج **FLUENT**.

هذه الدراسة مكنتنا من:

- الحصول على درجة الحرارة دون المرور بالانبعاثية.

- دراسة عدة متغيرات نذكر على سبيل المثال: الضغط، السرعة، النسبة الكتلية، التلوث، الخ.

كلمات مفتاحية: أشعة تحت الحمراء، انبعاثية اللهب، درجة حرارة اللهب، اللهب الرقائقي المنتشر.