

THESE

Présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Pour obtenir le titre de

Docteur de l'université de Lille 1

Spécialité : Structure et Dynamique des Systèmes Réactifs

Par

Jérôme DELHAY



**Développement d'un dispositif d'analyse quantitative
de particules de suie par incandescence induite par
laser (LII). Application à la mesure d'émissions
polluantes des turbines aéronautiques**

Soutenue le 25 mai 2007 devant la commission d'examen

Rapporteurs :	A. COPPALLE	Professeur à l'INSA de Rouen
	C. MOUNAÏM-ROUSELLE	Professeur à Polytech'Orléans
Membres du jury :	D. FERRY	Chargé de recherche (CNRS)
	F. GRISCH	Maître de recherche à l'ONERA
	J.F. PAUWELS	Professeur de l'Université Lille1
	I. VALLET	Responsable service Nouvelles Technologies à Auxitrol S.A.
Directeurs de thèse :	P. DESGROUX	Directrice de recherche CNRS (PC2A Lille)
	E. THERSSEN	Maître de conférences à l'USTL (PC2A Lille)

Remerciements

J'aimerais témoigner ma vive reconnaissance à :

Jean François Pauwels, directeur du laboratoire PC2A (Physico-Chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère) à Lille, pour m'avoir accueilli dans son laboratoire, dans lequel règne une très bonne ambiance ;

Pascale Desgroux, ma directrice de thèse, qui m'a guidé et encouragé au cours de ces quatre années de travail. J'ai également beaucoup apprécié son soutien et les différents voyages à travers l'Europe que nous avons fait dans le cadre du projet Européen AEROTEST ;

Eric Therssen, mon co-directeur de thèse. Malgré son emploi du temps très chargé d'enseignements il m'a prodigué les connaissances nécessaires pour la réalisation mécanique du système de combustion ;

L'ensemble du personnel administratif et technique pour sa bonne humeur : Valérie Vilain, Béatrice Lecrenier, Sylvie Gosselin, Patrick Bartier et Jean-Jacques Ledée qui sont toujours prêts à rendre service. Je remercie également Pascal Demaux, Richard Bertaux et Marc Ziegler pour leur aide technique ;

L'ensemble des étudiants qui ont travaillé au laboratoire et que j'ai pu côtoyer.

La société Auxitrol S.A. qui a co-financé cette thèse et les personnes avec qui j'ai travaillé :

Olivier Legras qui m'a proposé cette thèse, bien que mon domaine de compétence était assez différent de ce sujet de thèse ;

Isabelle Vallet, qui a suivi l'évolution de ma thèse tout au long de ces quatre années ;

David Seyer, pour son aide précieuse en informatique, Jean Yves Pajak et Cyril Autourde avec qui j'ai réalisé quelques campagnes de mesures ;

Et d'une manière générale merci à toutes ces personnes pour leur bonne humeur.

Le club de judo ASPIT de Lille avec qui je garderai de bons souvenirs et avec qui j'espère pouvoir refaire quelque randoris en repassant à Lille.

Je voudrais finir en remerciant ma famille qui m'a fait confiance et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de mes études.

Sommaire

Introduction	11
1 Mesures des particules de suie par les systèmes de combustion : méthodes et applications	15
1.1 Introduction	15
1.1.1 Processus de formation des particules de suie	15
1.1.2 Morphologie des agrégats	17
1.1.3 Impacts sanitaires, environnementaux et technologiques	18
1.2 Normes	20
1.3 Méthodes de mesures	23
1.3.1 Dispositifs de laboratoire	23
1.3.1.1 Méthodes ex-situ	24
1.3.1.1.1 Les méthodes par pesée	24
1.3.1.1.1.1 Microbalance à bras oscillant : TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)	24
1.3.1.1.1.2 Microbalance à cristal de quartz (QCM)	25
1.3.1.1.1.3 Gravimétrie et pycnométrie	25
1.3.1.1.2 Les méthodes optiques	26
1.3.1.1.2.1 Mesure par transmittance	26
1.3.1.1.2.2 Mesure par réflectance	27
1.3.1.1.2.3 Mesureur optique multi-angles (MAAP : Multi Angle Absorption Photometer)	28
1.3.1.1.3 Conclusion	29
1.3.1.2 Mesures in-situ	30
1.3.1.2.1 Mesure par extinction	30
1.3.1.2.2 Spectroscopie à temps de déclin de la cavité optique ou Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)	32
1.3.1.2.3 L'Incandescence Induite par Laser (LII)	33
1.3.1.2.3.1 Expression du rayonnement	35
1.3.1.2.3.2 Longueur d'onde d'excitation	37
1.3.1.2.3.3 Longueur d'onde de détection	38
1.3.1.2.4 Conclusion	39
1.3.1.3 Conclusion sur les méthodes de mesure	39
1.3.2 Dispositifs commerciaux	39
1.3.2.1 Le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)	39
1.3.2.2 ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)	41
1.3.2.3 Système LII Artium	42
1.3.2.4 Système LII Metrolaser	43
1.3.2.5 Conclusion	44
1.3.3 Comparaison des techniques	45
1.4 Les applications	47
1.4.1 Mesures dans les moteurs diesel	47
1.4.2 Mesure dans les turbines aéronautiques	51
1.5 Conclusion	55
2 Dispositif expérimental	57
2.1 Introduction	57
2.2 Montage de base en LII 90° et LII rétro	59
2.2.1 Configuration angle droit (ou 90°)	59
2.2.2 Configuration rétro	60
2.2.3 Comparaison des deux configurations	61
2.3 Banc de mesure	62
2.3.1 Dispositif de production de suies	62

2.3.2	Le brûleur kérosène	63
2.3.3	Zone de combustion	65
2.3.4	Cellule de calibrage	66
2.3.5	Conclusion	67
2.4	Dispositif de mesure des particules de suie	67
2.4.1	Les lasers	68
2.4.1.1	CFR200 / CFR400	68
2.4.1.2	Laser Brilliant	70
2.4.2	Détection des signaux LII	70
2.4.2.1	Caméra PCO Dicam Pro	70
2.4.2.1.1	Chronogramme de la caméra	71
2.4.2.2	Caméra Princeton Instrument	72
2.4.2.3	Photomultiplicateur (PM)	73
2.4.3	Banc d'extinction	74
2.4.3.1	Photodiode	74
2.4.3.2	Mesureur d'énergie	75
2.5	Conclusion	75
3	Caractérisation du dispositif AEROTEST	77
3.1	Le dispositif LII : version initiale focalisée	78
3.1.1	Description	78
3.1.2	Caractérisation de la chaîne de détection	82
3.1.2.1	Réponse spectrale	83
3.1.2.1.1	Loi de Planck	83
3.1.2.1.2	Mesures expérimentales	85
3.1.2.1.3	Conclusion	87
3.1.2.2	Effet de la profondeur de champ	87
3.1.2.2.1	Dispositif expérimental	88
3.1.2.2.2	Résultats	89
3.1.2.2.3	Conclusion	90
3.1.3	Détermination du volume de mesure	91
3.1.3.1	Caractéristique énergétique du système	91
3.1.3.2	Taille du faisceau laser	91
3.1.3.3	Le brûleur Wolfhard Parker	92
3.1.3.4	Caractérisation du volume d'incandescence	94
3.1.3.5	Mise en évidence des effets de bord	95
3.1.3.6	Conclusion	98
3.2	Modification du système	99
3.2.1	Caractérisation du volume de mesure	99
3.2.2	Evolution du signal LII	100
3.2.3	Optimisation du système	100
3.2.3.1	Chaîne d'excitation	101
3.2.3.2	Chaîne de détection	103
3.2.3.3	Logiciel	103
3.3	Conclusion	106
4	Calibrage du dispositif LII dans une flamme de kérosène	108
4.1	Caractérisation du brûleur kérosène	108
4.1.1	Distribution spatiale des particules de suie dans la flamme	108
4.1.1.1	Signaux LII enregistrés en tir à tir	108
4.1.1.2	Signaux LII par accumulation d'images	110
4.1.2	Température de la flamme	111
4.1.3	Conditions de mesure dans la cellule de calibrage	113
4.1.3.1	Distribution spatiale des suies	113
4.1.3.2	Mesure de la température	114
4.1.3.3	Vitesse de l'écoulement	116
4.1.4	Conclusion	118

4.2	Etude énergétique du processus LII dans le brûleur	118
4.2.1	Distribution d'énergie du laser CFR400	119
4.2.2	Correspondance des spots LII et du signal LII	121
4.2.3	Influence de la température initiale des particules de suie sur le signal LII	121
4.3	Calibrage des mesures LII	123
4.3.1	Méthode de calibrage	124
4.3.1.1	La loi de Beer-Lambert	124
4.3.1.2	Mesures d'extinction	125
4.3.1.3	Lien entre les mesures d'extinction et les mesures rétro LII	126
4.3.1.4	Calibrage du dispositif rétro LII	127
4.3.2	Quantification des mesures LII réalisées dans les turbines	129
4.3.2.1	Relation entre les signaux LII mesurés dans la cellule de calibrage et dans une turbine	129
4.3.2.2	Détermination de la fraction volumique de suies intégrée sur la section du panache	131
4.3.2.3	Détermination du débit massique de suies produites par la turbine	133
4.4	Conclusion	134
5	Application à la mesure sur bancs moteurs	136
5.1	Fonctionnement d'un moteur	136
5.1.1	Fonctionnement d'un turboréacteur - terminologie	137
5.1.2	Les turbines testées	138
5.1.2.1	Le moteur ATAR	138
5.1.2.2	Le moteur GNOME	140
5.1.2.3	La turbine à gaz SGT300	141
5.2	Résultats des campagnes de mesures	141
5.2.1	Université RWTH, janvier 2005	142
5.2.1.1	Installation du système LII	142
5.2.1.2	Résultats	143
5.2.1.3	Conclusion	144
5.2.2	Rolls Royce, août 2005	145
5.2.2.1	Installation	145
5.2.2.2	Résultats	147
5.2.2.2.1	Signaux LII en régime transitoire	149
5.2.2.2.2	Signaux LII en régime stationnaire	151
5.2.2.2.3	Signal LII en fonction de la densité d'énergie	152
5.2.2.3	Conclusion	153
5.2.3	Université RWTH, mars 2006	154
5.2.3.1	Installation	154
5.2.3.2	Résultats	155
5.2.3.3	Conclusion	157
5.2.4	Université RWTH, août 2006	158
5.2.4.1	Installation	158
5.2.4.2	Résultats	159
5.2.4.3	Conclusion	160
5.2.5	Siemens, Novembre 2006	160
5.2.5.1	Installation	161
5.2.5.2	Résultats	162
5.2.5.3	Conclusion	164
5.2.6	Université RWTH, janvier 2007	164
5.2.6.1	Installation	165
5.2.6.2	Résultats	165
5.2.6.3	Conclusion	169
5.2.7	Conclusion des campagnes de mesures	169
	Conclusion générale	172
	Références bibliographiques	176
	A : FONCTIONNEMENT D'UNE CAMÉRA CCD INTENSIFIÉE	188

A.1	L'intensificateur	188
A.2	Le capteur CCD	189
A.3	Chronogramme de la caméra	190
B.	<i>Etude expérimentale des effets de bords et de la sublimation par couplage rétro LII et LII angle droit</i>	192
B.1	Conditions expérimentales	193
B.1.1	Dispositif expérimental	193
B.1.2	Sublimations et effets de bords	196
B.1.2.1	Courbes de densité d'énergie	200
B.2	Modélisation (réalisée par l'Université de Lund, Suède)	201
B.3	Conclusion	203

INTRODUCTION

Introduction

L'industrie des transports et de l'énergie utilise en grande majorité des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, provenant de la décomposition de matières organiques animales ou végétales. La combustion de ces combustibles conduit à la formation de produits nocifs, tels que les particules de suie, pour la santé publique et pour l'environnement. De nombreuses études sont menées à travers le monde par des centres de recherche et des groupes industriels sur les processus de réduction de ces émissions polluantes. Cette dynamique prend un essor considérable du fait de la prise de conscience de la part des gouvernements et de l'opinion publique des pays industrialisés, principaux responsables du réchauffement de la planète.

Les conséquences de l'émission de particules de suie sont nombreuses. Elles sont impliquées dans les maladies cardio-vasculaires, le cancer broncho-pulmonaire et les allergies [Oberdörster, 2001]. Par ailleurs, les particules émises dans la troposphère par le parc aéronautique ont un impact chimique important du fait de leur long temps de séjour. Elles contribuent notamment à la formation de traînées de condensation (contrails) à l'origine de la formation de cirrus [Schumann, 2005].

La réduction des émissions polluantes, et en particulier des particules de suie, s'appuie sur des programmes de recherche fondamentale et appliquée. Deux voies sont menées en parallèle. La première consiste à comprendre le processus complexe de formation des particules de suie. Des études fondamentales sont menées sur des flammes de laboratoire et des réacteurs, ce qui a permis de déterminer les principales voies réactionnelles de formation des suies [Richter, 2000]. La seconde voie consiste à disposer d'une métrologie adaptée qui réponde aux exigences de sensibilité et aux contraintes imposées par le dispositif de combustion qui produit des suies. Par ailleurs, le suivi quantitatif et instantané des émissions polluantes est également envisagé comme moyen de contrôle de la combustion (contrôle actif) ou de la "santé" d'un moteur (plus couramment appelé EHM : Engine Health Monitoring).

Les diagnostics laser sont très bien adaptés pour assurer le suivi des émissions de polluants gazeux ou particulaires, du fait de leur sensibilité, de leur caractère non intrusif et des résolutions temporelles et spatiales associées. Dans le domaine des suies, la technique d'Incandescence Induite par Laser (LII), développée depuis la fin des années 1970, s'est

imposée comme méthode de référence pour doser les particules de suie in situ dans la flamme ou à l'émission de systèmes de combustion [Schulz, 2006]. Cette technique consiste à porter les particules de suie à très haute température sous l'action du flux énergétique laser, puis à recueillir le rayonnement qu'elles émettent. Les mesures du rayonnement émis sont très sensibles, instantanées, non intrusives et proportionnelles à la fraction volumique de suies.

De nombreuses applications de la technique LII ont été réalisées dans des brûleurs, des moteurs automobiles ou à l'émission d'installations de combustion [Leipertz, 2002]. En ce qui concerne les turbines aéronautiques, on ne répertorie que quelques applications à l'émission réalisées par [Jenkins, 2002] et [Schäfer, 2000]. La faisabilité de la technique LII a été démontrée, ce qui permet d'envisager que la méthode LII supplante peu à peu celle dite du Smoke Number, actuellement utilisée dans le domaine aéronautique pour caractériser les émissions de particules de suie. La technique du Smoke Number repose sur l'analyse de la réflectance d'un papier filtre sur lequel des suies ont été collectées en aval de la turbine.

L'étude de [Schäfer, 2000] a été entreprise dans le cadre de deux projets européens successifs AEROJET I (1995-1998) et AEROJET II (1998-2001) au cours desquels un dispositif original de détection de particules de suie par LII a été développé par la société Rolls-Royce. Ce dispositif utilise un système compact dans lequel la source laser excitatrice et le système de détection sont réunis *dans une boîte*. La mesure du signal LII est intégrée le long de l'axe laser et est enregistrée dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser. Nous appellerons cette configuration rétro-LII (backward-LII en anglais).

A partir de l'expérience acquise lors des projets AEROJET I et II, un nouveau projet européen AEROTEST "Remote Sensing Technique for Aeroengine Emission Certification and Monitoring" (2003-2007) a été mis en place¹. La mise au point d'un dispositif compact rétro-LII permettant des mesures quantitatives de fraction volumique de suies émises par les turbines aéronautiques constitue l'un des deux volets importants de ce projet, l'autre volet s'intéressant aux polluants gazeux. La thèse s'est déroulée dans le cadre de ce projet et a été financée par une bourse CIFRE en partenariat avec la société Auxitrol S.A. Elle a été réalisée au laboratoire PC2A (Physico-Chimie des Processus de Combustion et de l'Atmosphère) – UMR CNRS (Lille 1). Des collaborations avec différentes universités et différentes industries européennes ont permis de réaliser des mesures en aval de différentes turbines pour mettre au point et tester le dispositif rétro-LII en conditions réelles.

¹ <http://www.aerotest-project.net>

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur l'impact environnemental des particules de suie. Les instruments de mesure commerciaux permettant de les quantifier sont ensuite présentés. Une attention supplémentaire a été portée aux études réalisées sur les moteurs Diesel et les turbines aéronautiques.

Le deuxième chapitre présente le dispositif expérimental mis en place au laboratoire dans le but de tester et de calibrer le dispositif rétro-LII. Au cours de la thèse, un système constitué d'un brûleur kérosène et d'une cellule de calibrage a été conçu pour produire des particules de suie, ayant des caractéristiques proches de celles rencontrées à l'échappement des turbines aéronautiques. Une description du matériel utilisé pour les mesures est également présentée.

Le troisième chapitre présente le système rétro-LII destiné à mesurer la fraction volumique de suies à l'échappement des turbines aéronautiques. Ses caractéristiques sont détaillées ainsi que son évolution au cours du projet. Une étude fondamentale sur l'évolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie laser y est présentée.

Le calibrage du dispositif rétro-LII par la méthode d'extinction est décrit dans le quatrième chapitre. Nous montrons que la cellule de calibrage, placée sur la cheminée connectée au brûleur kérosène, constitue un outil idéal pour le calibrage car la distribution spatiale des particules de suie et de la température y est homogène. Le calibrage du dispositif rétro-LII est effectué par comparaison de la fraction volumique de suies déterminée par extinction et du signal LII mesuré avec le système AEROTEST. Enfin, la procédure de calibrage des mesures LII réalisées dans les turbines est explicitée.

Après une brève présentation du fonctionnement des turbines aéronautiques, le cinquième chapitre est entièrement consacré aux résultats des campagnes de mesures réalisées en aval de différentes turbines.

**CHAPITRE 1 : MESURES DES PARTICULES
DE SUIE PAR LES SYSTEMES DE
COMBUSTION : METHODES ET
APPLICATIONS**

1 Mesures des particules de suie par les systèmes de combustion : méthodes et applications

L'objectif de ce chapitre est de présenter un bilan sur les méthodes de mesures utilisées en laboratoire et dans l'industrie pour quantifier les particules de suie émises par les processus de combustion. Les méthodes de laboratoire existent depuis longtemps et sont aujourd'hui principalement utilisées pour comprendre les mécanismes de formation des polluants. Les méthodes industrielles servent à suivre la production de particules dans les moteurs ou à l'échappement ; elles sont encore en voie de développement, même si certains appareils sont déjà commercialisés.

1.1 Introduction

La production d'énergie est au centre des préoccupations dans les pays industrialisés et elle est le fil conducteur du développement pour les pays en voie d'industrialisation. Cette énergie est principalement produite par la combustion de matières fossiles et de leurs dérivés. Malheureusement, les processus de combustion, encore mal maîtrisés, sont à l'origine d'un grand nombre d'émissions polluantes telles que les particules, les produits hydrocarbonés imbrûlés, les oxydes de carbone (CO_x), les oxydes de soufre (SO_x) et les oxydes d'azote (NO_x). Ces produits résultant d'une combustion incomplète, sont principalement concentrés dans les villes et les zones urbaines du fait de l'activité anthropogène et de l'activité massive des transports. Mais ils sont également présents en différentes concentrations selon les zones de l'atmosphère. Il est certain aujourd'hui que ces produits polluants ont un impact sanitaire pour l'homme et pour l'environnement, et que leur réduction constitue un enjeu technologique et économique.

1.1.1 Processus de formation des particules de suie

Le processus de formation des particules de suie résulte de la combustion de produits hydrocarbonés, suivant un schéma physique et chimique très complexe. Il se produit dans les zones riches en combustible lorsque la température dépasse 1400 K. Les particules de suie issue de la combustion d'un moteur diesel sont composées d'environ 80% en masse d'atomes de carbone et le reste représente la partie soluble, composée d'hydrocarbures imbrûlés pouvant provenir du carburant ou du lubrifiant [Douce, 2001]. Par ailleurs, les particules de

suie ont de grandes surfaces spécifiques qui leur donnent la faculté d'adsorber de nombreuses molécules telles que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) responsables des maladies cardio-pulmonaires, les oxydes de soufre, formés à partir du soufre présent dans le carburant, et des molécules d'eau formées pendant la combustion. La présence des particules de suie dans une flamme se caractérise par une couleur jaune très lumineuse et contribue en grande partie au rayonnement thermique.

Les espèces responsables de la formation des particules de suie sont les HAP. Ces derniers prennent naissance dans la zone réactionnelle de la flamme et sont le fruit d'une dégradation d'hydrocarbures imbrûlés. Le processus de formation des particules de suie le plus répandu est le mécanisme HACA (Hydrogen Abstraction Condensation Acetylene) [Frenklach, 1984], [Richter, 2000]. Dans ce mécanisme, la première étape consiste en l'addition d'une molécule acétylénique et l'arrachement d'un atome d'hydrogène. Sur ce même principe, une réaction en chaîne se met en place conduisant à des HAP plus lourds. Cette croissance continue jusqu'à la formation des premières particules appelées nucléi constituées de 10 à 100 atomes de carbones et dont la taille est de l'ordre du nanomètre. Ensuite, des molécules présentes dans la flamme viennent se fixer sur ces nucléi, ce qui constitue la phase de croissance de surface.

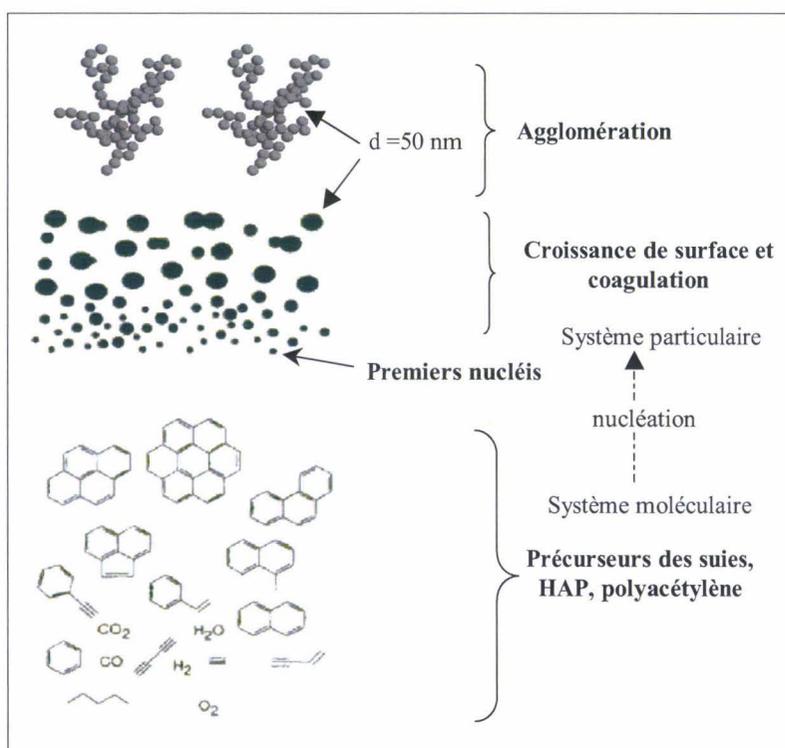


Figure 1.1 : Mécanisme simplifié de formation des suies [Bockhorn, 1994].

Au cours de cette étape, le nombre de nucléi reste constant mais la masse volumique de la particule de suie augmente. Les particules coalescent par collision (phase de coagulation) pour former de plus grosses particules dont la taille varie de 10 à 50 nm et sont appelées particules primaires, puis s'agglomèrent les unes aux autres pour former des agrégats de particules. La figure 1.1 résume le processus de formation des particules de suie.

1.1.2 Morphologie des agrégats

Malgré des efforts considérables de la communauté scientifique, les connaissances sur la structure, la morphologie et la composition des particules de suie issues de la combustion dans les turbines aéronautiques sont pauvres. [Delhaye, 2006] réalise des analyses physico-chimiques des particules de suie par microscopie à balayage d'électron (SEM) et par microscopie électronique à transmission (TEM) et montre que les particules de suie primaires sont de forme sphérique dont le diamètre suit une loi gaussienne avec un maximum centré à 22,5 nm (analyse SEM) et 10,2 nm (analyse TEM) respectivement. Les images obtenues par TEM [Tian, 2005] (Figure 1.2) après prélèvement thermophorétique [Megaridis, 1987] (insertion très rapide d'une lame métallique froide dans un milieu chaud contenant de particules de suie. Les particules de suie chaudes viennent se coller à la lame métallique par phénomène de thermophorèse) montrent des agrégats de particules de suie issues de la combustion d'une flamme de diffusion laminaire d'éthylène.

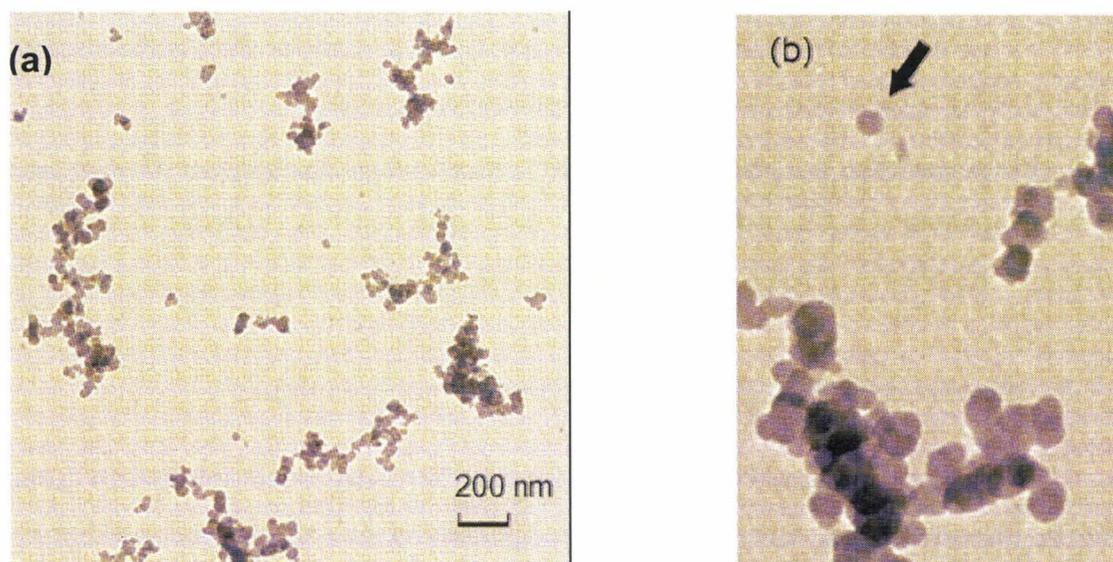


Figure 1.2 : Images TEM d'agrégats de suies issues de la combustion d'une flamme de diffusion laminaire d'éthylène. L'image de droite (b) montre une particule primaire isolée dont la forme est sphérique.

La structure montre une organisation en chaîne ou en amas composée de plusieurs dizaines de particules primaires de forme sphérique. Leurs tailles varient d'environ 30 nm pour les particules primaires isolées à plusieurs centaines de nanomètres suivant le nombre de particules constituant l'agrégat et sa forme. A partir de ces clichés, on caractérise les agrégats par des diamètres équivalents et une dimension fractale.

La dimension fractale permet de caractériser la structure irrégulière de l'agrégat. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 1.2, les agrégats ont des arrangements aléatoires en amas de particules primaires organisées soit en chaîne soit en structure très compacte. Les niveaux de gris permettent après traitement mathématique de déterminer une structure 3D de l'agrégat. La dimension fractale d'un agrégat est définie en fonction du nombre de particules primaires le constituant, du diamètre de giration et du diamètre moyen des particules primaires. Ainsi une dimension fractale inférieure à 2 présente une forme en chaîne alors qu'une dimension fractale supérieure à 2 présente une forme plus compacte.

Plusieurs diamètres peuvent être décrits pour caractériser un agrégat :

- ✓ Le diamètre de giration : c'est le diamètre d'une sphère de même masse et de même moment d'inertie que l'agrégat considéré ;
- ✓ Le diamètre aérodynamique équivalent qui correspond au diamètre d'une particule sphérique, de masse volumique unitaire ($\rho_0 = 1 \text{ g.cm}^{-3}$) et ayant la même vitesse de chute que l'agrégat considéré ;
- ✓ Le diamètre de mobilité électrique, qui est défini comme étant le diamètre d'une particule sphérique ayant même mobilité électrique que l'agrégat.

Il est également possible de déterminer la morphologie des agrégats de suies par des méthodes optiques (extinction et diffusion) pour déterminer le diamètre des particules primaires, la taille des agrégats et la dimension fractale.

1.1.3 Impacts sanitaires, environnementaux et technologiques

L'augmentation du nombre de véhicules diesel et l'activité industrielle sont autant de sources responsables des émissions polluantes en zone urbaine et plus particulièrement de particules de suie. La forte concentration d'espèces hydrocarbonées gazeuses et des particules de suie peut conduire certains jours à l'apparition de brumes blanches au-dessus des villes, plus connues sous le nom anglais de *smog*. Des études épidémiologiques ont montré une

relation entre une exposition à une telle pollution et l'augmentation du nombre de cancers et de maladies cardio-pulmonaires chroniques pouvant conduire à la mort. Les plus fines particules (diamètre inférieur au micromètre) apparaissent être les premières responsables par leur facilité à pénétrer jusqu'au plus profond du système respiratoire, conduisant à une mutation des cellules. Mais le rôle que jouent les particules de suie dans la pollution atmosphérique n'est pas encore bien connu.

Le parc aéronautique émet les particules principalement en altitude (de part son cycle de fonctionnement), entre la partie supérieure de la troposphère et la partie inférieure de la stratosphère, et affecte les réactions chimiques en altitude. Bien que cette production soit bien inférieure à la production émise au niveau de la surface de la planète, son impact est beaucoup plus important du fait du long temps de résidence dans la troposphère. De plus, comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe précédent, les particules de suie ont une surface spécifique importante qui leur permet d'adsorber des molécules d'eau.

Les traînées formées derrière les avions (en anglais contrail pour **condensation trail**) résultent de la solidification de gouttelettes d'eau produites lors de la combustion. Il est admis que pour chaque litre de kérosène brûlé, la même quantité d'eau est produite. L'air très chaud des turbines, éjecté dans un air très froid à la faible pression des hautes altitudes dépasse le point de saturation, formant ces cristaux de glace. Les particules (suires et métalliques) sont supposées être à l'origine de la formation de ces gouttelettes.



Figure 1.3 : Traînée d'une Boeing 747.

Les propriétés de ces nuages dépendent du type d'aérosol formé dans les gaz d'échappement. Dans les latitudes moyennes, les traînées sont responsables de la formation des cirrus et on estime qu'ils couvrent 0.1% de la surface de la Terre. Ceci a pour conséquence de réduire les radiations solaires vers la surface de la Terre, ce qui provoque une baisse des températures au niveau du sol, une augmentation de la température de la troposphère et une modification des réactions chimiques de l'ozone dans la troposphère et la stratosphère.

Le contrôle des émissions de polluants intéresse un grand nombre de secteurs industriels, non seulement pour des questions sanitaires mais aussi car l'émission des polluants peut être un indicateur de la santé d'un système de combustion. (On parle d'Engine Health Monitoring EHM pour la santé d'un moteur). Une augmentation significative d'émission de polluants permet de déclencher les interventions de maintenance ou de réparation [Jaw, 2005]. Par ailleurs, la combustion riche dans les moteurs, synonyme de production de suies, peut avoir une incidence sur la température de la flamme, augmenter les transferts radiatifs et accentuer le dépôt des particules sur les parois du moteur. Ceci provoque une dilatation supérieure à celle prévue par les calculs lors de la conception, pouvant conduire à des déformations mécaniques importantes et, par conséquent, à des détériorations du moteur.

1.2 Normes

Pour des raisons sanitaires, de sécurité ou de protection de l'environnement, les pouvoirs publics peuvent imposer des normes destinées à limiter les émissions. Les particules de suie ayant un caractère dangereux pour la santé humaine et ayant un impact sur l'environnement, ils tentent d'imposer des seuils de production pour l'industrie automobile et aéronautique.

Tout d'abord, les normes définissent la matière particulaire, nommée PM (particle matter), classée en taille suivant leur dangerosité pour la santé. Ce sont de très fines particules dont le diamètre aérodynamique est compris entre 0.005 μm et 10 μm , composées d'un mélange complexe de particules solide et liquide en suspension dans l'air. Elles sont définies en trois catégories :

- ✓ PM₁₀, appelées grosses particules dont le diamètre est compris entre 2,5 et 10 μm
- ✓ PM_{2,5}, appelées fines particules dont le diamètre est inférieur ou égal à 2,5 μm

- ✓ $PM_{0.1}$, appelées ultra fines particules dont le diamètre est inférieur à $0,1 \mu m$

Les grosses particules se déposent presque exclusivement sur les parois du nez ou de la bouche alors que les fines et ultra fines particules vont jusque dans les poumons. Ces dernières sont ainsi considérées comme les plus toxiques pour l'homme. De plus, elles sont présentes en plus grand nombre et ont une plus grande surface spécifique que les grosses particules par rapport à leur masse.

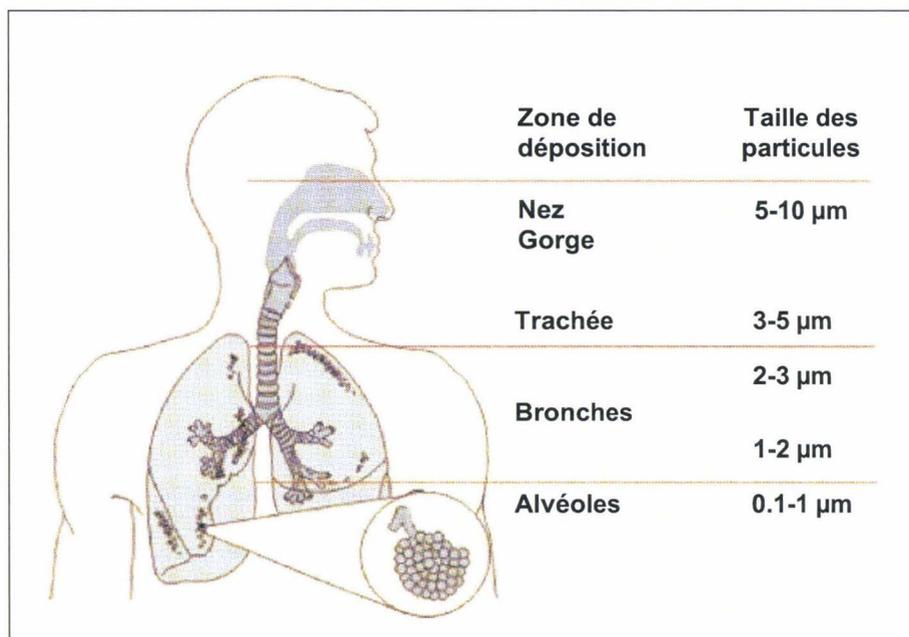


Figure 1.4 : Déposition des particules dans le système respiratoire de l'homme.

Un indice de qualité de l'air (AQI) permet de décrire la qualité de l'air suivant la concentration des $PM_{2.5}$ et PM_{10} en suspension dans l'air, et indique les problèmes sanitaires associés. Ainsi pour un indice compris entre 0 et 100, la qualité de l'air est bonne et il n'y a aucun risque pour la santé humaine. Pour un indice supérieur à 100, les risques deviennent plus importants et il est conseillé aux personnes sensibles d'éviter les expositions à ces environnements en limitant les sorties à l'extérieur.

Le protocole de Kyoto [United Nation, 1998], protocole international ratifié par un grand nombre de pays industrialisés, est une convention qui vise à réduire la production d'émissions polluantes suite au changement climatique dont nous pouvons mesurer tous les jours les conséquences. En 2001, l'ICAO (Organisation Internationale de l'Aviation Civile) a demandé de poursuivre les études en cours pour limiter ou réduire les émissions des turbines aéronautiques, de développer des propositions concrètes et de fournir des dispositifs de mesure de polluants le plus rapidement possible.

Les normes directives au niveau automobile sont définies sous l'appellation Euro. Elles indiquent la masse maximale de produits polluants (NO_x et PM) pouvant être émis par un véhicule en fonction de sa puissance. Depuis 1991, cette norme est de plus en plus restrictive puisqu'elle autorisait une production de PM $0,140 \text{ g.km}^{-1}$ en 1991 (Euro 1) et passe aujourd'hui à $0,025 \text{ g.km}^{-1}$ (Euro 4). A partir de 2009, la norme Euro 5 prévoit une diminution de 80% pour atteindre $0,005 \text{ g.km}^{-1}$ pour tous les véhicules. Le diagramme suivant montre la forte diminution en NO_x et en PM nécessaire pour satisfaire aux législations Euro 4 et Euro 5 :

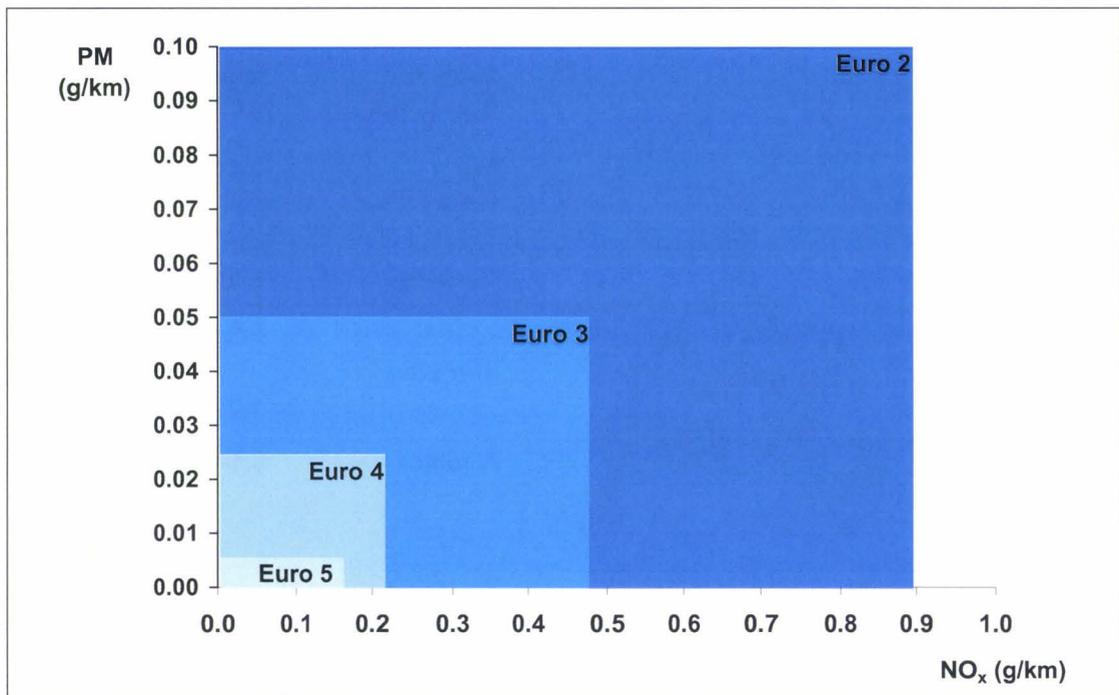


Figure 1.5 : Diagramme d'évolution des normes Euro.

L'édition de normes au niveau aéronautique est beaucoup plus compliquée à mettre en place car les mesures sont plus difficiles à réaliser du fait des différentes tailles de turbines, et des conditions de températures et vitesses à l'échappement des moteurs. De plus les mesures ne peuvent être réalisées qu'au sol alors que le fonctionnement d'un moteur aéronautique a lieu principalement en altitude.

Les normes sur les émissions de particules de suie des moteurs aéronautiques récents sont définies par l'ICAO (Organisation Internationale de l'Aviation Civile) en s'appuyant sur des mesures réalisées par la technique du *Smoke Number* (détaillée plus tard). Cette technique est efficace pour de gros agrégats mais devient inefficace pour des particules inférieures à 100 nm. Une production d'environ 0,04 g de particules par kilogramme de fuel consommé a été estimée pour le parc aéronautique du moment.

L'ICAO s'est fixée jusqu'en 2010, un plan basé sur la sécurité en général et sur l'accroissement de l'efficacité des opérations sur les aéronefs. Plus particulièrement, elle vise à réduire les effets sur l'environnement (produit par l'activité de l'aviation civile), notamment en réduisant le bruit et les émissions polluantes, à travers plusieurs mesures. Dans un premier temps, développer, adopter ou promouvoir de nouvelles mesures pour limiter ou réduire l'impact des émissions afin d'améliorer la qualité de l'air locale et limiter le bouleversement climatique. Dans un deuxième temps, l'ICAO projette une coopération avec d'autres organisations internationales et plus particulièrement l'organisation des Nations Unies sur le changement climatique (UNFCCC : United Nation Framework Convention on Climate Change).

C'est dans cette politique que vient s'inscrire le projet AEROTEST, objet de la thèse dont le but est de développer de nouvelles méthodes de mesures plus sensibles et donc plus adaptées à la métrologie des particules de suie émises par les nouvelles turbines aéronautiques.

1.3 Méthodes de mesures

Il existe tout un panel de méthodes permettant de mesurer les quantités de particules. Plusieurs auteurs ont déjà fait un bilan de ces mesures [Witze, 2001], [Burtscher, 2005]. Nous nous intéressons dans ce chapitre, à décrire les principales méthodes utilisées en laboratoire et les systèmes commercialisés pour l'industrie.

1.3.1 Dispositifs de laboratoire

Les systèmes utilisés en laboratoire peuvent se scinder en deux catégories : les méthodes ex-situ qui nécessitent un prélèvement et les mesures in-situ qui sont réalisées directement dans le milieu à caractériser. Dans ce chapitre, nous ne décrivons que les dispositifs dédiés à la mesure de concentration de particules de suie. Les dispositifs permettant d'accéder à la morphologie et aux propriétés optiques des particules de suie ne sont pas abordés dans cette partie.

1.3.1.1 Méthodes ex-situ

Les méthodes nécessitant l'introduction de sondes de prélèvement pour la collecte de particules sur un filtre ou pour des mesures optiques ex-situ nécessite une procédure soignée lors de l'échantillonnage par sonde. L'introduction d'une sonde dans un milieu réactif tel qu'une flamme entraîne une perturbation de l'écoulement qui est difficile à évaluer. Une dilution est en général associé au prélèvement afin de limiter l'interaction particule-particule (coagulation) ou particule-paroi. La température du prélèvement doit être contrôlée afin d'éviter une condensation. Parmi les méthodes ex-situ, il y a les méthodes par pesées, qui sont relativement anciennes et manquent de sensibilité, et les méthodes optiques, plus sensibles mais nécessitant la connaissance des propriétés optiques des particules, souvent difficiles à déterminer.

1.3.1.1.1 Les méthodes par pesée

Les systèmes décrits ci-dessous déterminent la masse de matière en mesurant une différence de fréquence de vibration d'une tige induite par la masse de particules venant se déposer sur un filtre ou par pesée sur une microbalance. Ces techniques sont principalement utilisées pour la mesure de la pollution atmosphérique (dans les villes par exemple) mais trouvent également des applications au niveau automobile [Kelly, 2002], [Moosmüller, 2001].

1.3.1.1.1.1 Microbalance à bras oscillant : TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance)

Une microbalance TEOM est composée d'un tube creux, oscillant à une certaine fréquence de résonance, équipé d'un filtre installé dans une cellule chauffée. Les particules venant se déposer sur le filtre changent la fréquence d'oscillation. Cette variation de fréquence Δf est proportionnelle à la différence de masse de particules Δm venant se déposer sur le filtre suivant la formule :

$$\Delta f = \frac{-2\Delta m f_0^2}{A \sqrt{\rho_q \mu_q}} \quad \text{Équation 1.1}$$

Avec A : la surface active

f_0 : la fréquence de résonance intrinsèque du matériau

ρ_q : la densité du matériau (par exemple le quartz)

μ_q : le module de cisaillement du matériau

Cette méthode de mesure est sensible (la limite basse de détection est de 0.01 μg) avec une précision de $\pm 1,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour un temps d'intégration d'une heure. [Kelly, 2002] a utilisé cet outil pour déterminer la concentration massique de particules émises par un moteur diesel et a comparé ces valeurs avec un outil, basé sur la mesure par filtre, validé par l'EPA (Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis). La microbalance TEOM enregistre des concentrations massiques entre 20 à 25% inférieures à celles fournies par cet outil de référence. [Moosmüller, 2001] compare cet instrument à des mesures optiques basées sur la diffusion de la lumière et note une meilleure sensibilité de la balance TEOLM.

1.3.1.1.1.2 Microbalance à cristal de quartz (QCM)

C'est un instrument plus ancien, qui fonctionne sur le même principe que la microbalance TEOM. Les particules collectées se déposent sur un cristal utilisant un précipitateur électrostatique. La microbalance QCM présente un bruit de fonctionnement beaucoup moins important que la microbalance TEOM mais ne peut se surcharger que sur un court laps de temps. Pour compenser ce problème, il est possible de diluer l'écoulement ou d'utiliser plusieurs cristaux montés dans un carrousel qui tournerait chaque fois que la limite de charge prédéterminée est atteinte. Les mesures réalisées avec cette technique montrent une bonne corrélation avec des mesures plus traditionnelles de mesure de masse. [SAE AIR5892, 2004] fait référence à cette technique utilisée par une équipe anglaise, trouvant des résultats concordant avec les techniques utilisées de nos jours.

1.3.1.1.1.3 Gravimétrie et pycnométrie

La méthode de gravimétrie est basée sur la mesure de la masse de particules collectées sur un filtre. Cette méthode permet de déterminer la concentration massique de particules suivant la formule :

$$M_s = \frac{m_s}{V} \frac{T_0}{T_s} \quad \text{Équation 1.2}$$

avec M_s : concentration massique des suies [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

m_s : masse de suie collectée sur le filtre [g],

V : volume du gaz échantillonné [cm³],

T₀ : température ambiante [K],

T_S : température à l'entrée de la sonde de prélèvement [K].

Cette technique est généralement associée à la pycnométrie pour atteindre la fraction volumique de suie en déterminant la masse volumique. Malheureusement cette technique engendre une grande incertitude car il est nécessaire de récolter une grande quantité de particules (environ 1 g). La masse volumique est déterminée en injectant un volume d'hélium dans une chambre contenant l'échantillon de particule. En comparant le volume d'hélium injecté et le volume de la cellule, on en déduit la masse volumique de suie. [Choi, 1995] détermine une masse volumique de 1,74 g.cm⁻³ pour des particules de suie issue de la combustion de l'acétylène et [Snelling, 2003] déterminent une masse volumique de 1,9 g.cm⁻³ pour des particules de suie issue de la combustion de l'éthylène.

1.3.1.1.2 Les méthodes optiques

Les méthodes optiques sont très bien adaptées aux mesures des particules de suie car ces dernières ont une efficacité d'absorption très importante. Les trois premiers dispositifs que nous allons décrire utilisent des filtres sur lesquels se déposent les particules, ce qui nécessite l'introduction de sondes dans l'écoulement, engendrant les problèmes de collection cités précédemment. Les autres techniques mesurent la quantité de particules de suie en mesurant l'atténuation d'un signal lumineux due à l'absorption des particules [SAE AIR5892, 2004].

1.3.1.1.2.1 Mesure par transmittance

Cette méthode couramment utilisée en optique (aussi appelé aethalometer en anglais) mesure la différence de transmission due au dépôt de particules de suie sur le filtre [SAE AIR5892, 2004]. L'atténuation de la lumière relative aux particules de suie est donnée par la relation suivante :

$$ATN \equiv -100 \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) = b_{ATN} S_{BC} \quad \text{Équation 1.3}$$

où T et T₀ sont la transmittance de la lumière à travers le filtre chargé de particules et la transmission de la lumière à travers le filtre vierge respectivement, b_{ATN} un coefficient qui dépend des propriétés physico-chimiques des particules et S_{BC} la quantité massique de

carbone en $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$. Cette méthode n'est pas directement applicable sur des particules de suie émises par les turbines aéronautiques car elle dépend des propriétés de la partie carbonée mais également de la partie organique des particules collectées.

1.3.1.1.2.2 Mesure par réflectance

Nous allons décrire, dans cette section, la technique de mesure utilisée aujourd'hui dans l'aéronautique pour quantifier les suies à l'échappement des turbines et appelée *smoke number* ou opacimètre, dont le principe est basé sur la mesure par réflectance [SAE AIR5892, 2004]. C'est une mesure intrusive qui consiste à placer dans les gaz d'échappement un peigne constitué de plusieurs sondes. Ces sondes collectent les particules de suie à travers des lignes maintenues à des températures comprises entre 60°C et 175°C avec une stabilité de $\pm 15^\circ\text{C}$ pour éviter la condensation de la vapeur d'eau. Leur diamètre intérieur est compris entre 4 à 8.5 mm et leur longueur maximale est de 25 m. Les suies se déposent sur un papier témoin avant d'être analysées.

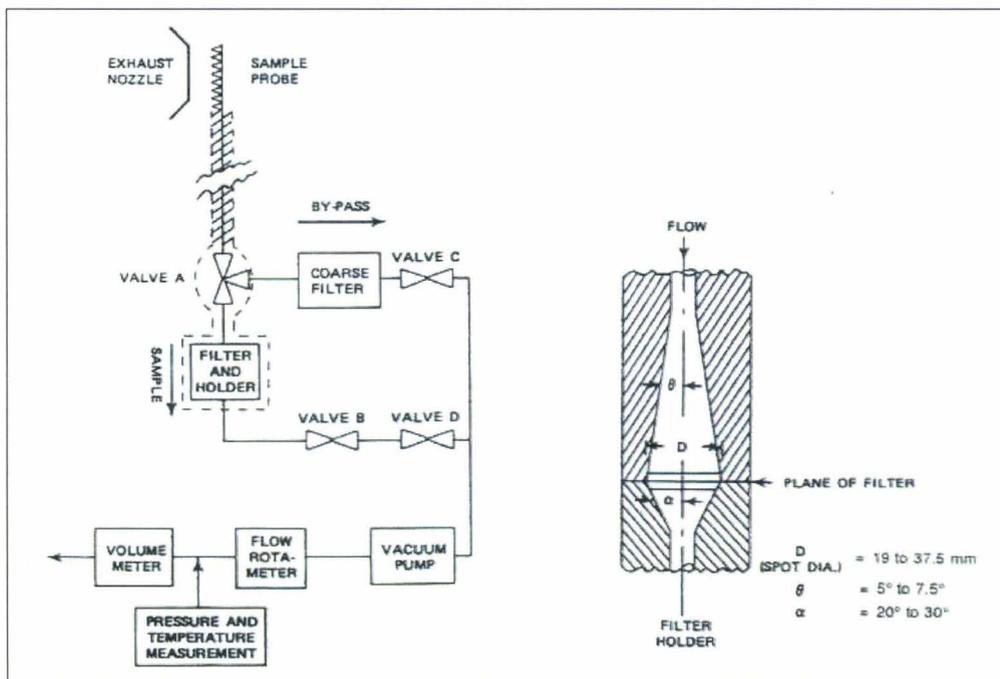


Figure 1.1.6 : Schéma de collection des particules de suie par la méthode du *smoke number*[SAE AIR5892, 2004].

Le principe de la mesure repose sur le rapport de la réflectance du papier témoin avant et après exposition à un écoulement chargé de particules de suie. La valeur obtenue est un

nombre sans dimension compris entre 1 et 100 calculé selon la formule suivante (pour une sonde de mesure) :

$$SN' = 100 \cdot \left(1 - \frac{R_s}{R_w}\right) \quad \text{Équation 1.4}$$

avec R_s et R_w la réflectance du filtre avec et sans dépôt de suies respectivement. La valeur finale du *smoke number* est la moyenne des *smoke number* de chaque sonde individuelle. Cette valeur ne doit pas dépasser une valeur autorisée définie par l'équation 1.5 :

$$SN_{\text{réglementaire}} = 83.6 (F_{00})^{-0.274} \quad \text{Équation 1.5}$$

ou une valeur de 50.

Cette technique n'est plus assez sensible pour contrôler les émissions polluantes des nouvelles turbines. Les normes indiquent d'utiliser du papier Whatman N°4 [SAE5892, 2004] dont le seuil limite bas de filtration est de 100 nm.

1.3.1.1.2.3 Mesureur optique multi-angles (MAAP : Multi Angle Absorption Photometer)

Cette technique réalise les mesures par absorption en continu. Le principe de mesure est le même que pour les mesures par réflectance ou par transmittance : l'analyse consiste à mesurer les modifications des propriétés optiques du filtre [SAE AIR5892, 2004]. La radiation lumineuse incidente pénétrant dans le filtre chargé de particules est diffusée en retour. Une fraction de cette lumière diffusée va être proportionnelle à $\cos(\theta - \pi)$ avec θ l'angle entre le capteur et le filtre, et une autre fraction peut être représentée comme la radiation réfléchie. Ces deux quantités dépendent du dépôt de particules sur le filtre. Le capteur est donc composé d'un détecteur pour la mesure de la radiation après le filtre et de deux détecteurs pour l'énergie diffusée. La Figure 1.7 résume schématiquement l'installation des mesures par transmittance et par réflectance, et les compare avec la mesure multi angles.

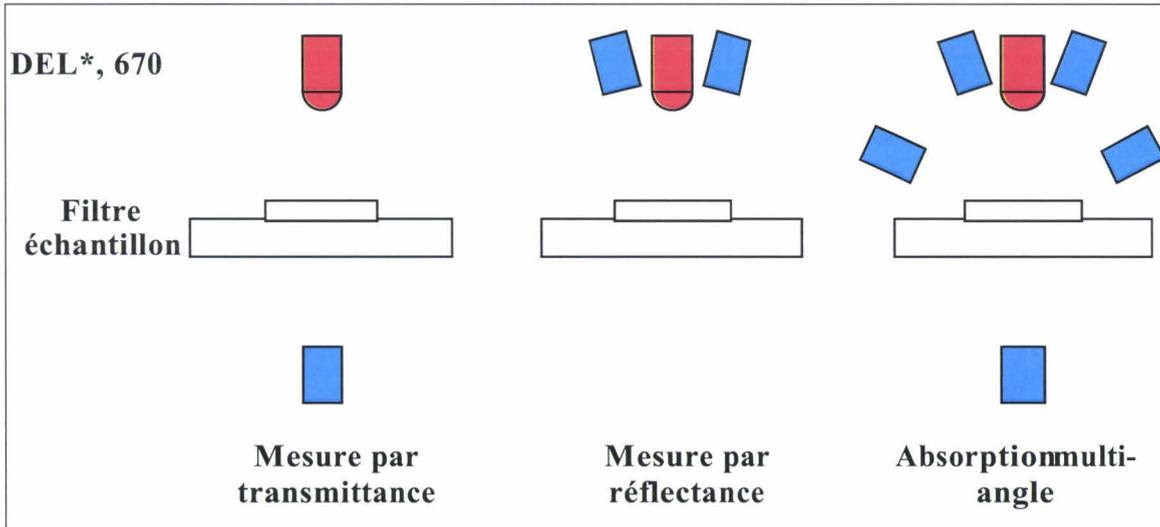


Figure 1.7 : Schémas de principe pour les mesures par transmittance, réflectance et par absorption multi-angles. *DEL : Diode Electro-Luminescente.

Le principe consiste à déterminer les rapports entre la radiation transmise et réfléchié à travers le filtre avec et sans particules. L'absorbance est la différence entre l'extinction et la diffusion de la lumière à travers le filtre chargé de particules.

$$ABS = 100.(1 - SSA_L).\tau_L = b_{ABS}S_{BC} \quad \text{Équation 1.6}$$

où ABS désigne l'absorbance, SSA_L représente le rapport entre l'intensité lumineuse transmise et diffusée, τ_L l'épaisseur optique, b_{ABS} un coefficient de proportionnalité et S_{BC} la masse de particules déposée sur le filtre. L'équation 7 est similaire aux équations 5 et 6 mais inclut le fait de diffusions multiples à travers les paramètres SSA_L et τ_L . La concentration massique de carbone noir c_{BC} est calculée à partir de S_{BC} , le volume de l'échantillon V et la surface de mesure du filtre A suivant l'équation :

$$c_{BC} = \frac{S_{BC} A}{V} \quad \text{Équation 1.7}$$

Une comparaison a été réalisée avec des mesures *smoke number* et montre une bonne corrélation. La limite de détection pour un débit volumique standard de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ est inférieure à $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [SAE AIR5892, 2004].

1.3.1.1.3 Conclusion

Toutes ces techniques sont très largement utilisées en laboratoire pour déterminer les quantités de particules à l'émission des moteurs ou des flammes, et font référence dans le

domaine. Ainsi l'opacimétrie est certifiée comme méthode de mesure pour la mesure des émissions de particules dans l'industrie automobile et aéronautique. Les méthodes par pesée ont l'avantage d'être indépendantes des propriétés optiques des particules de suie contrairement aux méthodes optiques. Toutefois ces techniques nécessitent le prélèvement d'un échantillon avant analyse dont l'impact sur le résultat de la mesure est difficile à évaluer (coagulation, condensation...). De plus, pour les techniques à filtres, les agrégats de suie sont parfois très petits et ne sont pas collectés. Par ailleurs, dans le cas d'un moteur diesel ou aéronautique, les gaz d'échappements sont constitués de particules de suie, mais également de combustibles imbrûlés, de lubrifiant ou de particules métalliques provenant de l'érosion du moteur. Ces particules se déposent sur le filtre et représentent une part de la mesure qu'il est difficile de quantifier. Les mesures in-situ complète avantageusement les techniques ex-situ.

1.3.1.2 Mesures in-situ

Comme son nom l'indique, les mesures in-situ sont des mesures optiques réalisées au sein de l'écoulement et par conséquent ne nécessitent pas de prélèvement. Ce sont généralement des méthodes récentes, très bien adaptées à la mesure des particules de suie car le pouvoir d'absorption d'une impulsion électromagnétique par ces dernières est important.

1.3.1.2.1 Mesure par extinction

Cette technique est certainement la plus simple à mettre en œuvre car elle utilise simplement une source lumineuse et un détecteur. Lorsqu'un rayonnement lumineux traverse un nuage de particules, l'énergie transmise est plus faible que l'énergie incidente. Cette diminution d'énergie est causée par la diffusion et l'absorption des particules.

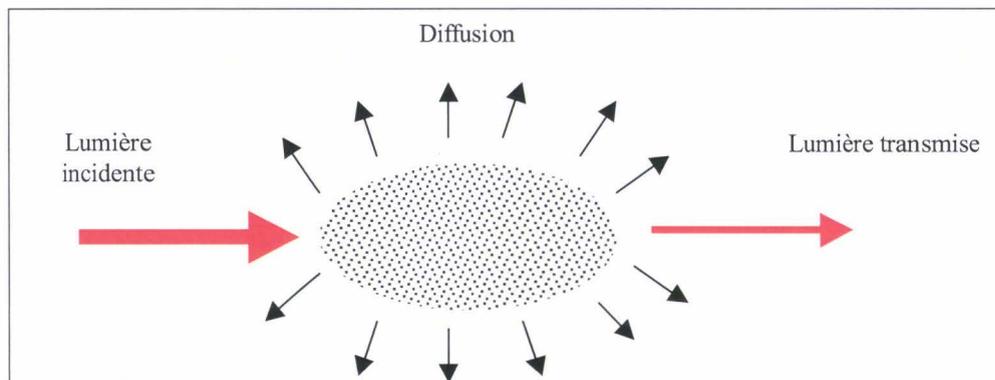


Figure 1.8 : Extinction du signal lumineux au passage d'un milieu absorbant.

Le rapport d'intensité de la source lumineuse avant et après le milieu absorbant obéit à la loi de Beer-Lambert suivant la formule :

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\int_0^L K_{ext}(l).dl \quad \text{Équation 1.8}$$

avec I_0 : intensité du signal avant le milieu absorbant,

I : intensité du signal après le milieu absorbant,

L : longueur du milieu absorbant [m],

$K_{ext}(l)$: coefficient d'extinction de l'espèce considérée [m^{-1}].

Cependant, pour des particules dont le diamètre est très inférieur à la longueur d'onde de la source lumineuse, on considère la diffusion négligeable devant l'absorption. Dans ces conditions, le coefficient d'extinction est égal au coefficient d'absorption ce qui permet d'atteindre la fraction volumique de suie f_v suivant l'équation :

$$K_{abs} = \frac{6\pi E(m)}{\lambda} f_v \quad \text{Équation 1.9}$$

Le terme $E(m)$ représente la fonction d'indice de réfraction, qui dépend de l'indice de réfraction complexe $m = n-ik$ et qui reflète les propriétés optiques des suies. Cette fonction est définie par l'équation 1.10 :

$$E(m) = -\text{Im}\left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2}\right) = \frac{6.n.k}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4.n^2.k^2} \quad \text{Équation 1.10}$$

Cette valeur est soumise à de nombreuses incertitudes car sa mesure expérimentale est difficile. Elle dépend de la nature du combustible et de la longueur d'onde. Les mesures réalisées dans des flammes de laboratoire avec des combustibles gazeux de composition bien connue montrent une certaine divergence des résultats.

Dans les études répertoriées, les mesures sont réalisées soit in situ [Coppale, 1994], [Appel, 1996], [Zhou, 1998], [Axelsson, 2001a], [Yang, 2005a], [Legros, 2006], soit ex situ [Zhu, 2000], [Choi, 1995]. Dans le dernier cas, l'incertitude doit prendre en compte la perturbation éventuelle causée par le prélèvement. [Coppale, 1994] estime l'erreur commise entre des mesures in situ et des mesures ex-situ. Cet écart dépend également de la sonde et de la perturbation engendrée dans la flamme. [Zhou, 1998] réalise les mesures in-situ dans les gaz brûlés ce qui nécessite une collection des gaz à travers une cheminée au-dessus de la

flamme mais sans perturbation de l'écoulement. [Yang, 2005] compare cette technique à des clichés obtenus par microscopie TEM pour estimer les incertitudes liées aux mesures expérimentales.

Cette technique est souvent utilisée pour quantifier les particules de suie produites pendant une combustion et sert généralement de méthode de calibration. L'atténuation du signal lumineux est une mesure intégrée le long de l'axe. Cependant sa sensibilité est assez limitée et est de l'ordre de 10^{-3} cm^{-1} . Il est possible d'augmenter la sensibilité de cette technique en réalisant de multiples passages au sein du milieu absorbant. Une variante récente est la technique basée sur la mesure du temps de déclin d'une cavité optique (CRDS).

1.3.1.2 Spectroscopie à temps de déclin de la cavité optique ou Cavity Ring Down Spectroscopy (CRDS)

La technique CRDS est très récente et très sensible. Son principe consiste à mesurer le temps de vie d'une impulsion lumineuse dans une cavité optique, composée de deux miroirs hautement réfléchissants.

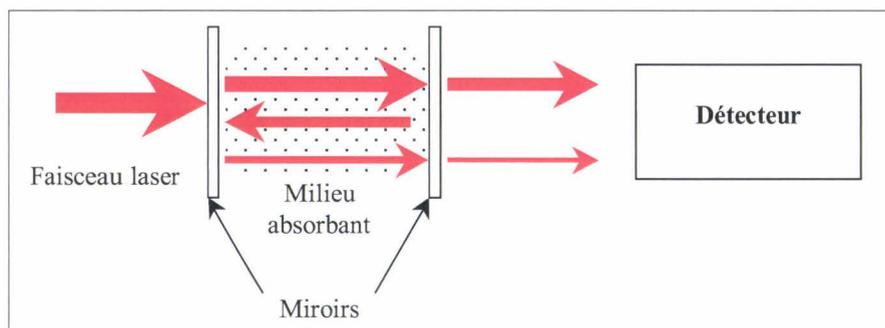


Figure 1.9 : Schéma de fonctionnement de la technique CRDS.

Le temps de vie du signal dépend des pertes associées à chaque miroir et à l'absorption dans le milieu. Un détecteur placé derrière le deuxième miroir permet de mesurer ce temps de vie τ . On peut noter que τ obéit à l'équation suivant [O'Keefe, 1988] :

$$\tau = \frac{d}{c(1-R+k(\lambda)\cdot L)} \quad \text{Équation 1.11}$$

avec d : distance entre les deux miroirs [m],

R : coefficient de réflexion des miroirs,

c : célérité de la lumière [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

$k(\lambda)$: coefficient d'absorption de l'espèce étudiée [m^{-1}],

L : longueur du milieu absorbant [m].

Cette technique est indépendante de l'intensité incidente et donc des fluctuations de l'énergie du laser. Le terme $k(\lambda)L$ représente les pertes engendrées par l'absorption de l'espèce et permet d'atteindre la fraction volumique de suie correspondante par la relation :

$$k(\lambda)L = \frac{K_e(\lambda) \cdot f_v \cdot L}{\lambda} \quad \text{Équation 1.12}$$

où $K_e(\lambda) = 6\pi E(m)$, est appelé constante d'absorption adimensionnel

Tout comme l'extinction, les mesures réalisées par CRDS sont intégrées le long de l'axe du faisceau. Cependant, la technique CRDS est beaucoup plus sensible et donc appropriée pour calibrer les mesures de suies résolues spatialement comme celles obtenues par incandescence induite par laser dans des milieux pauvres en suies. Des coefficients d'absorption de l'ordre de 10^{-8} cm^{-1} ont ainsi pu être atteints [Moreau, 2002], [Vander Wal, 1999a], [Vander Wal, 1999b].

1.3.1.2.3 L'Incandescence Induite par Laser (LII)

Le phénomène d'incandescence induite par laser a été décrit la première fois par Eckbreth en 1977. Ce n'est que sept ans après que Melton [Melton, 1984], a mis en évidence la proportionnalité entre le signal d'incandescence et la fraction volumique de suies. D'autre part, la durée du phénomène d'incandescence peut être reliée à la taille de la particule primaire. Cette technique s'est largement développée au cours de ces deux dernières décennies car c'est une technique laser non intrusive permettant d'atteindre la fraction volumique de suie dans des flammes ou des moteurs. C'est pourquoi le principe a été étudié par de nombreux auteurs pour modéliser la dépendance temporelle et énergétique du signal d'incandescence. Citons par exemple [Melton, 1984], [Shaddix, 1996], [Zizak, 2000], [Snelling, 2000a], [Moreau, 2002].

Nous décrivons dans ce chapitre, le principe fondamental de ce phénomène en précisant les équations fondamentales.

Le principe consiste à chauffer des particules de suie, présentes dans une flamme ou un écoulement gazeux, à l'aide d'un pulse laser hautement énergétique. Les particules de suie

atteignent une température proche de leur température de sublimation (≈ 4000 K) et se refroidissent suivant trois modes de transferts thermiques (Figure 1.10) :

- ✓ la sublimation,
- ✓ la conduction,
- ✓ le rayonnement.

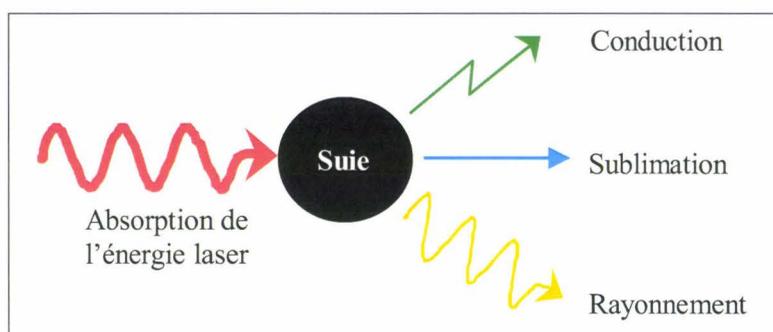


Figure 1.10 : Refroidissement d'une particule de suie suivant trois modes de transfert thermique : conduction, sublimation et rayonnement.

Le signal d'incandescence mesuré par un capteur optique correspond au transfert thermique par rayonnement. C'est un signal qui dure plusieurs centaines de nano-secondes, variable suivant la température du milieu ambiant, la température atteinte par les particules au moment de l'excitation laser, la taille et les propriétés optiques des particules de suie.

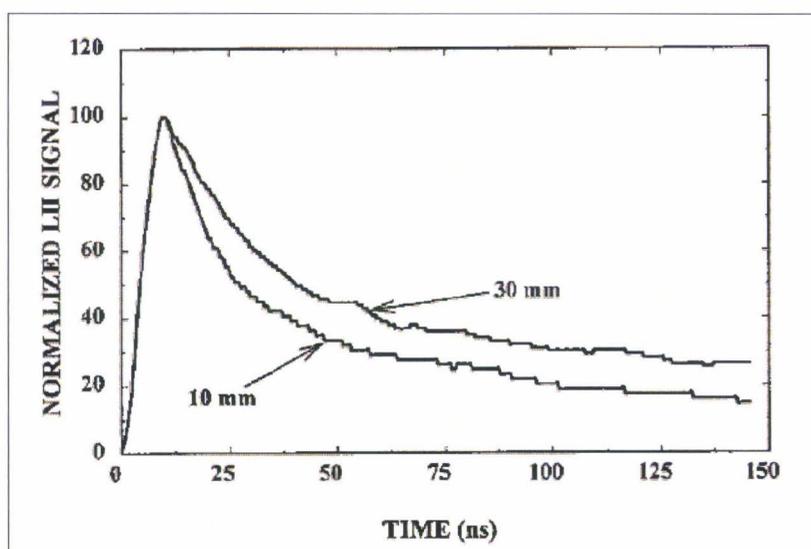


Figure 1.11 : Exemple de signal temporel enregistré par un photo-détecteur dans une flamme d'éthylène à deux hauteurs différentes au-dessus du brûleur [Ni, 1995].

La Figure 1.11 montre l'évolution temporelle d'un signal LII obtenu dans une flamme d'éthylène à différentes hauteurs au-dessus du brûleur [Ni, 1995]. Il y a d'abord une croissance très rapide du signal au moment du pulse laser correspondant à l'augmentation de la température des particules de suie, puis une décroissance du signal correspondant au refroidissement des particules. Plus les particules primaires ont un grand diamètre, plus le refroidissement est long.

De nombreux auteurs ont également développé leur code de calcul pour modéliser le phénomène LII afin de prédire le signal et la taille des particules primaires suivant leurs conditions expérimentales. Une synthèse récente est disponible dans [Schulz, 2006]. [Melton, 1984] a mis en évidence avec son modèle, que l'intensité du pic LII était proportionnelle à D^x avec $x=3+\frac{0.154}{\lambda_{\text{dét}}}$, D le diamètre de la particule primaire et $\lambda_{\text{dét}}$ la longueur d'onde de détection en micromètre.

1.3.1.2.3.1 Expression du rayonnement

Le rayonnement émis par une particule de suie préalablement chauffée par un rayonnement laser incident se simplifie en considérant le diamètre d_p de la particule très petit devant la longueur d'onde incidente λ_{ex} ($\frac{\pi d_p}{\lambda_{\text{ex}}} \ll 1$). On se place alors dans le régime de Rayleigh et on définit le coefficient d'absorption [m^2] de la particule de suie par :

$$C_{\text{abs}} = \pi^2 d_p^3 \frac{E(m, \lambda_{\text{ex}})}{\lambda_{\text{ex}}} \quad \text{Équation 1.13}$$

L'énergie perdue par rayonnement (à $\lambda_{\text{dét}}$) par une particule de suie de diamètre d_p s'exprime à partir de la loi de Planck modifiée par l'émissivité $\epsilon_{\lambda_{\text{dét}}}$ (afin de prendre en compte le fait que la particule de suie n'est pas un corps noir parfait) [Michelson, 2003]. Soit :

$$P(t, \lambda_{\text{dét}}) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda_{\text{dét}}^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{\text{dét}} kT(t)} - 1\right) \right]^{-1} \pi d_p(t)^2 \cdot \epsilon_{\lambda_{\text{dét}}} \quad \text{Équation 1.14}$$

Avec : c : célérité de la lumière ($2,9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$),

h : constante de Planck ($6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$),

k : constante de Boltzmann ($1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),

$T(t)$: température de la particule à l'instant t [K].

L'émissivité $\epsilon_{\lambda_{dét}}$ est reliée à la section efficace d'absorption par :

$$\epsilon_{\lambda_{dét}} = \frac{4C_{abs}}{\pi d_p^2} = \frac{4\pi d_p E(m)}{\lambda_{dét}} \quad \text{Équation 1.15}$$

On en déduit que l'intensité de l'incandescence en provenance d'un milieu contenant N_p particules par unité de volume s'exprime à partir des équations 1.14 et 1.15 par :

$$I(t, \lambda_{dét}) = P(t, \lambda_{dét}) \cdot N_p C \quad \text{Équation 1.16}$$

où C prend en compte l'efficacité de collection du dispositif. Soit :

$$\begin{aligned} I(t, \lambda_{dét}) &= C \frac{2\pi hc^2}{\lambda_{dét}^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét} kT(t)}\right) - 1 \right]^{-1} \cdot 4\pi r_p^2 \cdot \frac{8\pi r_p E(m)}{\lambda_{dét}} \cdot N_p \\ &= \frac{C'}{\lambda_{dét}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét} kT(t)}\right) - 1 \right]^{-1} \frac{4}{3} \pi r(t)^3 N_p E(m) \end{aligned} \quad \text{Équation 1.17}$$

où le terme $N_p \frac{4}{3} \pi r_p(t)^3$ représente la fraction volumique de suies f_v (r_p : rayon de la particule).

La représentation des courbes de Planck montre que l'émittance monochromatique d'un corps dépend fortement de sa température (Figure 1.12). Le signal LII émis par les particules de suie est donc directement influencé par la température atteinte par les particules. La température maximale qu'atteignent les particules de suie à pression atmosphérique est proche de la température de sublimation du graphite, soit 3915 K.

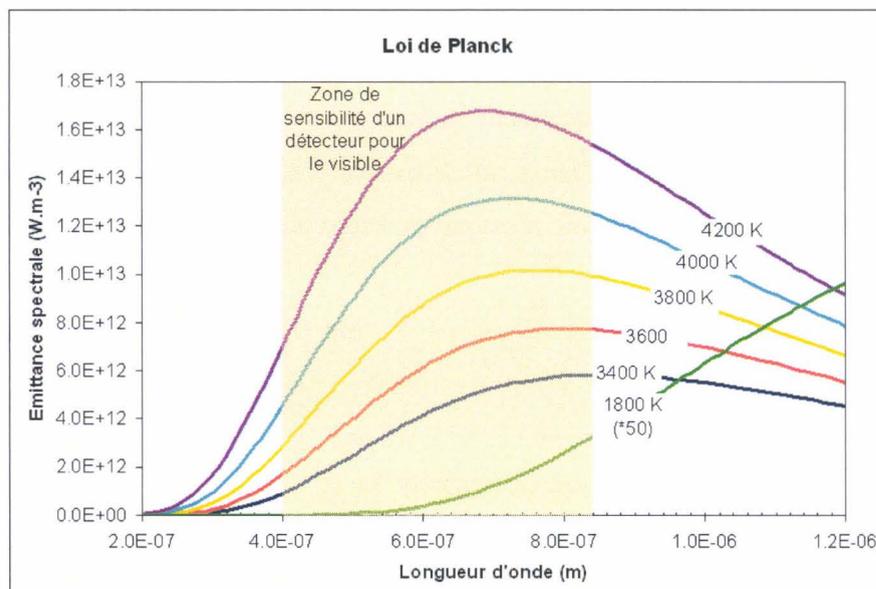


Figure 1.12 : Représentation graphique de la loi de Planck pour différentes températures.

Ces courbes montrent que le rayonnement des particules de suie, donc le signal LII, est fonction de la température atteinte par ces dernières après l'excitation laser ; plus la température atteinte par les particules de suie sera importante, plus le signal LII sera intense. Par ailleurs, la plage de longueur d'onde d'un détecteur pour le visible permet de détecter l'incandescence des particules de suie irradiées par le laser.

1.3.1.2.3.2 Longueur d'onde d'excitation

Le signal d'incandescence peut être généré sur une gamme assez large de longueurs d'onde à condition que les particules de suie absorbent suffisamment le rayonnement. Un laser Nd³⁺/YAG pulsé est généralement utilisé pour exciter les particules de suie. Il est utilisé soit à sa longueur d'onde fondamentale (1064 nm) soit à sa première harmonique (532 nm). La durée du pulse est de l'ordre de 10 ns et le flux d'énergie s'étend sur une plage d'environ 0.1 J.cm⁻² [Snelling, 2004] à plus de 1 J.cm⁻². La Figure 1.13 [Cignoli, 2005] et montre l'évolution du signal LII en fonction du flux d'énergie pour un faisceau laser dont la distribution spatiale d'énergie est gaussienne.

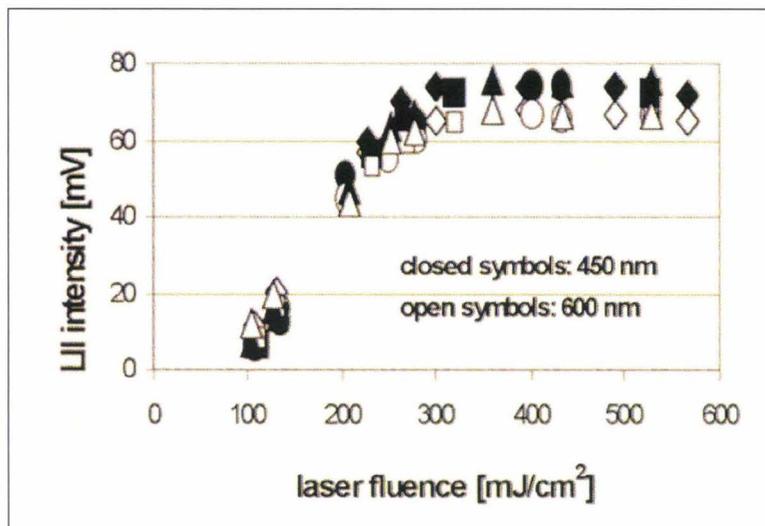


Figure 1.13 : Evolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie laser [Cignoli, 2005].

Le signal LII augmente pour des densités d'énergie comprises entre environ 0.1 J.cm⁻² à 0.3 J.cm⁻², puis atteint une intensité constante appelée plateau. [Vander Wal, 1998] observe que le signal LII atteint le plateau entre 0.2 J.cm⁻² et 0.4 J.cm⁻². L'utilisation de courtes longueurs d'ondes (par exemple 532 nm avec un laser Nd³⁺/YAG) entraîne l'apparition de signaux interférents tels que la fluorescence des HAP. C'est pourquoi l'utilisation un laser

Nd³⁺/YAG à sa longueur d'onde fondamentale est préconisée pour s'affranchir de ces perturbations.

1.3.1.2.3.3 Longueur d'onde de détection

Comme le montrent les courbes d'émittance d'un corps noir (Figure 1.12), la détection du signal LII peut se faire sur une plage de longueur d'onde assez large. Les photo-détecteurs généralement utilisés (caméra CCD intensifiée ou tube photomultiplicateur) ont une bonne réponse spectrale dans le visible. La Figure 1.14 montre le spectre d'émission des particules de suie obtenues dans une flamme de méthane à 532 nm sous forte énergie laser incidente [Moreau, 2002].

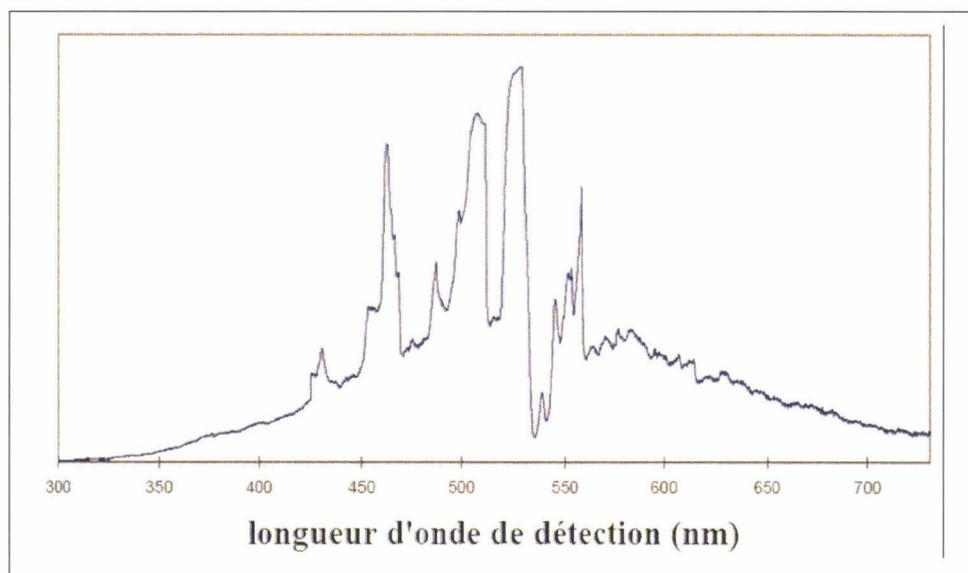


Figure 1.14 : Spectre du signal LII réalisé à une longueur d'onde d'excitation $\lambda_{\text{ext}} = 532 \text{ nm}$ [Moreau, 2002]. Les pics correspondent à l'émission des bandes de Swan de C_2 et l'absence de signal vers 532 nm est dû à l'utilisation d'un filtre négatif centré à 532 nm.

Les plages des longueurs d'ondes de détection vont être choisies en fonction des interférences ; les pics enregistrés dans le spectre d'émission correspondent aux bandes de Swan de C_2 (région comprise entre 420 nm et 620 nm). Par ailleurs, le signal LII enregistré dans une flamme sera plutôt enregistré dans l'UV-visible car moins sensible à l'émission propre de la flamme avec néanmoins une baisse rapide de l'émittance spectrale sur cette plage de longueur d'onde (Figure 1.12). En revanche, le signal LII sera plutôt enregistré dans le visible proche infrarouge pour des mesures réalisées dans les gaz brûlés pour favoriser l'émission propre des particules de suie à haute température [Santoro, 2002].

1.3.1.2.4 Conclusion

La technique LII est aujourd'hui utilisée et étudiée par de nombreux laboratoires pour la quantification des particules de suie, car c'est une technique très sensible dont l'intensité du signal est proportionnelle à la fraction volumique carbonée des particules. Les techniques d'absorption, extinction et CRDS, sont souvent utilisées comme techniques de calibration pour la technique LII. L'inconvénient de ces méthodes est la mauvaise connaissance de la fonction d'indice de réfraction qui engendre une grande incertitude.

1.3.1.3 Conclusion sur les méthodes de mesure

Comme nous l'avons déjà indiqué, ce sont les méthodes de prélèvement qui sont actuellement utilisées pour la certification des moteurs automobiles et aéronautiques. Cependant ces techniques, développées avant les années 70, manquent de sensibilité devant les progrès accomplis en terme d'émission par les moteurs actuels. Les normes, de plus en plus draconiennes, nécessitent des techniques de mesure plus sensibles, apportées par les mesures in-situ. L'incandescence induite par laser semble l'outil le mieux adapté, car le signal émis par les particules ne provient que de la partie carbonée et est proportionnel à sa fraction volumique. Des systèmes permettant la quantification des particules de suie existent déjà sur le marché et nous décrivons les principaux dans la prochaine section.

1.3.2 Dispositifs commerciaux

Nous présentons dans cette section quatre appareils commercialisés qui permettent la quantification des particules de suie. Les deux premiers, le SMPS et l'ELPI, ont été conçus pour accéder à la granulométrie des agrégats, mais permettent néanmoins de remonter à la fraction volumique. Les deux autres appareils utilisent l'incandescence induite par laser comme méthode de quantification. Le premier (système Artium) est destiné à l'industrie automobile alors que le deuxième (système Metrolaser) est destiné à l'industrie aéronautique.

1.3.2.1 Le SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)

Cette méthode est basée sur l'analyse de la mobilité électrique des particules. Les appareils commerciaux permettent de caractériser les particules dont le diamètre aérodynamique varie de quelques nanomètres à plusieurs micromètres. La Figure 1.15 montre

le principe de fonctionnement. Le principe consiste à charger des particules, dont la distribution en taille est poly-disperse, avec une source radioactive. Cet échantillon est ensuite envoyé dans un classificateur, constitué de deux cylindres. Une tension différente est appliquée à chaque cylindre pour créer un champ électrique. Suivant cette différence de potentiel, les particules sont déviées en fonction de leur mobilité électrique et correspondent à une distribution mono-disperse. Elles sont ensuite envoyées vers un capteur optique appelé CNC (Condensation Nuclei Counter). Le CNC sèche puis sature l'écoulement en vapeur d'alcool (généralement du butanol). En se refroidissant dans un condenseur, les vapeurs d'alcool se condensent sur les particules formant des gouttelettes de l'ordre de 10 µm. Le comptage s'effectue en analysant la lumière diffusée par les gouttelettes.

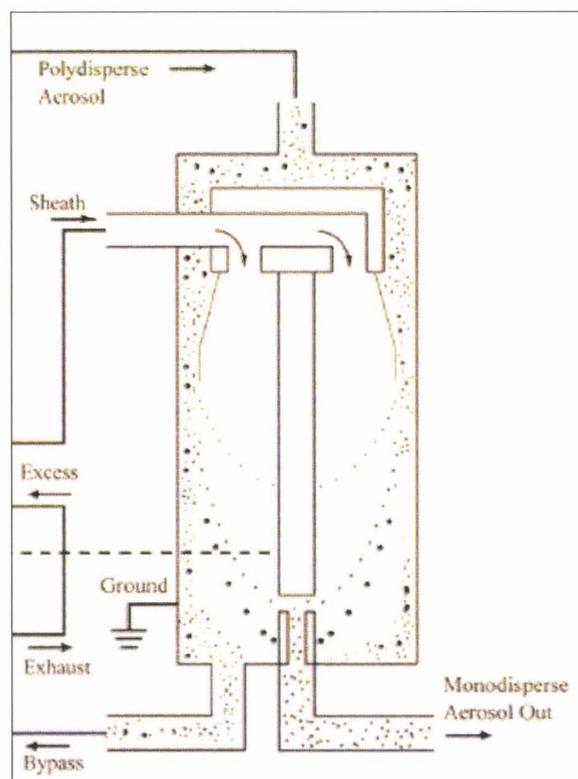


Figure 1.15 : Schéma de fonctionnement du spectromètre SMPS modèle 3936 de TSI.

Ce système permet de mesurer des particules dont le diamètre varie de 2.5 nm à 1000 nm et dont la sensibilité permet de mesurer de 1 à 10^8 particules par cm^3 . Cependant, comme tous les dispositifs nécessitant l'introduction d'une sonde de prélèvement dans les gaz de combustion, les phénomènes de coagulation et la déposition des particules sur les parois perturbent les mesures, mais une importante dilution des échantillons prélevés limite ces phénomènes. [Zhao, 2003], dans une flamme plate laminaire pré-mélangée d'éthylène,

détermine ce facteur de dilution à environ 10^4 . [Dreher, 2002] utilise cette technique pour corrélérer les paramètres géométriques de particules de suie à l'émission d'un moteur diesel.

1.3.2.2 ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)

Les appareils ELPI mesurent des particules dont le diamètre varie de quelques nanomètres à plusieurs micromètres. La Figure 1.16 montre le principe de fonctionnement d'un appareil. L'échantillon à analyser est envoyé dans un chargeur à effet couronne pour lui imposer une loi globale de charge. Les particules chargées passent ensuite dans un impacteur basse pression constitué d'étages de collection isolés. Chaque étage est relié à un électromètre qui mesure le courant induit par les particules. Le courant est ensuite converti en une distribution de taille (diamètre aérodynamique) en fonction des caractéristiques du chargeur et des étages de l'impacteur. Chaque étage a une sensibilité de détection propre en fonction de la taille des particules collectées.

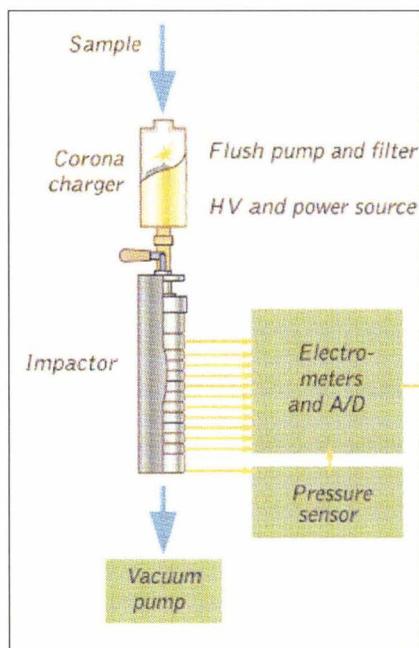


Figure 1.16 : Schéma de fonctionnement d'un système ELPI.

L'ELPI est un système de plus en plus utilisé principalement dans l'industrie automobile. Les études référencées par [Van Gulijk, 2002] montrent une certaine restriction à la détermination du nombre et de la taille des particules dans des conditions standards due à une surcharge de l'impacteur. En utilisant un impacteur poreux, il montre une meilleure reproductibilité des mesures, ce qui laisse apparaître que les particules de suie produites par les moteurs diesel sont constituées d'une phase liquide. Par ailleurs, l'étude menée par [Ouf,

2006] montre que la dimension fractale d'un agrégat de suie est un paramètre important. La détermination de la masse volumique d'un agrégat prend bien en compte la dimension fractale ce qui permet d'estimer une distribution en masse à partir d'une distribution en nombre. [Maricq, 2004] utilise ce dispositif pour déterminer la dimension fractale d'un agrégat issu de la combustion dans une flamme et dans un moteur diesel ainsi que la masse volumique effective (masse par unité de volume mobile). La dimension fractale est un peu plus grande dans un moteur diesel ($d_f = 2,3$) que dans une flamme ($d_f = 2,1$) ce qui indique que la forme d'un agrégat de suies est plus compacte dans un moteur diesel. La masse volumique effective mesurée varie d'environ $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ pour des agrégats de 30 nm à moins de $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$ pour des agrégat de 300 nm.

1.3.2.3 Système LII Artium

Des dispositifs utilisant le principe d'Incandescence Induite par Laser ont également vu le jour ces dernières années. Le premier a été développé par Artium Technologies en collaboration avec le NRCC (National Research Council Canada) et Sandia National Laboratories. Le système est compact et transportable et permet de mesurer la concentration massique et volumique, le nombre et la taille moyenne des particules primaires à l'échappement des moteurs diesel. Les particules sont chauffées par un faisceau laser à 1064 nm avec un profil spatial homogène. La densité d'énergie est relativement faible (environ $0,1 \text{ J.cm}^{-2}$). La détection du signal s'effectue à angle droit à deux longueurs d'onde différentes. Ceci permet d'utiliser le principe d'auto-calibrage en utilisant la méthode de pyrométrie à deux couleurs [Bachalo, 2002].

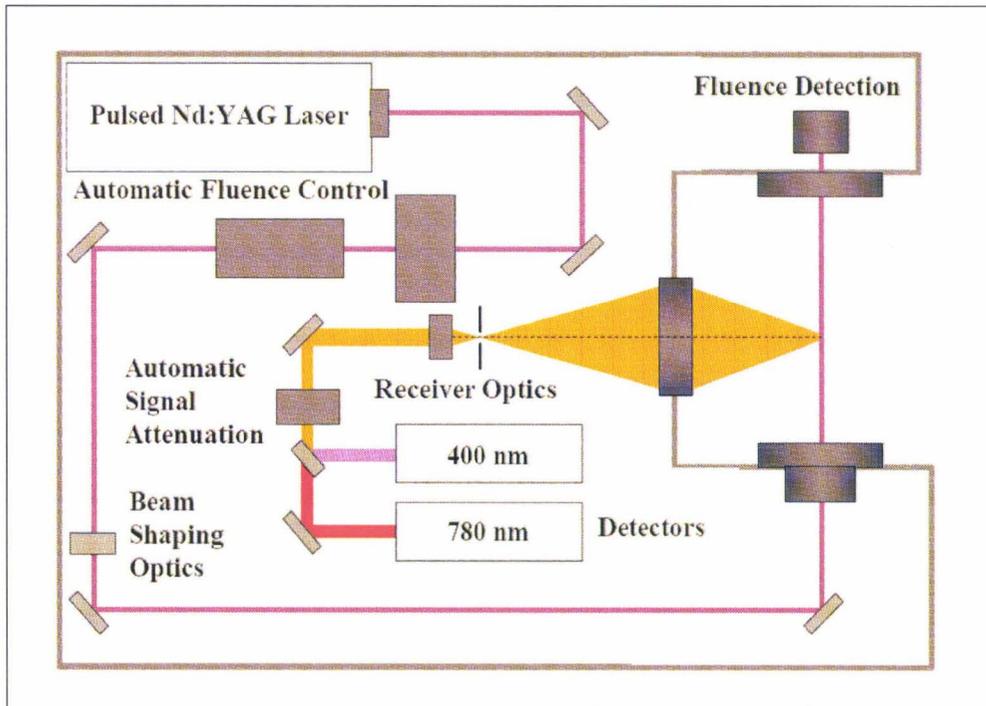


Figure 1.17 : Principe de fonctionnement du système Artium Technologies.

La mesure de la fraction volumique a été comparée à une méthode d’extinction pour valider le dispositif [Witze, 2003]. Des mesures ont ensuite été réalisées sur route pour valider le système commercial². Les résultats montrent une très bonne sensibilité de cet appareil (10 à 11 ppb de particules de suie sont émises pendant la phase d’arrêt du véhicule et seulement 8.4 ppb émis pendant une diminution du régime moteur). Des développements récents avec des détecteurs plus sensibles permettent d’atteindre une limite de détection de 0,1 ppt.

1.3.2.4 Système LII Metrolaser

Le dispositif commercialisé par MetroLaser, Inc est l’aboutissement du travail de [Jenkins, 2002]. Le système permet de réaliser des mesures à l’échappement des turbines aéronautiques (Figure 1.18). Un laser YAG émet une radiation à 1064 nm à une fréquence de 10 Hz pour chauffer les particules de suie. Le signal LII est détecté avec un angle de 9° entre l’axe du faisceau laser et l’axe de collection du signal dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser.

² www.artium.com/products/lii/onroadresults

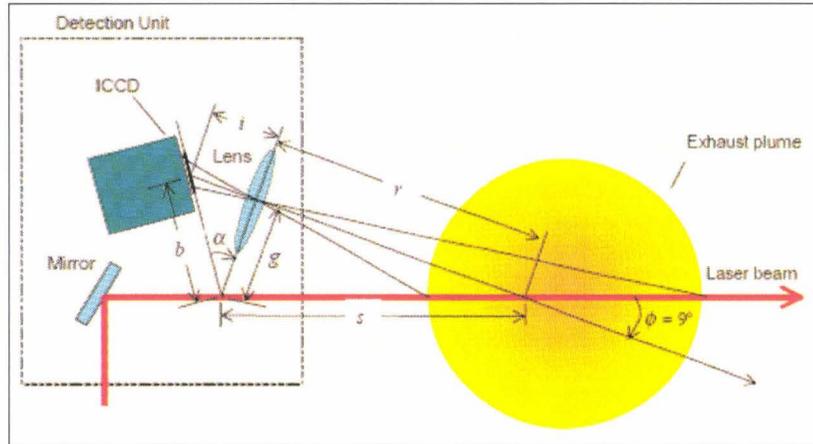


Figure 1.18 : Géométrie de la collection du signal LII avec le système MetroLaser.

Le système a été calibré en comparant le signal LII avec une concentration massique connue d'un aérosol constitué de carbone noir. Les mesures réalisées montrent une bonne sensibilité du dispositif en fonction des différents régimes moteur. De même que pour des méthodes d'extinction, le calibrage suppose une valeur connue de la fonction d'indice $E(m)$.

1.3.2.5 Conclusion

La technique LII semble être la technique la plus adaptée pour quantifier les particules de suie à l'échappement des moteurs ou dans les flammes car c'est une technique très sensible, simple à mettre en œuvre (non-intrusive) représentative de la partie carbonée des particules. Seuls deux dispositifs existent actuellement sur le marché : un pour les mesures à l'échappement des moteurs diesel et un pour les mesures aéronautiques, mais il semble que peu de systèmes aient été commercialisés. L'erreur généralement commise sur les mesures provient principalement d'une mauvaise connaissance des propriétés optiques des particules en fonction de la longueur d'onde et de leur nature (type de combustible utilisé). Le tableau suivant résume les différentes techniques et les différents appareils de mesure des particules. Seules les mesures LII permettent de mesurer spécifiquement les particules de suie, les autres techniques mesurent les particules appelées PM.

Techniques de mesure	Pesée	Impactage	Optiques	
Type de mesure	Ex-situ par prélèvement			In-situ
Méthodes	TEOM, QCM, Gravimétrie, Pycnométrie	SMPS, ELPI	Extinction/ Diffusion, Transmittance, Réflectance, MAAP	Extinction/ Diffusion, CRDS, LII

Tableau 1.1 : résumé des techniques de mesure et de leur zone de mesure.

Dans la section suivante, nous allons répertorier les études comparant l'incandescence induite par laser aux autres techniques.

1.3.3 Comparaison des techniques

Les mesures d'incandescence induite par laser ont été comparées à d'autres techniques pour étudier la validité des résultats ainsi que pour calibrer les signaux LII. La technique optique la plus utilisée pour calibrer un dispositif LII est la mesure par extinction. [Appel, 1996] utilise cette technique dans des flammes laminaires d'éthène/argon/oxygène de différentes richesses pour des concentrations de suies différentes et à une pression sub-atmosphérique ($1,2 \cdot 10^4$ Pa), afin d'élargir la zone réactionnelle et donc d'augmenter la résolution spatiale des mesures. La mesure par extinction laser a été réalisée avec un laser argon à 488 nm et l'atténuation du laser est mesurée avec un photomultiplicateur. Le signal d'incandescence est généré par un laser Nd³⁺/YAG à 532 nm et le signal est collecté avec une caméra CCD intensifiée placée à angle droit et avec une détection temporelle décalée d'environ 90 ns par rapport au pulse laser pour éviter l'enregistrement de la fluorescence des HAP et la diffusion des molécules de C₂. Les profils expérimentaux LII correspondent aux résultats par extinction aux trois richesses testées, mais les études théoriques de modélisation du signal LII affichent une différence d'un facteur 2. La variation des propriétés radiatives des particules de suie ne permet pas d'expliquer totalement cette différence. Seule la prise en compte de la forme de l'agrégat a permis d'obtenir des valeurs proches des résultats expérimentaux.

[Vander Wal, 1996] calibre son système LII en utilisant la gravimétrie. L'avantage de cette calibration est qu'elle est indépendante des propriétés optiques des suies, de la diffusion

et de l'absorption des HAP. Mais elle nécessite de connaître la masse volumique des suies et de mesurer précisément la masse de suies collectée sur le filtre. Cette technique a été comparée aux résultats LII en utilisant un laser Nd³⁺/YAG à 1064 nm sous forme d'un faisceau de 3 mm de diamètre ou sous forme d'une nappe laser. Le signal est enregistré par une caméra CCD intensifiée dans une flamme turbulente d'acétylène/air. Des variations importantes de la fraction volumique de suies sont observées en tir à tir, mais convergent vers une valeur stable en moyennant sur 30 tirs. Cette étude a ainsi permis de calibrer un système LII par une méthode non sensible aux propriétés optiques des suies (paramètre important dans la calibration par des méthodes optiques car responsable d'une grande partie des incertitudes). [Choi, 1995] dans son étude comparant la fraction volumique d'une flamme laminaire d'acétylène obtenue par gravimétrie et par extinction, détermine le coefficient d'extinction adimensionnel à une longueur d'onde de 632,8 nm ($K_e = 8,6$), duquel il déduit une fonction d'indice optique $E(m)$ égale à 0,45 ($K_e = 6\pi E(m)$), quelle que soit la nature du combustible et la longueur d'onde entre le visible et le proche infra-rouge.

[Krüger, 2005] utilise la méthode SMPS pour déterminer la répartition des tailles des particules de suie, puis la compare avec la décroissance du signal LII enregistré par un photomultiplicateur. La grande différence de ces deux techniques est que la décroissance temporelle du signal LII permet de déterminer le diamètre des particules primaires constituant l'agrégat, alors que le SMPS mesure le diamètre aérodynamique de l'agrégat. Cependant, une étude réalisée par [Kock, 2003] a montré la bonne correspondance entre les mesures SMPS et LII dans un moteur diesel. Cette étude a néanmoins montré une différence dans la forme de l'agrégat avant et après la radiation par le pulse laser. [Yang, 2005] combine les prélèvements thermophorétiques aux analyses par microscopie TEM pour déterminer la fraction volumique dans des flammes turbulentes non-prémélangées d'éthylène et d'acétylène. Des mesures par extinction ont été confrontées pour déterminer l'incertitude d'une mesure optique. [Axelson, 2001b] a également comparé les mesures SMPS aux mesures LII dans un moteur diesel. Son investigation a mis en évidence une bonne correspondance de la fraction volumique obtenue par ces deux méthodes, mais le SMPS manque de temps de réponse, ce qui le rend inadapté à la mesure pendant les phases de transition d'un moteur.

La technique originale par LII mise au point par [Snelling, 2005] et utilisée par Artium (cf. chapitre 1.3.2.3), permet de réaliser des mesures quantitatives de particules de suie sans calibrage avec une source connue de suies. Ce dispositif de mesure a été comparé avec succès à la méthode d'extinction dans une flamme laminaire d'acétylène. Mais cette technique

nécessite de connaître les propriétés optiques des suies aux deux longueurs d'onde utilisées et de connaître parfaitement la température maximale des suies pendant le phénomène LII.

1.4 Les applications

L'étude des processus de formation des suies a fait l'objet de nombreuses études expérimentales et par modélisation. Quelques articles de références font le point sur les aspects fondamentaux de ces processus dans les flammes laminaires ou turbulentes. Parallèlement à ces études fondamentales, l'imposition de normes de plus en plus restrictives contraint les motoristes et les industriels à limiter leurs émissions polluantes. La plupart des groupes motoristes ont ainsi favorisé l'émergence de recherches appliquées dans le but de mieux maîtriser la formation des polluants dans les moteurs. Des moteurs transparents, modifiés de manière à permettre l'implantation de diagnostic optiques dans la chambre de combustion, ont été développés depuis plus de deux décennies. On peut accéder ainsi à des informations spatiales sur la distribution des polluants (par exemple les suies) au cours des cycles moteurs. En ce qui concerne les turbines aéronautiques, la difficulté d'accès à la chambre de combustion associée au coût des essais limite aujourd'hui les applications. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la mesure des particules de suie produites par des moteurs automobiles ou aéronautiques, ces derniers faisant l'objet de la thèse.

1.4.1 Mesures dans les moteurs diesel

De nombreuses études sont réalisées pour caractériser les particules de suie issues de la combustion dans les moteurs diesel, car l'apparition de l'injection à très haute pression dans les cylindres (jusqu'à 1500 bar) a permis d'améliorer les performances en terme de consommation mais également en terme d'émissions polluantes. Il est nécessaire de différencier deux types de configurations : les mesures réalisées dans les cylindres des moteurs et les mesures réalisées à l'échappement des moteurs.

Les mesures LII réalisées dans une chambre de combustion de moteur diesel nécessitent des modifications importantes pour permettre le passage du faisceau laser et l'acquisition du signal [Bougie, 2006], [Boiarciuc, 2006], [Schraml, 2000]. Le signal LII est enregistré soit par une caméra ICCD pour visualiser les inhomogénéités de distribution des suies dans la chambre de combustion, soit par un photomultiplicateur pour mesurer la décroissance temporelle du signal LII afin de déterminer la taille des particules primaires. Le

problème majeur rencontré lors des mesures est le dépôt des gaz d'échappement et des particules sur les hublots, diminuant l'intensité du faisceau laser, et donc la température atteinte par les particules de suie et le signal LII enregistré. La Figure 1.19 montre une coupe d'un moteur transparent modifié de manière à mettre en œuvre des diagnostics laser. Le faisceau laser traverse la chambre de combustion par les hublots supérieurs et le signal LII est collecté à angle droit à travers un piston transparent et un miroir disposé à 45°. Les images de la distribution spatiale des particules de suie sont enregistrées par une caméra ICCD en fonction de l'angle du vilebrequin [Schraml, 2000].

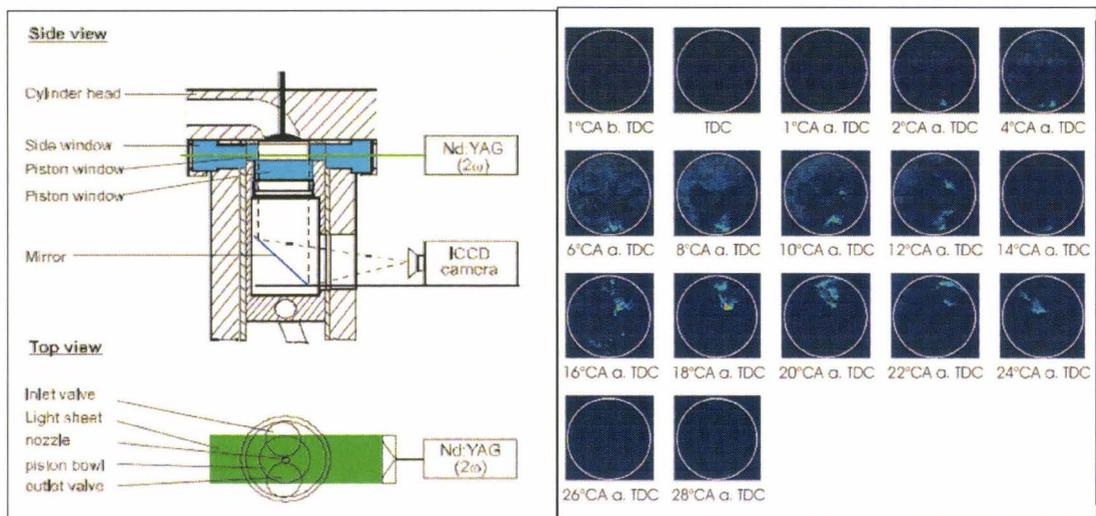


Figure 1.19 : Exemple de modification du système de mesure dans un cylindre et images obtenues en fonction de l'angle du vilebrequin [Schraml, 2000].

[Kock, 2003], [Boiarciuc, 2006] et [Bougie, 2007] utilisent un photomultiplicateur pour déterminer la taille des particules primaires de suies à partir de la décroissance du signal LII. Les mesures réalisées par [Bougie, 2007] sont réalisées dans la chambre de combustion à pression élevée ce qui conduit à une décroissance temporelle du signal plus rapide que pour des durées de vie à pression atmosphérique. [Kock, 2003] détermine le diamètre moyen des particules primaires pour différents angles du vilebrequin et pour différentes charges du moteur puis compare avec succès les résultats obtenus par SMPS. [Boiarciuc, 2006] utilise une détection à deux couleurs pour déterminer la taille des particules primaires et la fraction volumique en se basant sur les travaux de [Snelling, 2005].

Les mesures LII réalisées dans les gaz d'échappement peuvent être effectuées soit dans la ligne d'échappement du moteur, soit par extraction. [Witze, 2003] compare les signaux LII en fonction de la charge du moteur et au cours du temps, obtenus in-situ et ex-situ

en utilisant le système commercial Artium LII 200. Les mesures in-situ sont réalisées dans une cellule placée sur la ligne d'échappement avant le silencieux et à la sortie d'échappement tandis que les mesures ex-situ sont réalisées à trois endroits différents : à la sortie du turbo, à l'entrée et à la sortie du silencieux. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas de variations significatives de la concentration massique des suies le long de la ligne d'échappement et que les pertes entre les mesures in-situ et ex-situ sont négligeables. Le système a ensuite été testé en conditions réelles³, [Bachalo, 2002] et les résultats montrent une relation entre la production de suie et le régime moteur. Pour chaque augmentation de puissance, un pic du signal LII est enregistré traduisant la quantité de suies produite. Ce dispositif commercialisé nécessite la connaissance de la température de la suie atteinte après le pulse laser. Cette température est déterminée par la pyrométrie bichromatique. Le principe est décrit par [Zhao, 1998]. [Snelling, 2000] utilise également la pyrométrie à deux couleurs pour déterminer la température des particules de suie, et pour déterminer également la fraction volumique des suies à l'émission des moteurs diesel. Dans son étude, il utilise trois longueurs d'ondes de détection (400 nm, 550 nm et 780 nm) pour augmenter la précision des mesures. La comparaison des résultats avec des mesures d'extinction dans une flamme laminaire montre une bonne corrélation, validant ainsi cette méthode de mesure. Notons que la température des particules de suie après le pulse laser peut atteindre 4400-4500 K. [Cignoli, 2005], dans une flamme de diffusion d'éthylène, mesure la température maximale atteinte par les particules de suie autour de 4050 K. [Lapuerta, 2005] utilise la technique d'opacimétrie et la technique d'extinction pour quantifier les suies émises par un moteur diesel en fonction du rapport air/combustible, de la vitesse moteur et de l'EGR (Exhaust gas recirculation). Les résultats sont exprimés en valeurs comprises entre 0 et 100 et indiquent que les différents paramètres de fonctionnement du moteur ont les mêmes effets sur les mesures d'opacimétrie et d'extinction.

D'autres études se sont intéressées aux propriétés thermo-physiques des particules primaires et des agrégats de suies. [Park, 2003] montre à travers des images obtenues par microscopie (TEM) que les particules sont plus agglomérées lorsque la taille augmente et que la masse volumique et la dimension fractale augmentent lorsque la charge du moteur diminue. Ce phénomène s'explique par le fait que les agrégats sont composés d'une partie plus importante de phase liquide (combustible condensé et de gouttelettes d'huile). Ce résultat est également observé par [Maricq, 2004] en couplant un classificateur électrostatique

³ <http://www.artium.com/products/lii/onroadresults>

(Differential Mobility Analyser DMA) et un ELPI. Les mesures montrent que la masse volumique effective d'un agrégat passe d'environ $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$ à 50 nm, à $0,3 \text{ g.cm}^{-3}$ à 300 nm, et que la dimension fractale augmente lorsque la charge du moteur diminue. Il compare également la dimension fractale obtenue dans une flamme riche pré-mélangée d'acétylène ($d_f = 2,15$) et celle obtenue dans un moteur diesel ($d_f = 2,3$) et note une différence de 10% ce qui indique que les agrégats formés dans un moteur sont plus compacts. En supposant une masse volumique de 2 g.cm^{-3} pour les particules primaires, il détermine leur diamètre entre 10 nm et 25 nm. [Heimgartner, 2001] en étudiant la décroissance temporelle des signaux LII, détermine que le diamètre des particules primaires formées dans un cylindre varie de 24 nm à 29 nm, mais ces valeurs augmentent si la pression d'injection diminue. [Bougie, 2006] et [Bougie, 2007], en travaillant à haute pression (entre 10 et 60 bar), montre que la décroissance du signal LII est plus rapide lorsque la pression augmente. Cette décroissance plus rapide traduit un refroidissement plus rapide des particules de suie dû à un refroidissement plus important par conduction. A partir de la décroissance temporelle des signaux LII et des équations de conduction, il détermine le diamètre des particules primaires entre 26 nm et 80 nm suivant la charge du moteur et la position angulaire du vilebrequin. [Hofmann, 2005] modélise la décroissance du signal LII provenant de suies issues de la combustion d'une flamme plate laminaire pré-mélangée d'éthylène pour des pressions variant de 1 à 5 bar. Son modèle prend également en compte l'effet de la pression dans le terme de conduction de la chaleur et une bonne corrélation est trouvée avec les résultats expérimentaux. Il montre ainsi que lorsque la pression augmente, la décroissance du signal LII est plus rapide et le diamètre des particules primaires plus petit. Une analyse TEM de particules diesel a été réalisée pour évaluer la correspondance avec les mesures de mobilité électrique d'un SMPS [Dreher, 2002]. Les résultats SMPS montrent une distribution centrée à 80 nm (diamètre aérodynamique des agrégats). L'analyse TEM décrit des agrégats de suie dont le diamètre est compris entre 20 et 200 nm constitués de particules primaires de 20 à 30 nm de diamètre, ce qui est en accord avec les mesures SMPS. Par ailleurs, cette analyse TEM permet de déterminer que la forme de l'agrégat correspond à un cylindre de diamètre D_p (diamètre de mobilité électrique) et de longueur $2D_p$. [Ouf, 2006] met en évidence les erreurs engendrées sur les mesures par impactage (SMPS et ELPI). Il est nécessaire de procéder à une première sélection en fixant un diamètre de coupure, pour éviter que les plus grosses particules ne se chargent de plusieurs charges électriques. Cependant les dispositifs commerciaux rendent bien compte de la taille des agrégats et de leur dimension fractale.

Pour conclure sur la caractérisation des particules de suie diesel, soulignons que leur composition est difficile à connaître étant donné que le diesel est un combustible composé de n-décane, de composés aromatiques, soufrés et autres espèces variant suivant le raffinage. Le travail de [Douce, 2001] s'est intéressé à la composition des suies en fonction de la composition du carburant et des conditions de combustion (température, pression, richesse des mélanges). Le diesel étant un carburant de composition chimique très complexe, l'étude a porté sur l'analyse de cinq hydrocarbures représentatifs. Les résultats obtenus par microscopie électronique (TEM) indiquent que les particules primaires sont globalement sphériques et homogènes en taille (diamètre compris entre 13 et 32 nm). Cette taille diminue quand la température augmente ou lorsque la richesse diminue.

1.4.2 Mesure dans les turbines aéronautiques

Pour contrôler la pollution autour des aéroports provenant du trafic aérien, l'ICAO a mis en place des procédures de mesures et a déterminé des certifications pour les suies, les imbrûlés, le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote. Les mesures sont réalisées à l'émission des turbines par les manufacturiers, en accord avec les normes internationales de l'ICAO [ICAO, 2004]. Pour caractériser les manœuvres autour des aéroports, un cycle atterrissage-décollage (LTO : Landing and Take Off) a été défini.

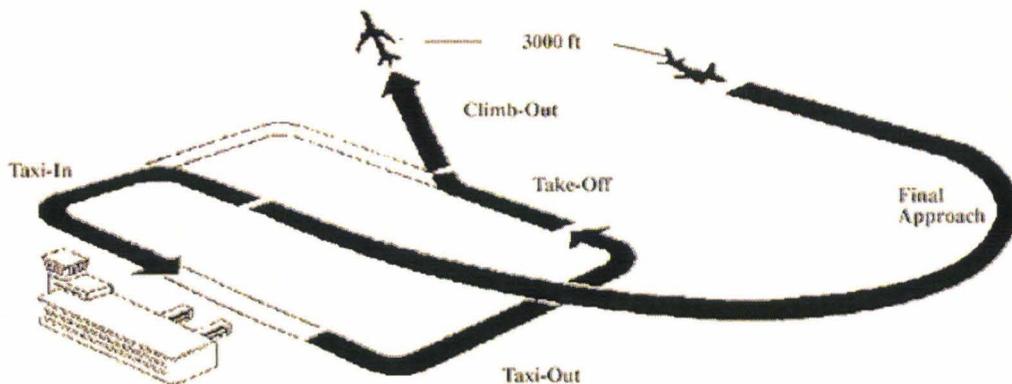


Figure 1.20 : Cycle LTO défini par l'ICAO

Pour la certification des turbines, des modes de fonctionnement du moteur ont été définis suivant la poussée (F_{00} : poussée maximale) et le temps nécessaire à cette phase :

Mode de fonctionnement	Poussée [kN]	Durée [min]
Décollage	100% F_{00}	0,7
Montée	85% F_{00}	2,2
Approche	30% F_{00}	4,0
Taxi	7% F_{00}	26,0

Tableau 1.2 : Simulation des temps de poussée pour chaque mode de fonctionnement.

Le site web de l'ICAO⁴ résume les résultats des mesures de quantité de particules émises par différentes turbines aéronautiques en utilisant la technique du *Smoke Number*. Ces mesures prennent en compte les conditions de poussée du moteur, le type et la composition du combustible, et les conditions de mesures (pression, température, humidité de l'air). Ceci ne donne qu'une idée de la quantité de particules émises par les turbines car, rappelons le, cette technique collecte toutes les particules à l'émission des turbines (suies, particules métalliques, lubrifiant, imbrûlés) mais ne collecte pas les plus fines particules (diamètre inférieur à 100 nm). Or une étude récente [Delhaye, 2006] par microscopie électronique, effectuée sur des échantillons de particules de suie prélevées à l'échappement de turbines, a montré que les particules de suie avaient une distribution log-normale dont le maximum est centré sur 10,2 nm (pour des analyses TEM) ou 22.5 nm (pour des analyses SEM). De plus, les mesures de *Smoke Number* sont relativement anciennes ; les valeurs les plus récentes donnent des valeurs très faibles voir nulles, ce qui laisse beaucoup de questions en suspend concernant la validité de ces résultats.

Différents projets ont été réalisés à l'échelle européenne ou internationale [Kugele, 2005]. Nous en faisons une rapide présentation.

Les premières études ont débuté dans les années 90 avec les projets SULFUR I-VII (1994-1999) [Schumann, 2002] pour mieux comprendre les propriétés des particules dans un aérosol et la formation des traînées produites par les turbines aéronautiques en fonction de la quantité de soufre présent dans le combustible. Les principales questions abordées étaient la quantité de particules de suie produites par unité de masse de combustible brûlé et leurs tailles, la quantité de particules volatiles formées par unité de masse de combustible brûlé, l'impact du soufre dans la formation des traînées et leur rôle dans la formation des aérosols, des suies et de la formation des cristaux de glace dans les traînées. D'autres projets, SNIF I-III (SNIF : Subsonic Assessment Near-field Interaction Field) [Anderson, 1999] et SUCCESS (SUCCESS : Subsonic Aircraft Contrail and Cloud Effects Special Study), ont permis de

caractériser les émissions polluantes des Boeing 737 et B757 en vol. Dans ces projets, le but était d'étudier l'impact des émissions dans l'atmosphère. Les résultats obtenus montrent l'importance du soufre dans la composition du combustible qui augmente la quantité de particules volatiles et non-volatiles produites. De plus, les moteurs les plus propres, produisent des particules plus petites, ce qui augmente le facteur de dangerosité de ces émissions pour la santé humaine. Les projets POLINAT I-II (1994-1998) (POLINAT : Pollution from Aircraft Emission In the North Atlantic Flight Corridor) se sont intéressés à l'impact du trafic aérien et à ses émissions dans le couloir de vol nord atlantique entre la basse couche de la stratosphère et dans les hautes couches de la troposphère (entre 9 et 13 km d'altitude). Les projets allemands PAZI I-II (2000-2003) (PAZI : Partikel und Zirren) se sont intéressés à la formation des particules de suie et de leurs précurseurs. Des mesures ont été réalisées sur des flammes de laboratoire et dans les gaz d'échappement des turbines. Ces mesures ont permis de caractériser les gaz d'échappement et de déterminer la composition chimique des aérosols. Le projet INCA (2001-2004) (INCA : Interhemispheric differences in Cirrus properties from Anthropogenic emissions) s'est intéressé aux propriétés des nuages entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud. Les résultats ont montré que la présence d'aérosols et de gaz est plusieurs fois plus importante dans l'hémisphère nord. Le projet européen PARTEMIS (2000-2003) (Measurement and prediction of emissions of aerosol and gaseous precursors from gas turbine engines) s'est focalisé sur la caractérisation et la quantification des émissions polluantes à l'échappement des turbines aéronautiques.

Ces différents projets, pour la plupart européens, sont réunis sous le projet AERONET qui vise à réduire les émissions polluantes provenant du trafic aérien et à en mesurer l'impact sur l'environnement. Le projet AEROTEST et les deux projets précédents AEROJET I-II s'inscrivent dans cette politique et visent à fournir des dispositifs de mesures capables de mesurer avec précision les émissions polluantes à l'émission des turbines [Schäfer, 2000]. Le paragraphe suivant résume l'évolution des projets AEROJET I-II au cours desquels le dispositif utilisé dans la thèse a vu le jour. Le but était de construire un système compact et facilement transportable pour réaliser les mesures sur tous les types de turbines. Pour cela, il a fallu placer la source d'excitation et le détecteur très proches l'un de l'autre. Les particules de suie émettant un signal isotrope, le signal d'incandescence est détecté à contre courant (rétro LII) du faisceau laser. La première configuration du projet était composée d'une caméra Princeton et d'un laser de diamètre 9 mm Nd³⁺/YAG émettant une

⁴ <http://www.caa.co.uk/default.aspx?categoryid=702&pagetype=68>

radiation à 1064 nm de 900 mJ. Les deux appareils étaient situés dans une boîte. Pendant le projet AEROJET II, le système a évolué en utilisant un télescope pour focaliser le faisceau laser. Dans ces conditions, le laser utilisé, trop puissant, a été remplacé par un CFR200 et la caméra Princeton a été remplacée par une caméra PIV Dicom Pro pour permettre la mesure de vitesse des particules de suie. [Black, 1999] donne une description détaillée du système. Comme nous le verrons dans les chapitres suivants, cette configuration avec télescope n'est pas adaptée à la mesure en rétro du fait de la variation de la densité d'énergie le long de l'axe laser. Des mesures ont été réalisées sur des turbines aéronautiques au cours de ce deuxième projet [Schäfer, 2000], ce qui a montré le bon fonctionnement de l'équipement, mais sans pouvoir relier cette mesure à une quantité de suie. Le projet AEROTEST vise à relier cette intensité enregistrée à une quantité de suie en calibrant le dispositif par extinction.

Une étude quasi similaire a été réalisée par [Jenkins, 2002] et a donné naissance au dispositif MetroLaser. Le dispositif de mesure utilise deux lasers, un à 532 nm et un autre à 1064 nm. Le laser à 1064 nm permet de mesurer, à basse énergie, la concentration de particules de suie. Le laser à 532 nm forme une nappe laser pour visualiser l'écoulement. Le signal le long de l'axe laser est collecté par une caméra ICCD. L'axe du faisceau laser à 1064 nm et l'axe de collection du signal forment un angle de 90° (cf. Figure 1.18). Le système a été calibré en laboratoire en utilisant un générateur de particules de carbone dont le diamètre est de 327 nm et la concentration de 1,2 mg.m⁻³. Des mesures sur une turbine de 50 cm de diamètre ont montré que le système pouvait détecter des concentrations inférieures à 5 µg.m⁻³. De plus, à chaque augmentation de régime moteur, la quantité de suie augmente très rapidement jusqu'à 1,5 mg.m⁻³ pendant quelques secondes et retombe à une valeur stable de 0,3 mg.m⁻³ à une vitesse stabilisée.

D'autres études portent sur la caractérisation physico-chimique des suies émises par les avions et de la morphologie. [Petzold, 1999] détermine la taille des particules primaires ($D_p \approx 45$ nm) et des agrégats ($D_a < 200$ nm) émis par des turbines aéronautiques, ainsi que la concentration en nombre ($2,9 \cdot 10^7$ cm⁻³) ce qui semble concordant avec les modèles et les mesures réalisées en vol. L'analyse élémentaire des particules suggère que les émissions particulières sont presque totalement composées de carbone. En vol, cette émission varie de 0,11 g à 0,15 g par kg de combustible brûlé. [Dakhel, 2005], montre à travers une modélisation, que la morphologie des suies n'est pas modifiée entre la chambre de combustion et l'échappement, c'est à dire qu'il n'y a pas de réactions particule-particule ou particule-paroi. [Zhu, 2004] détermine le coefficient d'extinction dans une flamme de

kérosène JP-8 par la méthode LAOF (Large Agglomerate Optics Facility), pour des longueurs d'ondes comprises entre 632,8 nm et 1565 nm. Les résultats indiquent une valeur du $E(m)$ constante sur cette plage de longueurs d'onde et égale à 0,52. [Popovitcheva, 2000] a étudié les propriétés physico-chimiques des suies. Les suies adsorbent plus facilement les molécules d'eau à basse pression due à leur porosité, ce qui pourrait expliquer la formation de traînées derrière les avions. Le Workshop [A²C³, 2000] s'est intéressé à la formation des particules et leurs propriétés, et à l'impact sur l'environnement. Un des résultats importants pour cette étude est la taille des agrégats dont le diamètre est compris entre 50 et 200 nm. D'autres études, en grande majorité des Etats-Unis, existent mais dont les applications sont principalement militaires et sont donc en accès restreint.

1.5 Conclusion

Au travers de cette étude bibliographique, le *smoke number*, utilisé actuellement pour quantifier les particules de suie à l'émission des turbines, s'avère être un outil obsolète. La limite basse de sensibilité de cette méthode de mesure a été dépassée à cause de la faible production de suies par les turbines récentes. Par ailleurs, cette méthode intrusive collecte toutes les particules présentes dans les gaz d'échappement (suie, huile, particules métalliques, imbrûlés). En revanche, l'incandescence induite par laser apparaît comme l'outil idéal pour quantifier les particules de suie, car le signal mesuré à 1064 nm ne provient que de la partie carbonée des suies, partie représentant environ 80% de la masse de la particule. Par ailleurs, c'est une technique très sensible, avec un temps de réponse très court qui permet de suivre l'évolution du signal en temps réel. En laboratoire, cette technique permet de déterminer la morphologie des particules de suie en analysant la décroissance temporelle du signal. Le point faible de la technique LII, et plus généralement des méthodes optiques, est le manque de connaissance sur les propriétés optiques des suies ce qui engendre une incertitude importante sur la détermination des quantités mesurées.

Chapitre 2 : Dispositif Expérimental

2 Dispositif expérimental

2.1 Introduction

Le *smoke number*, instrument de mesure utilisé aujourd'hui pour la quantification des particules de suie émises par les turbines aéronautiques, manque de sensibilité. Le développement d'un nouvel outil est donc nécessaire pour les motoristes afin de déterminer avec précision les quantités de suies produites par les moteurs actuels. Ceci permettra d'optimiser l'ensemble turbine-combustion lors du développement des nouveaux moteurs. De plus, le suivi de la production de polluants d'une turbine aéronautique permet de déterminer à quel moment une maintenance est nécessaire. Une production plus importante de particules de suie signifie un dépôt plus important sur les parois de la chambre de combustion, de la turbine et de la tuyère conduisant à une dilatation plus importante du moteur due aux radiations émises par les particules. En plus de l'aspect sanitaire décrit au chapitre 1, l'intérêt lié à la mesure des particules de suie est d'ordre économique, puisque les moteurs peu polluants s'attribueront des parts de marché plus importantes à l'avenir. Notons que dans le domaine militaire, une production importante de suies s'accompagne d'une signature thermique non désirée des avions.

Comme nous avons pu le voir dans le premier chapitre, il est difficile de réaliser des mesures dans les turbines aéronautiques ou dans les gaz d'échappement à cause des contraintes en terme de température et de vitesse des gaz de combustion. Le diagnostic optique se montre un outil très efficace pour la mesure des polluants dans les gaz d'échappement car il ne nécessite pas l'introduction de sonde de prélèvement. En particulier, l'incandescence induite par laser permet de quantifier les particules de suie émises par les turbines aéronautiques.

D'une manière générale, les turbines aéronautiques sont composées d'un compresseur, qui aspire et comprime l'air extérieur, d'une chambre de combustion, où l'air comprimé et le combustible sont mélangés et brûlés, et d'un ensemble composé d'une turbine et d'une tuyère, qui récupère l'énergie cinétique des gaz de combustion pour la propulsion de l'avion et pour son alimentation en électricité (Figure 2.1). Une description plus détaillée des turbines et de leur principe de fonctionnement sera faite dans le chapitre 5.

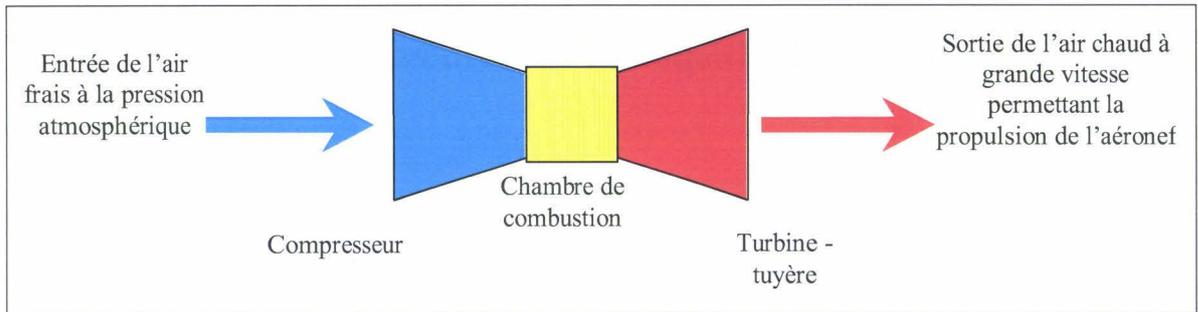


Figure 2.1: Schématisation du fonctionnement d'une turbine.

Le combustible, injecté dans la chambre de combustion par des injecteurs sous forme de spray, est mélangé à l'air comprimé par le compresseur, ce qui conduit à un écoulement très turbulent. La combustion du mélange air-kérosène provoque une augmentation en pression et en température très importante des gaz. Les gaz brûlés se détendent et se refroidissent dans un premier temps dans la turbine ce qui permet dans le même temps d'obtenir un écoulement turbulent. Les gaz de combustion finissent de se détendre dans la tuyère, élément qui permet la propulsion de l'aéronef et dont le diamètre est variable suivant la puissance du moteur et ses applications. Les dimensions de la tuyère varient de quelques dizaines de centimètres pour les plus petites à plusieurs mètres pour les plus grandes.

Les mesures de quantités de suies se font en aval de la tuyère. Le projet AEROTEST vise à développer un dispositif de mesure pour quantifier les particules de suie à l'émission des turbines aéronautiques quel que soit le diamètre de la tuyère et donc le diamètre du panache des gaz de combustion. Le dispositif développé dans les projets AEROJET I et II et repris dans le projet AEROTEST (décrit dans le prochain chapitre) utilise un système compact dans lequel la source excitatrice (laser Nd³⁺/YAG) et le système de détection (caméra ICCD) sont réunis. La mesure du signal LII est ainsi intégrée le long de l'axe laser et elle est enregistrée dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser appelé rétro-LII.

Afin de développer ce système et de rendre les mesures de suies quantitatives, un dispositif de production de suies a été conçu et construit au laboratoire. Il s'agit d'un système de combustion permettant de reproduire des conditions proches (à plus petite échelle) de celles rencontrées au sein des gaz d'échappement des turbines aéronautiques. Pour cela un brûleur de chaudière domestique est utilisé pour produire des particules de suie de même nature et une combustion turbulente à grande échelle afin de réaliser des mesures intégrées le long de l'axe laser. Le combustible est injecté sous forme de spray comme dans une chambre

de combustion. Le combustible utilisé est du kérosène civil Jet A1 afin de former des particules de suie de même nature, c'est-à-dire avec des propriétés optiques similaires. Les mesures sont réalisées dans les gaz brûlés de la flamme à une température de l'ordre de 500 K - 1000 K.

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes configurations expérimentales que nous avons utilisées pour le dosage des suies par LII. Le brûleur 'kérosène' est décrit par la suite. Enfin le dispositif AEROTEST ainsi que les bancs de calibrages associés sont détaillés.

2.2 Montage de base en LII 90° et LII rétro

Les particules de suie sont des agrégats composés de sphérules dont le diamètre est compris entre 10 nm et 50 nm. Pour chauffer les particules de suie, un laser Nd³⁺/YAG pulsé est généralement employé à sa longueur d'onde fondamentale (1064 nm) pour éviter la perturbation de la fluorescence induite par les HAP. Etant donné que cette longueur d'onde d'excitation λ est grande devant le rayon r des particules ($r \ll \lambda$), le signal rayonné par les particules de suie est proportionnel à leur volume (cf. équation 1.17). Ce signal est isotrope ce qui signifie que l'intensité du signal est la même quelle que soit la direction de détection.

2.2.1 Configuration angle droit (ou 90°)

C'est cette configuration qui est généralement utilisée en laboratoire pour étudier les particules de suie émises par une flamme. Son principe consiste à placer un détecteur à angle droit par rapport au sens de propagation du faisceau laser (Figure 2.2). Ceci permet de connaître avec grande précision le volume de mesure, qui est l'intersection entre la zone de suies excitée par le faisceau laser et la zone de détection du capteur.

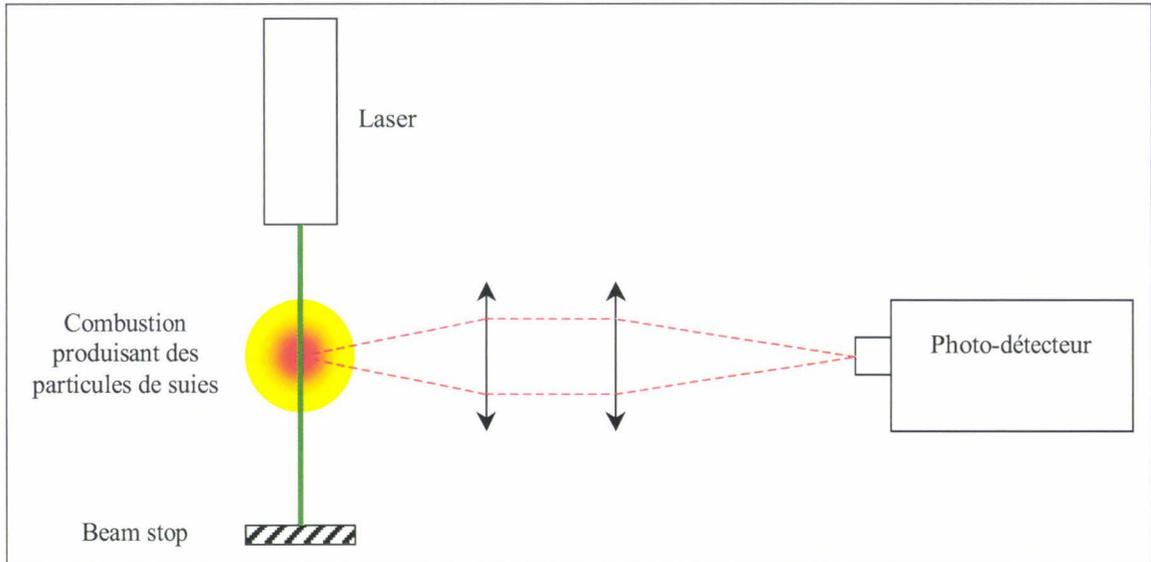


Figure 2.2 : Configuration à angle droit (ou 90°).

Cette configuration est très bien adaptée pour l'étude et la caractérisation de flammes de laboratoire, stabilisées sur un brûleur de petite taille. Une mesure de la fraction volumique de suies à l'émission des turbines aéronautiques nécessiterait de positionner la source excitatrice ou le détecteur suivant un axe vertical. Cette installation difficile serait en plus soumise aux vibrations engendrées par le fonctionnement de la turbine. Ceci reflète bien que la configuration à angle droit est inadaptée à la certification des turbines aéronautiques.

Le projet AEROTEST vise à développer un système transportable, simple d'application et compact car les bancs d'essais sont dimensionnés à la taille et à la puissance des turbines. Les normes internationales [ICAO, 2004] indiquent un espacement de quatre fois le diamètre de la turbine entre l'axe de la turbine et les murs du banc.

2.2.2 Configuration rétro

La détection du signal dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser, appelée configuration rétro, permet de réaliser des mesures sur toutes tailles de turbines. Le système AEROTEST, qui regroupe les chaînes d'excitation et de détection sur le même support, est aligné au préalable en laboratoire. L'inconvénient de ce système est qu'il réalise des mesures intégrées le long de l'axe du faisceau laser (Figure 2.3).

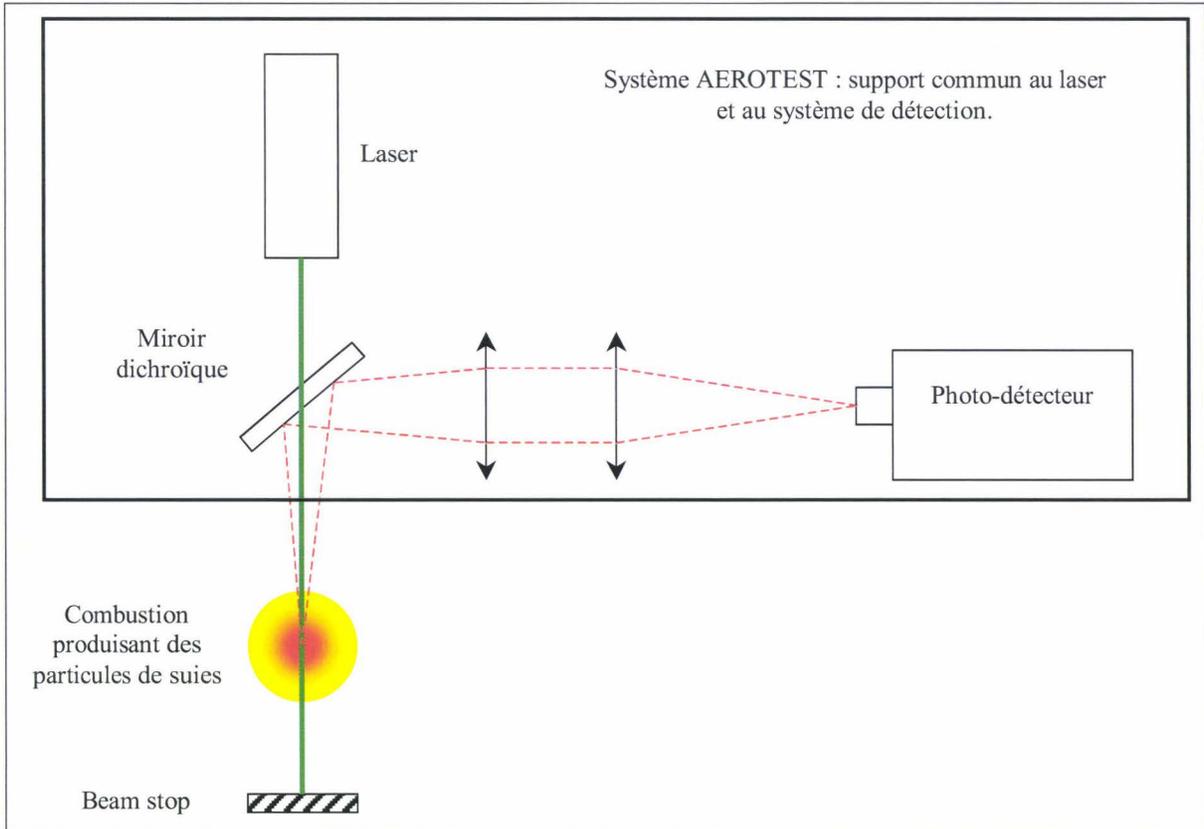


Figure 2.3 : Configuration rétro. La configuration AEROTEST regroupe les chaînes d'excitation et de détection sur le même support.

Les vibrations engendrées par les turbines aéronautiques pendant leur fonctionnement en régime stabilisé affectent l'ensemble du système.

2.2.3 Comparaison des deux configurations

Comme nous l'avons déjà mentionné, quelle que soit la direction de détection, les signaux collectés à angle droit et en rétro sont proportionnels à la fraction volumique de suies. La Figure 2.4 montre des exemples de répartitions spatiales des signaux LII enregistrés par la caméra suivant la configuration utilisée.

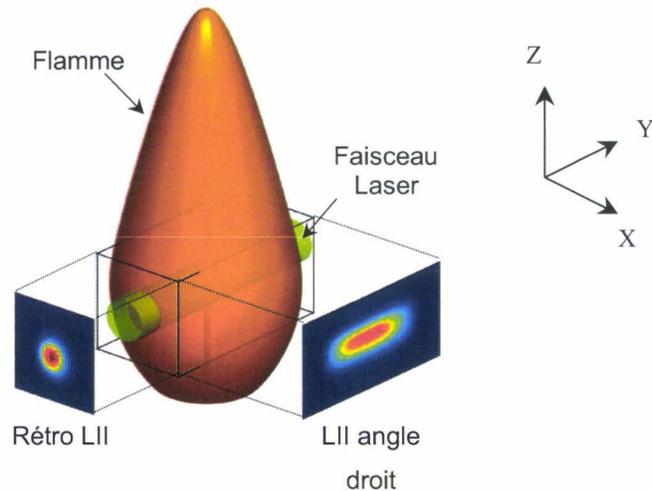


Figure 2.4 : Type de signal enregistré par une caméra ICCD en configuration rétro et angle droit.

En configuration rétro, le signal enregistré par la caméra ICCD a la forme de la distribution spatiale de l'énergie au sein du faisceau laser pour un volume de mesure où la répartition des particules de suie est homogène dans le sens horizontal et vertical (axe X et Z) de la flamme. L'image représente la distribution radiale du signal LII dans la section du faisceau laser intégrée le long de l'axe du faisceau laser, en fonction de la densité d'énergie. En configuration angle droit, le signal enregistré dans une flamme est représentatif de la distribution spatiale des particules de suie dans la flamme le long du faisceau laser. Cette distribution spatiale des particules de suie au sein de la flamme est intégrée le long de l'axe de détection (axe x).

2.3 Banc de mesure

Dans cette section, nous décrivons plus en détail le dispositif servant au calibrage, conçu et construit au laboratoire de Lille, et les principaux éléments constituant l'équipement AEROTEST.

2.3.1 Dispositif de production de suies

Le dispositif construit est composé d'un brûleur de chaudière domestique Weishaupt, d'une enceinte où se produit la combustion et d'une cheminée de diamètre plus petit traversée par les gaz brûlés. Sur cette dernière est placée une cellule dans laquelle a été réalisé le calibrage du système AEROTEST. La Figure 2.5 montre le schéma du banc de mesure.

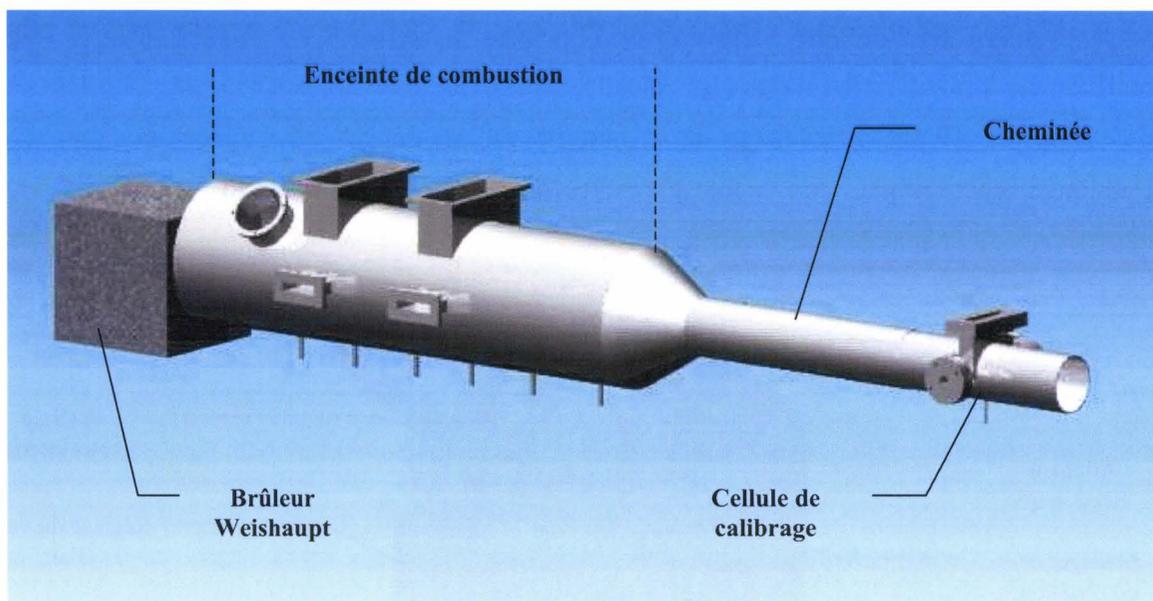


Figure 2.5 : Schéma du banc de mesure au laboratoire.

Les sections suivantes décrivent en détail chaque élément du banc de mesure.

2.3.2 Le brûleur kérosène

Le brûleur utilisé pour produire des particules de suie assimilables à des suies produites par les turbines aéronautiques est un brûleur pour fioul domestique Weishaupt WL5/1-B, d'une puissance comprise entre 20 et 40 kW. Son fonctionnement a été agrémenté de quelques améliorations destinées à un meilleur contrôle des conditions de combustion. Le brûleur est muni d'une pulvérisation mécanique avec ventilateur. Il est constitué d'un manager de combustion, qui permet de surveiller toutes les fonctions du brûleur, d'une régulation d'air, d'une ligne de gicleur et d'une tête de combustion (Figure 2.6). La régulation de l'air est réalisée en actionnant un volet à l'aide d'une vis. Le débit d'air envoyé dans une chambre de mélange, est contrôlé par un capteur de pression différentielle Sensor Technics HCX series 0-10 mbar. La précision de la mesure est de 0,025 mbar. L'alimentation en combustible est possible grâce à une pompe et une vanne magnétique. Sur la ligne d'aspiration en carburant, un filtre de 25 μm nettoie le kérosène des plus grosses particules. Un manomètre à glycol permet de contrôler la pression du combustible au niveau de la pompe. Le kérosène est injecté via la ligne de gicleur jusque dans la tête de combustion. Le combustible est ensuite pulvérisé grâce à un injecteur (0.50 Steinen 60°ST). La puissance du brûleur est contrôlée par les caractéristiques de l'injecteur et par la pression du combustible.

La combustion est contrôlée à l'aide d'un déflecteur de diamètre 63 mm, donnant un effet tourbillonnant (swirl) à la flamme. Le diamètre de cette dernière à proximité du déflecteur est de l'ordre de 10 cm. L'allumage de la flamme est assuré par deux électrodes reliées à l'allumeur électronique. Une cellule photoélectrique contrôle la présence de la flamme au démarrage et en cours de fonctionnement.

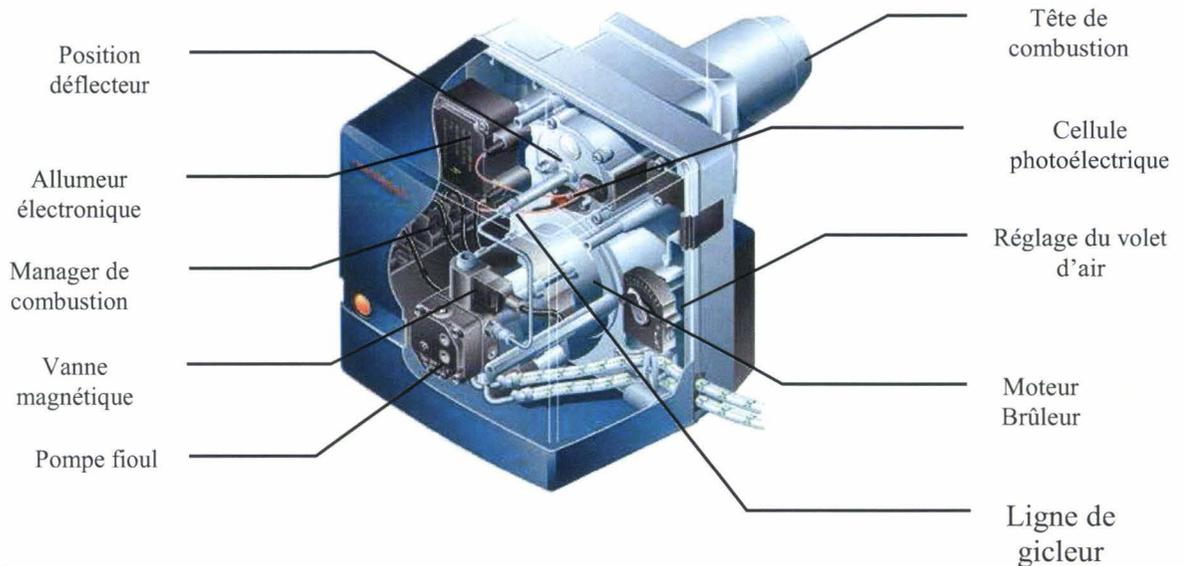


Figure 2.6 : Brûleur Weishaupt et ses principaux organes.

Ce type de brûleur permet de produire une flamme turbulente de grande taille (Figure 2.7). Le combustible brûlé est du kérosène Jet A1 à usage commercial. La quantité de particules de suie produite est fonction du rapport combustible – comburant injecté.



Figure 2.7 : Flamme de kérosène produite par le brûleur Weishaupt.

Au cours des mesures de calibrage, le débit de kérosène était constant et seul le débit d'air variait. La pression d'injection du kérosène était de 10 bar, ce qui correspond à une consommation de $1,9 \text{ L.h}^{-1}$ et à une puissance de 22,6 kW avec l'injecteur utilisé. L'air injecté est ajusté par la position du volet d'air et contrôlé par le capteur de pression de la chambre de mélange. C'est une valeur utilisée arbitrairement, qui reflète le rapport combustible/comburant, utilisée lors de la combustion. Plus la valeur du volet d'air est faible, plus le rapport combustible/comburant est grand. Une combustion dans des conditions stœchiométriques correspond à un volet d'air approximativement de 2. Le tableau 2.1 résume les correspondances entre la tension lue sur le capteur de pression, et utilisée par la suite comme référence concernant la production de suies, et la pression dans la chambre de mélange.

Tension (V)	Pression (mbar)
2	3,750
1	1,250
0,90	1,125
0,87	1,088
0,85	1,063
0,82	1,025
0,80	1,000

Tableau 2.1 : Correspondance entre la tension du capteur de pression et la pression dans la chambre de mélange.

Une tension de 2 V correspond à un fonctionnement normal du brûleur pour former les particules de suie. Les mesures réalisées correspondaient à une tension comprise entre 0,80 V et 0,90 V. Dans la suite de ce manuscrit, nous utiliserons la tension du capteur pour préciser la position du volet d'air, c'est à dire les conditions de richesse de la combustion.

Le brûleur est fixé à la première partie de la cheminée appelée zone de combustion. Le nez du brûleur est introduit de 125 mm dans l'enceinte de combustion.

2.3.3 Zone de combustion

La combustion s'effectue dans une enceinte de combustion de longueur 1100 mm et de diamètre 300 mm. Les dimensions de la flamme dépendent du rapport comburant/combustible utilisé. Elle peut atteindre une cinquantaine de centimètres en

condition riche en combustible. Cette partie de la cheminée possède différents accès optiques rectangulaires pour permettre les mesures LII en rétro (25×100 mm) et à angle droit (100×250 mm) dans la flamme ou dans les gaz brûlés. D'autres ouvertures (placées sous la cheminée) permettent l'introduction de thermocouples pour la mesure de la température. L'ensemble est cerclé d'un bobinage de cuivre recuit dans lequel s'écoule un débit d'eau pour assurer le refroidissement de l'ensemble. Les gaz brûlés sont ensuite évacués à l'extérieur via une cheminée de 125 mm de diamètre sur laquelle est placée la cellule de calibrage.

2.3.4 Cellule de calibrage

La cellule de calibrage est placée à 2300 mm du brûleur, pour que les particules de suie soient à des températures voisines de celles à l'émission des turbines aéronautiques (entre 500 K et 1000 K), et son diamètre intérieur est de 120 mm. Une circulation d'eau dans les brides des hublots par un système de double parois assure le refroidissement des brides. La Figure 2.8 montre une vue éclatée de cette cellule avec les différentes brides.

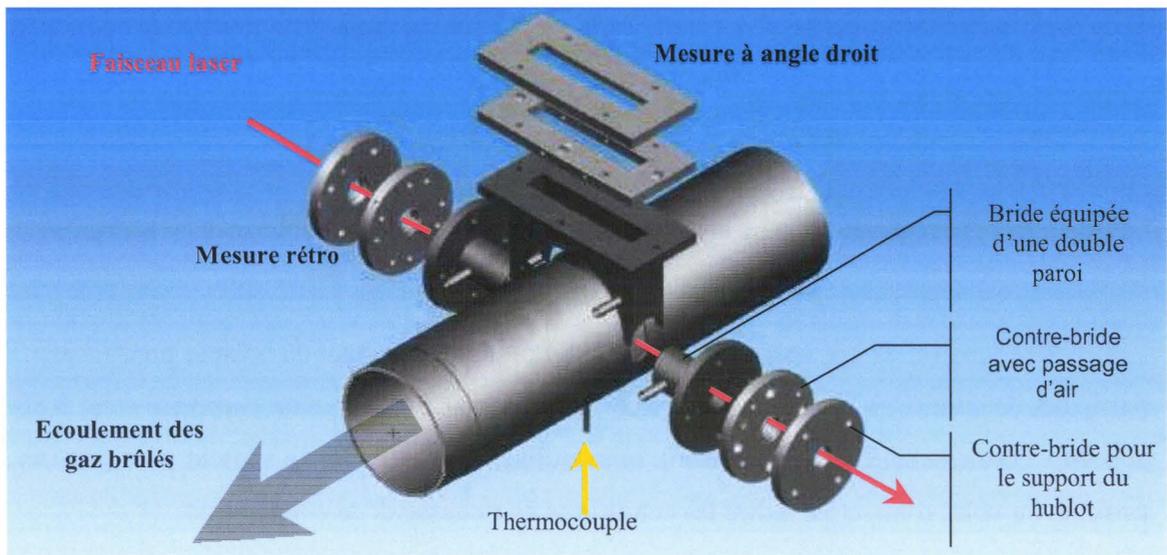


Figure 2.8 : Vue éclatée en 3D de la cellule de calibrage.

Les ouvertures circulaires permettent le passage du faisceau laser et la collection du signal LII dans la configuration du projet AEROTEST, et l'ouverture rectangulaire permet la collection du signal à angle droit. Il est ainsi possible de réaliser des mesures suivant les deux configurations pour permettre une bonne caractérisation de la zone de mesure.

Les mesures de la température suivant l'axe laser ont été réalisées avec un thermocouple type K de 1,5 mm de diamètre et de 300 mm de long. La Figure 2.9 montre les

profils de température des suies obtenus pour différentes conditions d'entrée d'air. Dans chaque cas, le profil présente un aspect uniforme sur 100 mm environ et des gradients très élevés à l'approche des parois, caractéristique d'un écoulement turbulent.

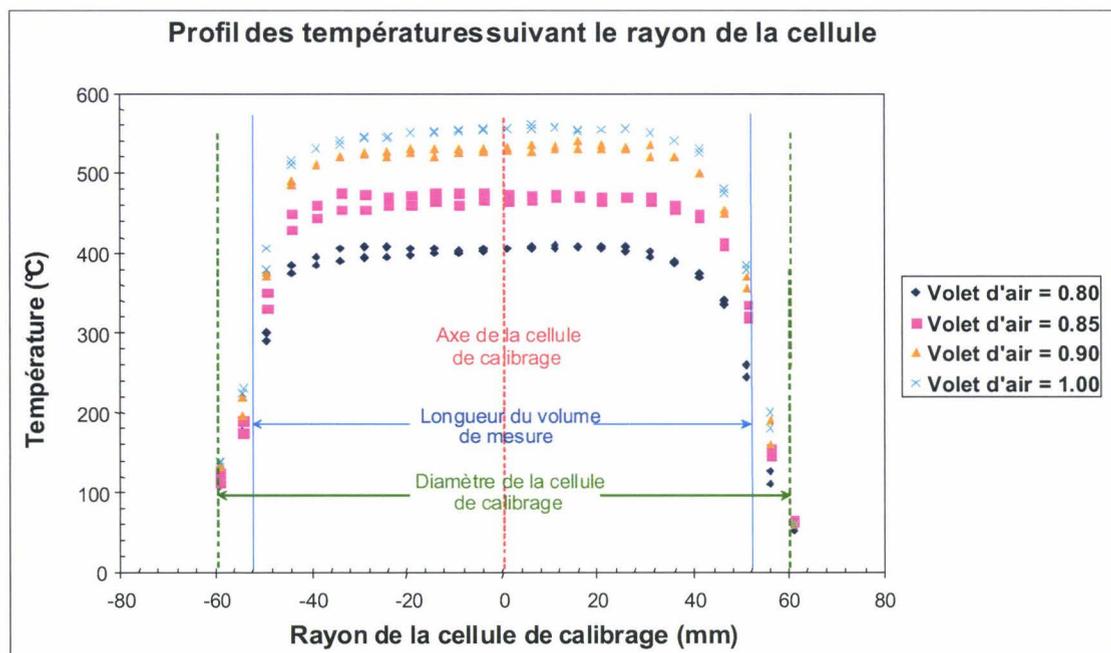


Figure 2.9 : Profil de la température des gaz de combustion suivant l'axe laser pour différents rapport combustible/comburant.

Ainsi, plus le volet d'air est proche des conditions stœchiométriques, plus la température des gaz de combustion au niveau du volume de mesure est grande.

2.3.5 Conclusion

Le brûleur kérosène mis au point au laboratoire permet de produire des particules de suie supposées de nature proche de celles émises par les turbines aéronautiques. Nous verrons au chapitre 4 que les profils radiaux de suies sont très homogènes, de même que les profils de températures présentés dans cette section. Cette caractéristique sera particulièrement utile dans la phase de calibration basée sur des mesures d'extinction.

2.4 Dispositif de mesure des particules de suie

Le dispositif AEROTEST est composé d'une chaîne d'excitation et d'une chaîne de détection. Le détecteur utilisé est une caméra CCD intensifiée. Le signal LII enregistré sur le

capteur CCD de cette caméra a été présenté au chapitre 2.2.3. Le calibrage du dispositif consiste à transformer l'intensité de ce signal en une fraction volumique absolue en fonction des différents paramètres de mesure. Nous verrons au chapitre 4 que la phase de calibrage comporte plusieurs étapes liées d'une part à la définition des conditions expérimentales permettant d'assurer une bonne linéarité entre le signal LII reçu par le détecteur et la fraction volumique de suies et d'autre part à la transformation d'un signal LII mesuré dans des conditions de référence (cellule de calibrage) en fraction volumique absolue. Cette dernière s'appuiera sur un calibrage par extinction laser. Dans cette section, nous décrivons les principaux éléments utilisés pendant cette thèse. Différents lasers et différentes caméras ont été utilisés pour les mesures LII, leur calibrage et la caractérisation de l'écoulement des gaz de combustion. Leur utilisation sera mentionnée dans les chapitres correspondants en expliquant ces choix.

2.4.1 Les lasers

Les particules de suie sont chauffées à l'aide d'un rayonnement laser pulsé provenant d'un laser Nd/YAG à sa longueur d'onde fondamentale 1064 nm. Les premières mesures ont été réalisées avec un laser CFR200 mis à notre disposition en début de thèse. Après quelques modifications dans la chaîne d'excitation (cf. chapitre 3), la densité d'énergie s'est avérée trop faible pour atteindre le régime d'incandescence souhaité. Un laser Brilliant, émettant un faisceau laser de forme gaussienne, plus puissant et moins divergent, a été utilisé provisoirement en attendant le remplacement du laser CFR200. Ce dernier a été remplacé en juin 2006 par un laser CFR400, dont les dimensions de la tête laser et les connections (circuit de refroidissement et électrique) sont parfaitement identiques à celles du CFR200.

2.4.1.1 CFR200 / CFR400

Ces lasers étant destinés au projet AEROTEST, nous en faisons une description détaillée. Les lasers CFR200 et CFR400 appartiennent à la famille Big Sky de chez Quantel. Ils se déclinent en deux versions, GRM ou stable. La version GRM permet d'obtenir un faisceau parfaitement gaussien, alors que la version stable utilise des miroirs plans dans la cavité résonnante, donnant un profil plat de l'énergie laser. Pour une application sur banc moteur, la version stable a été plébiscitée car plus robuste et donc moins sensible à toutes les

contraintes rencontrées, précédemment mentionnées. Le Tableau 2.2 résume les différentes caractéristiques commerciales de ces deux lasers.

	CFR200	CFR400
Energie par pulse (mJ)	200	400
Largeur temporelle (ns)	12 – 15	7 - 10
Divergence du faisceau (mrad)	< 4	< 4,5
Stabilité de l'énergie (%)	< 2	< 2
Diamètre du faisceau (mm)	6,3	7

Tableau 2.2 : Principales caractéristiques commerciales des lasers Quantel CFR200 et CFR400.

Ils fonctionnent à une fréquence de répétition de 10 Hz et à une longueur d'onde de 1064 nm.

La cavité est repliée ce qui permet de rendre le système très compact (Figure 2.10). La tête laser est purgée à l'azote et scellée ce qui permet d'éviter une contamination par des poussières. Les dimensions de la tête laser sont 84 × 94 × 323 (en mm).

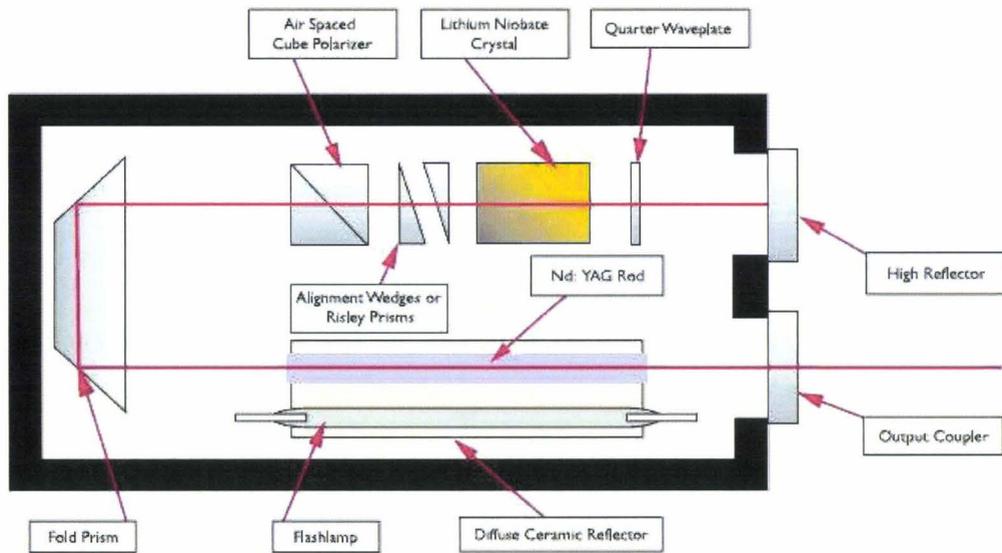


Figure 2.10 : Cavité repliée d'un laser Big Sky.

Les deux lasers sont associés à une baie 'Standard Ice' assurant le refroidissement et l'alimentation électrique de la tête. Cette baie est montée sur roulettes, facilitant son transport (Dimensions : 585 × 286 × 592 (en mm), pour un poids de 55 kg).

Les modèles CFR sont bien appropriés pour des utilisations dans des environnements où la température et l'humidité fluctuent au cours de la certification d'un moteur.

2.4.1.2 Laser Brilliant

Le laser Brilliant est également un laser Quantel. Le faisceau laser émis est de forme gaussienne. Le diamètre du faisceau en sortie de la tête laser est plus petit que sur les modèles CFR, 5.5 mm, et la divergence beaucoup moins importante, 0.5 mrad. La puissance est de 360 mJ par pulse. L'atténuation de l'énergie laser est réalisée par rotation d'une lame demi-onde placée entre deux lames polarisatrices.

2.4.2 Détection des signaux LII

Les signaux LII collectés suivant la configuration rétro ont été enregistrés au moyen d'une caméra équipée d'un objectif et d'un filtre rejetant la longueur d'onde du laser (1064 nm), et à angle droit au moyen d'une caméra équipée d'un objectif.

Deux caméras ont été utilisées pour réaliser les mesures. Une PCO Dicam Pro, initialement installée sur l'équipement LII, est utilisée pour la mesure en rétro et une Princeton Instrument pour la mesure à angle droit. La section suivante détaille le fonctionnement d'une caméra intensifiée Dicam Pro, mais est transposable à toutes les autres caméras CCD intensifiées.

2.4.2.1 Caméra PCO Dicam Pro

Le signal d'incandescence est enregistré par une caméra CCD intensifiée (Intensified Coupled Charge Device) Dicam Pro de 12 bits. Le CCD est composé de 1280×1024 pixels de 6.7 μm de côté et est refroidi à -11°C par un double effet thermoélectrique Peltier. Les caméras CCD intensifiées ont l'avantage de pouvoir exposer leur capteur pendant un laps de temps très court à partir d'un signal de déclenchement électrique ou lumineux (dans notre étude, la caméra est déclenchée par un signal électrique provenant de la Q-switch du laser). Leur fonctionnement repose sur deux éléments essentiels : l'intensificateur et le capteur CCD (fonctionnement détaillé en annexe). Le signal est ensuite transféré vers une carte d'acquisition via une fibre optique (Figure 2.11).

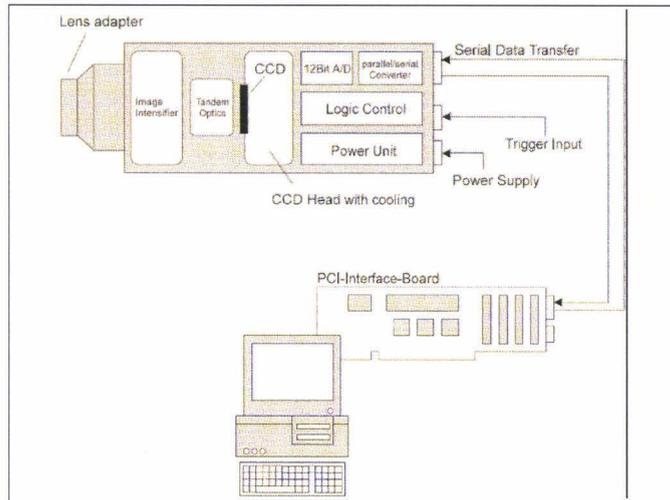


Figure 2.11 : fonctionnement d'une caméra CCD intensifiée.

Le logiciel de la caméra a été adapté par la société Auxitrol de façon à n'avoir accès qu'aux paramètres de fonctionnement de la caméra. Ainsi les seules fonctions influant sur le système de détection sont le type de synchronisation, le temps d'acquisition, le délai électronique, le nombre d'images et la région du CCD sélectionnée (ROI : Region Of Interest).

2.4.2.1.1 Chronogramme de la caméra

L'ouverture de la caméra est déclenchée par une impulsion électrique provenant de la Q-Switch de la baie laser. La synchronisation de la caméra et du phénomène d'incandescence est réalisée grâce à un paramètre contrôlant l'intensificateur, ajustable à partir du logiciel : le délai de mesure. Suivant la durée de ce paramètre et la durée du temps d'exposition, des délais internes à la caméra sont également à prendre en compte dans le chronogramme de l'intensificateur. Le temps d'exposition est le temps pendant lequel le signal est enregistré. Il est au minimum de 20 ns et peut aller jusqu'à plusieurs millisecondes. Pendant tout ce temps cumulé, le CCD de la caméra est ouvert (Figure 2.12).

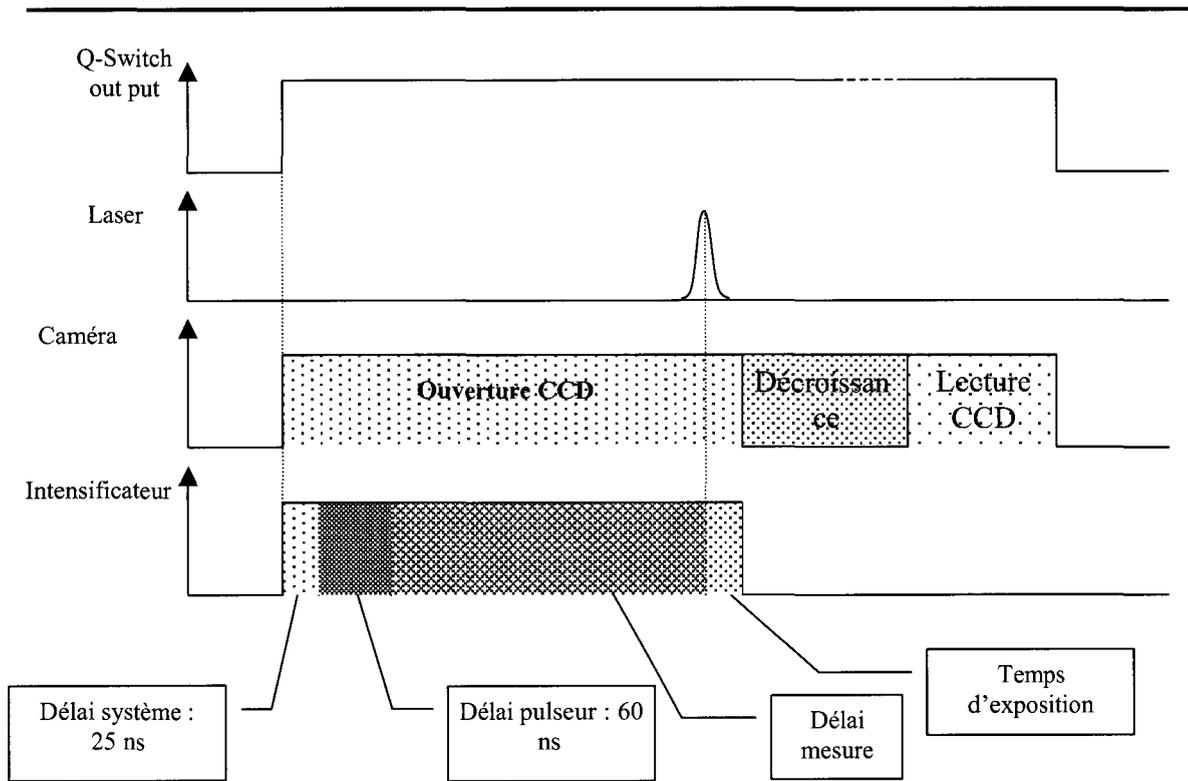


Figure 2.12 : chronogramme de la caméra.

Le signal d'incandescence est enregistré au maximum de son intensité temporelle (appelé prompt) pendant une période de 20 ns. Une incertitude sur l'instant de déclenchement est due au jitter du laser (quelques nanosecondes).

2.4.2.2 Caméra Princeton Instrument

La caméra Princeton Instrument est utilisée pour réaliser les mesures à angle droit pour déterminer le profil spatial des particules de suie le long de l'axe laser. Elle a été décrite en détail dans la thèse de [Moreau, 2002]. Nous allons ici indiquer les principales caractéristiques. Un pulseur (PG-200) est utilisé pour commander l'ouverture de la caméra en synchronisation avec le pulse laser. Un signal électrique du laser vers le pulseur permet une collecte du signal à chaque pulse laser et la fermeture de la caméra entre chaque pulse. Les informations provenant de la caméra et du pulseur sont ensuite envoyées au contrôleur (ST138) qui recueille les données. Les signaux sont transférés à un ordinateur grâce à un câble RS232 et une carte d'acquisition PCI.

La caméra est refroidie en permanence par un effet thermoélectrique Peltier afin de limiter le courant noir. Les calories sont évacuées en faisant passer un débit d'eau suffisant à

travers la caméra pour atteindre une température de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Afin d'éviter toute condensation, le capteur de la caméra est soumis à un flux d'azote gazeux.

2.4.2.3 Photomultiplicateur (PM)

La décroissance temporelle du signal LII émis par les particules de suie est recueillie par un photomultiplicateur placé en rétro (remplacement de la caméra CCD intensifiée par le photomultiplicateur). Le signal lumineux est amplifié et converti en signal électrique puis visualisé sur un oscilloscope numérique (LeCroy 9354A). Le photomultiplicateur utilisé (Philips XP 2020Q) est alimenté par un générateur haute tension de voltage variable (0-2000V). Les caractéristiques de ce photomultiplicateur sont données dans le Tableau 2.3 et sa réponse spectrale est indiquée par la Figure 2.13.

Type	Gamme spectrale (nm)	Courant d'amplification	Temps de montée (ns)	Temps de transit d'un électron (ns)
XP 2020Q	160-650	3.10^7	1.6	28

Tableau 2.3 : Caractéristiques du photomultiplicateur Philips XP 2020Q.

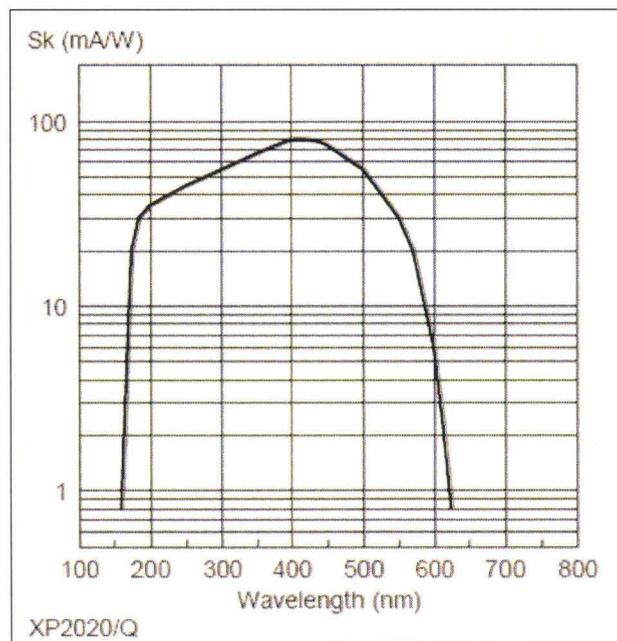


Figure 2.13 : Réponse spectrale du photomultiplicateur utilisé pour les mesures TIRE-LII (Philips XP2020Q)

2.4.3 Banc d'extinction

Un banc d'extinction a été mis en place pour la détermination de la fraction volumique des suies dans le brûleur kérosène. Le laser CFR400 est utilisé comme source lumineuse. L'atténuation de l'intensité laser est mesurée soit avec une photodiode, soit avec un mesureur d'énergie. Si l'atténuation est faible, la mesure est réalisée avec la photodiode (Figure 2.14), car elle permet d'obtenir une meilleure précision. Dans ce cas, le faisceau laser est réfléchi par trois lames réfléchissantes pour atténuer l'intensité transmise. A chaque réflexion sur une lame, 4 % de l'énergie laser est réfléchi. Finalement, le laser transmis est focalisé avec une lentille convergente ($f = 25 \text{ mm}$) puis atténué au moyen de densités neutres, avant d'être détecté par la photodiode.

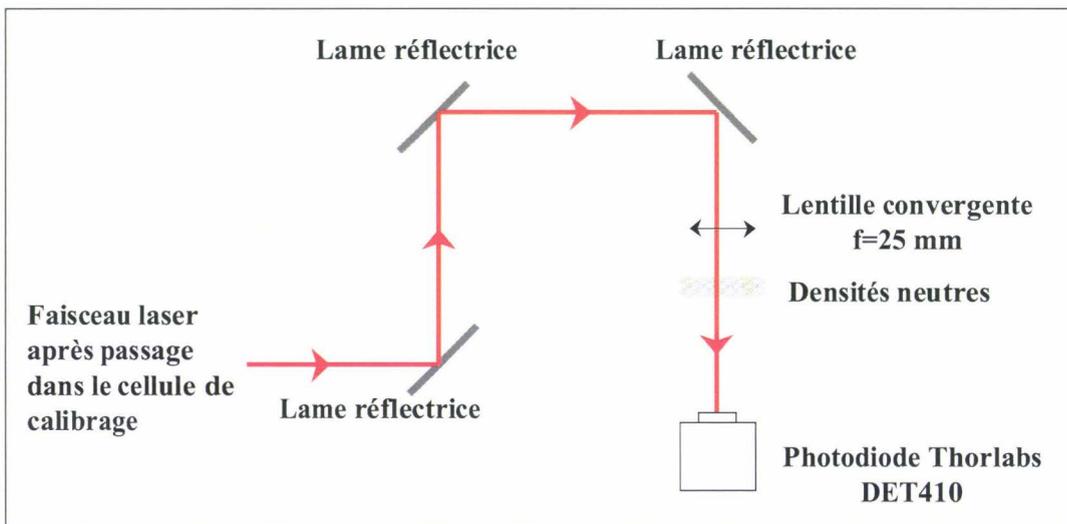


Figure 2.14 : Schéma de montage du banc d'extinction en utilisant une photodiode.

Dans le cas d'une forte extinction dans la cheminée, l'intensité transmise est détectée directement par le mesureur d'énergie, placé devant la première lame réfléchissante.

2.4.3.1 Photodiode

La photodiode utilisée pour nos mesures est une Thorlabs DET410. Sa bande passante est large bande (800 – 1800 nm) avec un temps de montée de 5 ns. Sa surface active est de 0.8 mm^2 .

2.4.3.2 Mesureur d'énergie

Le mesureur d'énergie laser est un modèle Nova de *Ophir Optronics*, qui mesure la puissance ou l'énergie laser. Il est composé d'une tête thermique 10A-P-SH reliée à un boîtier de mesure à affichage numérique via une liaison RS232. La gamme spectrale est très large et la précision des mesures est de 0,01 mJ/pulse.

2.5 Conclusion

Les différents éléments constituant la chaîne de détection de particules de suie par LII ont été décrits. Les caractéristiques spectrales et énergétiques du dispositif rétro-LII sont décrites dans le chapitre suivant. Le dispositif sera ensuite calibré par extinction, pour quantifier les suies produites par la combustion du kérosène issue du brûleur Weishaupt. Les mesures seront réalisées dans la flamme puis dans la cellule de calibration pour obtenir une meilleure reproductibilité tir à tir. La calibration est décrit au chapitre 4. Enfin, le système sera utilisé sur les bancs des turbines aéronautiques (chapitre 5).

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DU DISPOSITIF AEROTEST

3 Caractérisation du dispositif AEROTEST

Cette partie décrit l'évolution du dispositif LII au cours du déroulement de la thèse. Le dispositif initial était le fruit de deux précédents projets européens AEROJET I et II. L'objectif de cette thèse est d'une part d'optimiser le système et d'autre part de quantifier les mesures de fraction volumique de suies à l'émission des turbines aéronautiques. La caractérisation détaillée du dispositif LII initial réalisé dans ce chapitre a mis en évidence un certain nombre de faiblesses du dispositif ne permettant pas d'atteindre l'objectif de mesures quantitatives de particules de suie à l'émission des turbines aéronautiques. C'est pourquoi des améliorations successives ont été apportées au système. Elles sont résumées chronologiquement dans le tableau 3.1. Ces améliorations résultent d'analyses issues de mesures réalisées en laboratoire ou sur banc moteur.

Date	Dispositif	Tests Laboratoire	Tests turbines	Diagnostic
Septembre 2003	Système LII focalisé CFR200	Brûleur Wolfhart Parker	-	Mise en évidence des effets de bord : préconisation d'un système non focalisé
Janvier 2005	Laser CFR200 Version focalisée et non focalisée	 Développement du brûleur kérosène	Aachen : Test comparatif, focalisé/non focalisé	Problème de sensibilité : nécessité d'un laser plus puissant
Août 2005	Laser Brilliant non focalisé		Derby	Système LII non calibré
Mars 2006	Laser CFR400 non focalisé (prêté par Quantel)		Aachen	Configuration imposée par le consortium AEROTEST non valide
Juin 2006	Laser CFR400 non focalisé		Tests dans brûleur Kérosène. Calibrage	-
Août 2006	Laser CFR400	-	Aachen	Persistance d'un problème de sensibilité : nécessité de réduire la divergence naturelle du faisceau laser
Octobre 2006	Laser CFR400 avec télescope pour réduire la divergence du faisceau	Calibration dans brûleur Kérosène	Siemens	Calibré
Janvier 2007	Laser CFR400 avec télescope pour réduire la divergence du faisceau	-	Aachen	Calibré

Tableau 3.1 : Chronologie des améliorations et des campagnes de mesures au cours de cette thèse.

3.1 Le dispositif LII : version initiale focalisée

Dans cette section, nous présentons le système LII tel qu'il était au début du projet. Le faisceau laser est focalisé à une certaine distance du système. Lors du projet AEROJET II, il a été supposé que le signal LII émis par les particules de suie provenait d'une région assez limitée, centrée autour de ce point de focalisation. A l'aide d'un petit brûleur de laboratoire (brûleur Wolfhard Parker), nous avons déterminé la distance d'interaction entre le laser et les particules de suie, distance capitale en vue du calibrage en absolu de la fraction volumique de suies émises par les turbines aéronautiques.

3.1.1 Description

Le dispositif de mesure est composé de ce qu'on appellera la boîte laser, contenant tout le système optique d'excitation et de détection du signal LII, et d'un ordinateur pour l'enregistrement des données. L'ensemble est fixé sur une plaque métallique. La boîte laser est isolée des vibrations mécaniques à l'aide d'un système en nid d'abeille fixé entre la boîte laser et la plaque métallique. Les dimensions du dispositif total sont 1250×710×590 (en mm) et sa masse est de 110 kg (Figure 3.1). A cela il faut ajouter une baie laser dont les caractéristiques ont été données au chapitre 2. La Figure 3.1 montre les différents éléments contenus dans la boîte laser.

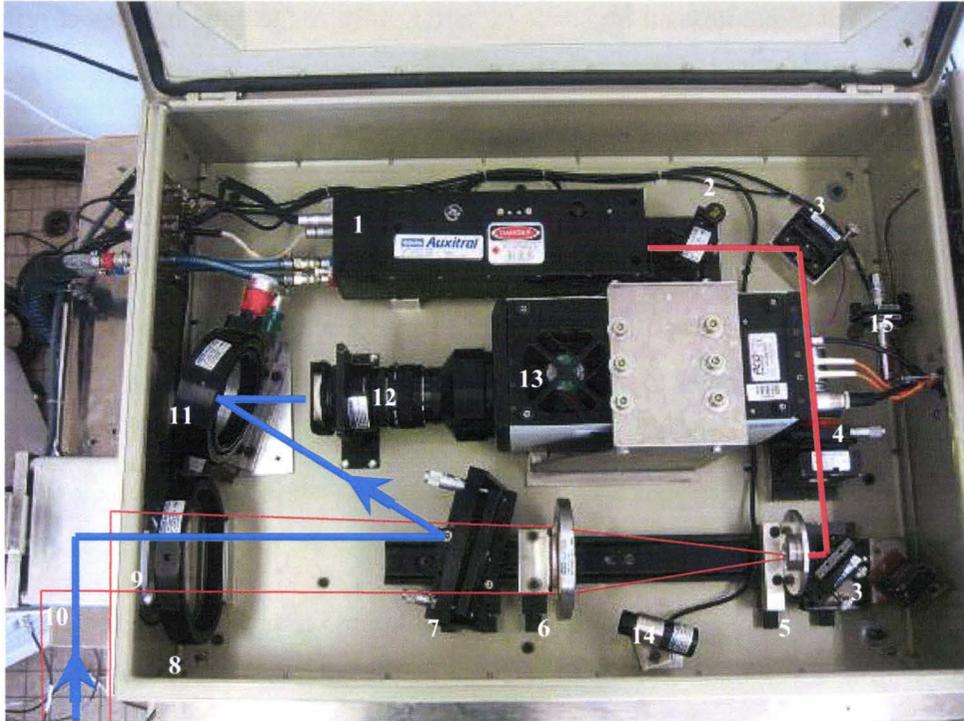


Figure 3.1 : Boîte laser. (1) Laser CFR200 ; (2) Filtre ; (3) Miroirs plan ; (4) Atténuateur ; (5) Lentille divergente $f_1 = -15$ mm ; (6) Lentille convergente $f_2 = 250$ mm ; (7) Miroir dichroïque ; (8) Lentille convergente $f = 1000$ mm ; (9) Fenêtre en quartz ; (10) Prisme droit ; (11) Miroir plan ; (12) Objectif caméra ; (13) Caméra Dicam Pro ; (14) Photodiode ; (15) Pointeur laser. Les traits rouges correspondent au trajet du faisceau laser et les traits bleus correspondent au trajet du signal LII.

Nous donnons ci-dessous une description détaillée des éléments optiques contenus dans la boîte laser :

1. Un laser YAG CFR 200 (précédemment décrit cf. chapitre 2) ; énergie en sortie de tête laser : 170 mJ, diamètre 6 mm.
2. Un filtre (HR à 530-700 nm), pour éviter un retour de la lumière visible des lampes flash dans la cavité optique du laser ;
3. Un miroir plan, permettant une réflexion à 90° du faisceau laser ;
4. Un atténuateur motorisé composé d'une lame quart d'onde et d'un prisme de Glan. La lame quart d'onde laisse passer la composante horizontale ou verticale du laser. Elle est entraînée par un petit moteur via une courroie. Cet élément engendre une perte d'énergie laser d'environ 70% (car non optimisé à $\lambda = 1064$ nm) ;
5. Une lentille divergente de focale $f_1 = -15$ mm et de diamètre $D_1 = 8$ mm ;
6. Une lentille convergente de focale $f_2 = 250$ mm et de diamètre $D_2 = 90$ mm ;

7. Un miroir dichroïque laissant passer la radiation infra rouge dans un sens et réfléchissant la lumière visible dans l'autre sens. Dans notre étude, le miroir a un diamètre de 100 mm et il est placé à 700 mm de la sortie de la tête laser ;
8. Une lentille convergente de focale $f_3 = 1000$ mm et de diamètre $D_3 = 145$ mm ;
9. Une fenêtre en quartz permettant au faisceau laser de sortir de la boîte laser ;
10. Un prisme droit agissant comme un miroir. Il est couplé à un moteur pas à pas pour à la fois diriger le faisceau laser suivant un axe vertical et également pour collecter le signal d'incandescence. La perte énergétique dans cet élément est importante : 20% de l'énergie laser ;
11. Un miroir plan de diamètre $D_4 = 100$ mm ;
12. Un objectif de caméra composé d'un objectif Nikon 85 mm, d'une bague macroscopique, d'une lentille divergente et d'un filtre large bande (400 nm - 850 nm) pour protéger la photocathode de toute réflexion infra rouge provenant du laser SWP 620 (Melles Griot) ;
13. Une caméra CCD intensifiée Dicam Pro décrite précédemment ;
14. Une photodiode indiquant l'énergie laser transmise ;
15. Un pointeur laser pour réaliser l'alignement sur les bancs de mesure.

La chaîne d'excitation est composée du laser CFR200 qui émet un faisceau à 1064 nm. Le trajet du faisceau laser est matérialisé en rouge sur la Figure 3.1.

Les trois lentilles de focales f_1 , f_2 et f_3 forment un télescope et focalisent le faisceau laser à une certaine distance de la boîte laser. Cette distance est contrôlée par la position de la lentille centrale, le but recherché étant de focaliser le faisceau laser dans les gaz d'échappement du moteur. Le projet AEROTEST prévoit une distance de 2,5 m entre l'équipement LII et l'axe de la turbine. Les mesures réalisées pour le calibrage utiliseront cette distance comme référence.

Le prisme droit motorisé permet de diriger le faisceau laser suivant un axe vertical (Figure 3.2). Ceci permet de balayer le panache des gaz d'échappement des turbines aéronautiques afin de déterminer la distribution des particules de suie selon l'axe vertical du panache. C'est également un élément de la chaîne de collection du signal.

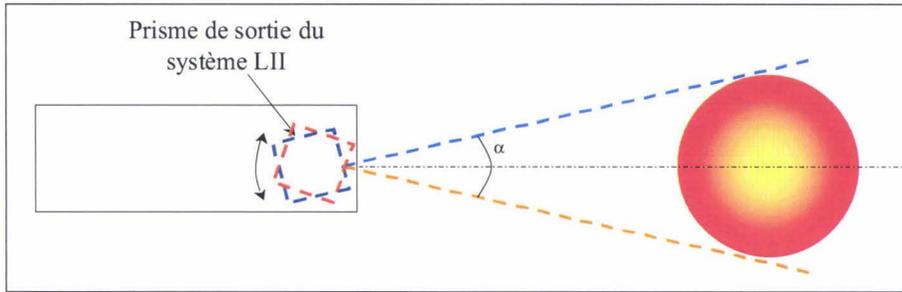


Figure 3.2 : Prisme droit motorisé en sortie de l'équipement LII. Il permet de balayer les gaz d'échappement de la turbine suivant l'axe vertical et suivant un angle α (fonction de la distance axe de la turbine – prisme et du diamètre de la turbine).

Les photons issus de l'incandescence des suies sont collectés selon le trajet matérialisé en bleu sur la Figure 3.1. L'objectif Nikon permet de faire la 'mise au point' de la caméra, c'est-à-dire qu'il permet de focaliser une image nette du spot LII sur la photocathode. Pour cela, il dispose de deux bagues de réglage : une pour la mise au point proprement dite et l'autre pour le diaphragme (ouverture plus ou moins grande pour la collection des photons). Le signal détecté par la caméra est enregistré, via deux fibres optiques, dans une mémoire flash servant de disque dur à l'ordinateur industriel, placé à côté de la boîte laser. L'utilisation d'une mémoire flash permet d'éviter toute détérioration d'un disque dur standard provoquées par les vibrations mécaniques ou acoustiques générées par les turbines aéronautiques lors des mesures sur banc moteur.

Cet appareil de mesure détecte le signal LII dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser. Le signal mesuré est ainsi intégré le long de l'axe du faisceau laser. Nous rappelons que l'image captée par la caméra est de forme circulaire et représente la somme des photons LII provenant de chaque section de l'impulsion laser qui traverse les particules de suie (cf. chapitre 2).

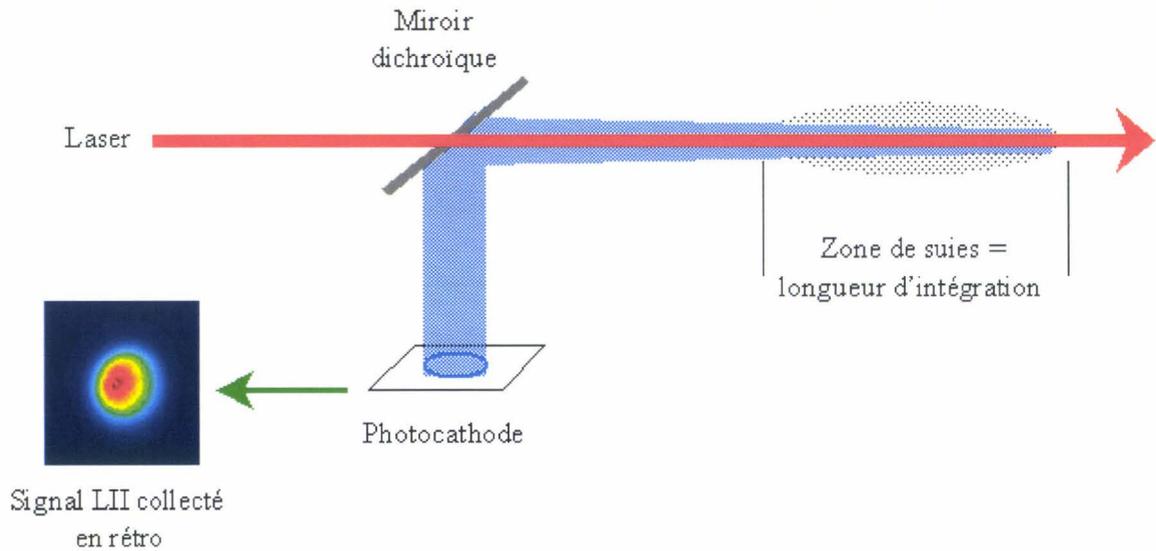


Figure 3.3 : forme du signal LII enregistré par une caméra CCD en configuration rétro. Le signal correspond à la somme des photons LII provenant de chaque section de la longueur d'intégration.

Ceci a pour avantage de réaliser des mesures quel que soit le diamètre du panache des gaz d'échappement des turbines aéronautiques. Cependant, l'intensité du signal mesurée par la caméra est fonction de la distance entre la caméra et la zone de mesure. En utilisant un corps noir, nous allons déterminer la réponse de la chaîne d'acquisition en fonction des différents paramètres (distance, longueur d'onde de détection).

3.1.2 Caractérisation de la chaîne de détection

La chaîne de collection du système est composée d'un prisme, d'une fenêtre en quartz, d'une lentille convergente, d'un miroir dichroïque, d'un miroir plan, d'un objectif (composé d'une bague macroscopique, d'un filtre et d'une lentille divergente) et d'une caméra. Tous ces éléments optiques sont fabriqués en BK7 (exceptée la fenêtre en quartz et le filtre). Leur transmission spectrale est de type passe haut avec une bande passante commençant vers 320 nm. La collection du signal LII dans le spectre visible n'est donc fonction que des caractéristiques spectrales du filtre de protection et de la photocathode de la caméra. Nous allons caractériser la réponse spectrale de la chaîne de détection en utilisant un corps noir, dont l'émittance spectrale est parfaitement connue (loi de Planck).

3.1.2.1 Réponse spectrale

L'émittance d'un corps noir est fonction de sa température. Au cours de cette thèse, un corps noir PYROX PY24 a été utilisé pour caractériser la réponse spectrale du système de détection AEROTEST. Dans un second temps, il nous a permis d'évaluer la température des flammes de kérosène produites par notre brûleur. Le corps noir a une puissance de 1,3 kW et atteint une température maximale de 1600°C. La partie active du corps noir est un four en matériau réfractaire de forme cylindrique de 200 mm de profondeur et de diamètre 24 mm. Une plaque métallique fixée sur la face avant réduit la surface d'émission à un diamètre de 12 mm.

3.1.2.1.1 Loi de Planck

La loi de Planck permet de connaître l'énergie émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde considérée et de la température de la surface émettrice. Selon cette loi, l'émittance monochromatique d'un corps noir, exprimé en $[W.m^{-3}]$, en prenant λ et T comme variables indépendantes s'exprime selon l'équation 3.1 :

$$M_{\lambda}^0 = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 \exp\left[\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]} \quad \text{Équation 3.1}$$

avec

$$C_1 = hc_0^2 = 0,59544.10^{-16} W.m^2$$

$$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,4388.10^{-2} m.K$$

$$h = 6,6262.10^{-34} J.s : \text{Constante de Planck}$$

$$k = 1,3806.10^{-23} J.K^{-1} : \text{Constante de Boltzmann}$$

$$c_0 = 2,9979.10^8 m.s^{-1} : \text{Vitesse du rayonnement électromagnétique dans le vide}$$

La représentation graphique de l'émittance montre que celle-ci permet de visualiser un maximum pour une température donnée (Figure 3.4). Ce maximum se déplace vers les courtes longueurs d'onde lorsque la température augmente ($\lambda_m T = 2897,8 m.K$). Cela signifie que pour des corps dont la température est inférieure à 3000 K, le rayonnement se situe principalement dans l'infrarouge. Le rayonnement maximum d'un corps se situe dans le visible lorsque sa température est comprises entre 3800 K et 7000 K. Dans le cas du phénomène d'incandescence induite par laser, les particules de suie atteignent une température maximale de l'ordre de 4000 K.

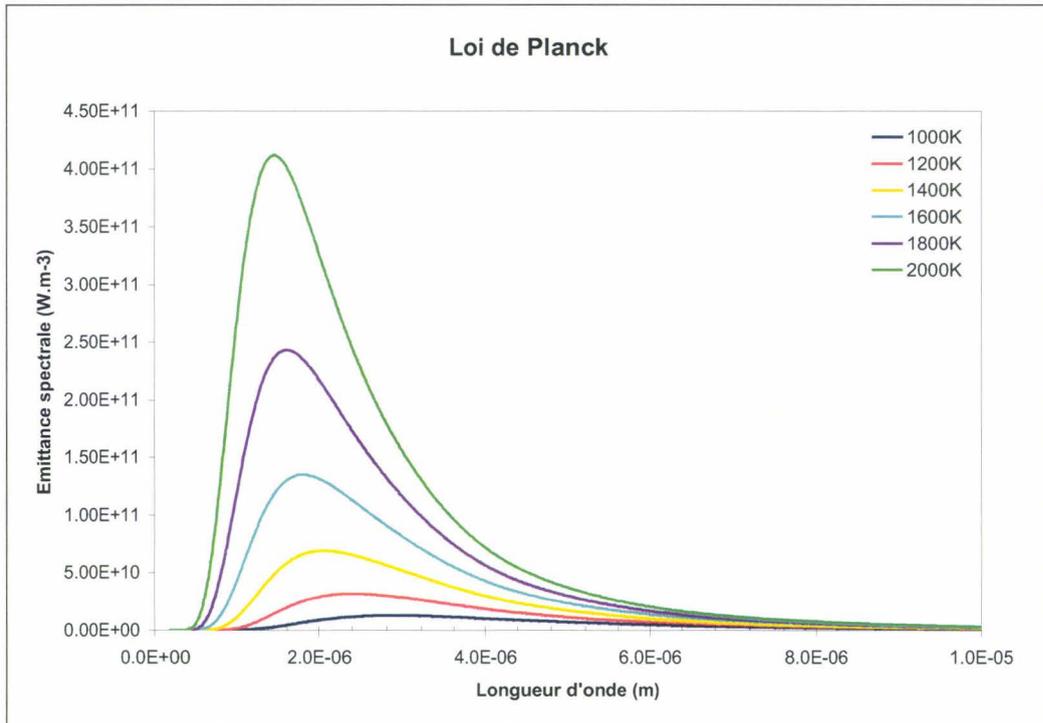


Figure 3.4 : Courbe d'émittance d'un corps noir en fonction de sa température et de la longueur d'onde.

La loi de Planck peut être simplifiée par la loi de Wien, pour des températures relativement basses. Si le terme $\frac{C_2}{\lambda T}$ est grand par rapport à 1 (c'est à dire $\lambda T \ll 1.44.10^{-2}$ m.K), l'équation de Planck se simplifie selon l'équation 3.2 :

$$M_{\lambda}^0 = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 \exp\left[\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right)\right]} \quad \text{Équation 3.2}$$

A partir de cette équation, il est très simple de montrer que le logarithme de l'émittance suit une loi linéaire du type (équation 3.3) :

$$\ln M_{\lambda}^0 = A + \frac{B}{T} \quad \text{Équation 3.3}$$

avec $A = \ln\left[\left(\frac{2\pi C_1}{\lambda^5}\right)\right]$

$$B = -\frac{C_2}{\lambda}$$

A partir de l'enregistrement du signal émis par le corps noir avec la caméra Dicam Pro, nous allons comparer la réponse spectrale de la chaîne d'acquisition à l'émittance du corps noir.

3.1.2.1.2 Mesures expérimentales

La luminance totale du corps noir a été collectée à deux longueurs d'ondes : 410 nm et 650 nm au moyen de deux filtres interférentiels de 10 nm de bande passante. Le corps noir était placé à 2,5 m du prisme de sortie de l'équipement LII. Parmi les différents éléments de la chaîne de détection, seuls la photocathode de la caméra et le filtre de l'objectif ont des caractéristiques évoluant entre 410 nm et 650 nm.

Les valeurs expérimentales du flux énergétique émis par le corps noir ϕ_1 et collectées par la caméra à travers la chaîne de collection sont affectées d'un coefficient de réponse τ , fonction des réponses spectrales des différents filtres utilisés :

$$\phi_1 = \tau L_1^0 S_1 \Omega_1 \quad \text{Équation 3.4}$$

où L_1^0 est la luminance du corps noir ($L_1^0 = \pi M_1^0$),

S_1 est la surface émettrice du corps noir,

Ω_1 est l'angle solide de collection ($\Omega_1 = S_2/d^2$ avec S_2 la surface de collection délimitée par le prisme et d la distance séparant les surfaces émettrice et réceptrice).

Ainsi :

$$\text{Ln } \phi_\lambda^{\text{exp}} = \text{Ln} \left(\frac{2 \tau_\lambda \pi^2 C_1 S_1 S_2}{\lambda^5 d^2} \right) - \frac{C_2}{\lambda T} \quad \text{Équation 3.5}$$

Ainsi, le flux énergétique mesuré par la caméra exprimé en échelle logarithmique doit être une droite en fonction de l'inverse de la température dont la pente est $\frac{C_2}{\lambda}$ et l'ordonnée à l'origine dépend du taux de transmission du signal. La Figure 3.5 montre une image type enregistrée par la caméra en provenance du corps noir.

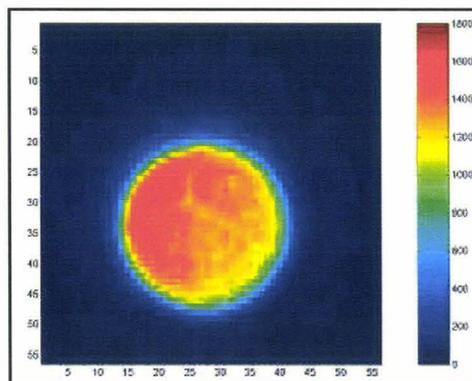


Figure 3.5 : Image type enregistrée par la caméra en provenance du corps noir.

Le signal a été enregistré sur une plage de 1373 K à 1673 K, pendant 7 s à 410 nm et sur une plage de 1273 K à 1673 K pendant 23 μ s à 650 nm. La Figure 3.6 représente l'évolution monochromatique à 410 nm et 650 nm du logarithme du signal en fonction de l'inverse de la température. Ces évolutions ont permis de déterminer une droite de régression linéaire pour chaque longueur d'onde, dont la pente a ensuite été comparée à la valeur théorique $\frac{C_2}{\lambda}$ déterminée par l'équation 3.3.

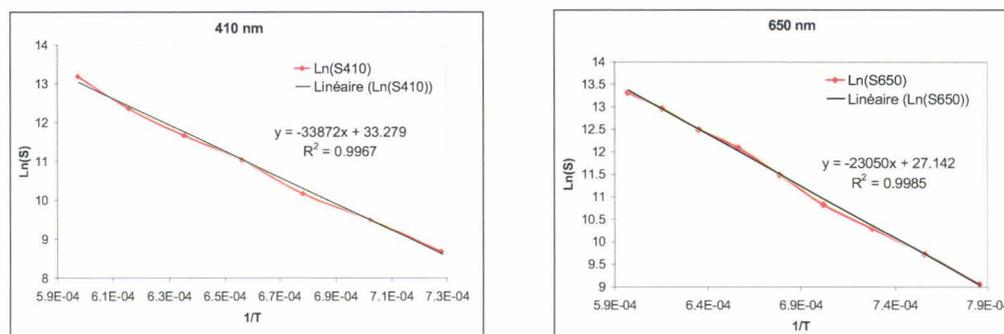


Figure 3.6 : Courbes montrant l'évolution du logarithme du signal en fonction de l'inverse de la température à 410 nm et 650 nm.

Les expressions logarithmiques des flux mesurés et calculés (les calculs ne prennent pas en compte les taux de transmission des filtres) sont données par les équations 3.6 et 3.7. Un excellent accord est obtenu pour les coefficients directeurs des droites ($\frac{C_2}{\lambda}$) calculés et mesurés. La différence observée entre les ordonnées à l'origine est due aux taux de transmission des filtres non pris en compte dans les calculs, ce qui permet de déterminer les coefficients de transmissions expérimentaux qui sont de 88% à 410 nm et 76% à 650 nm.

$$\text{Théorie} \quad \begin{cases} \ln \phi_{410}^0 = \frac{-35092}{T} + 38.014 \\ \ln \phi_{650}^0 = \frac{-22135}{T} + 35.710 \end{cases} \quad \text{Équation 3.6}$$

$$\text{Expérimentale} \quad \begin{cases} \ln \phi_{410}^{Exp} = \frac{-33872}{T} + 33.279 \\ \ln \phi_{650}^{Exp} = \frac{-23050}{T} + 27.142 \end{cases} \quad \text{Équation 3.7}$$

Dans le but de réaliser des mesures de température par pyrométrie à deux couleurs (cf. chapitre 4), le logarithme des rapports des flux mesurés à 410 nm et 650 nm a été déterminé en fonction de la température.

$$\ln \left(\frac{\phi_{410}^{exp}}{\phi_{650}^{exp}} \right) = \frac{-12960}{T} + 1.846 \quad \text{Équation 3.8}$$

3.1.2.1.3 Conclusion

Les coefficients directeurs des droites expérimentales représentées Figure 3.6 sont en accord très satisfaisant avec les valeurs théoriques basées sur la loi de Planck (équation 3.3). Ceci montre la bonne linéarité du système de détection sur le domaine de longueur d'onde sélectionné. Par ailleurs la détermination des taux de transmission τ_λ de la chaîne d'acquisition aux deux longueurs d'ondes sélectionnées permettra d'exploiter le rapport des flux aux deux longueurs d'ondes pour des mesures de température par pyrométrie à deux couleurs, ceci pour des particules de suie considérées comme des corps gris.

3.1.2.2 Effet de la profondeur de champ

Nous avons vu que le flux ϕ émis par une source émettrice, de luminance L , de section S_1 placée à une distance d d'un détecteur photosensible de section S_2 s'écrit :

$$\phi = L \frac{S_1 S_2}{d^2} \quad \text{Équation 3.9}$$

Dans le cas de notre dispositif, la mise au point de l'objectif est réalisée à une distance fixe d . Le concept de collection du signal LII en configuration rétro implique que le signal est collecté le long du faisceau laser de part et d'autre du point de focalisation. Afin de définir le

rôle de la profondeur de champ de ce dispositif, nous avons déplacé le corps noir par rapport au prisme et étudié la variation de l'intensité reçue par la caméra en fonction de la distance.

3.1.2.2.1 Dispositif expérimental

La mise au point de la caméra a été réalisée à 2,5 m de l'équipement laser, distance définie par le projet AEROTEST correspondant à celle séparant l'équipement LII à l'axe d'une turbine. Le corps noir a été déplacé de part et d'autre de ce point sur une distance de 50 cm par pas de 10 cm (Figure 3.7).

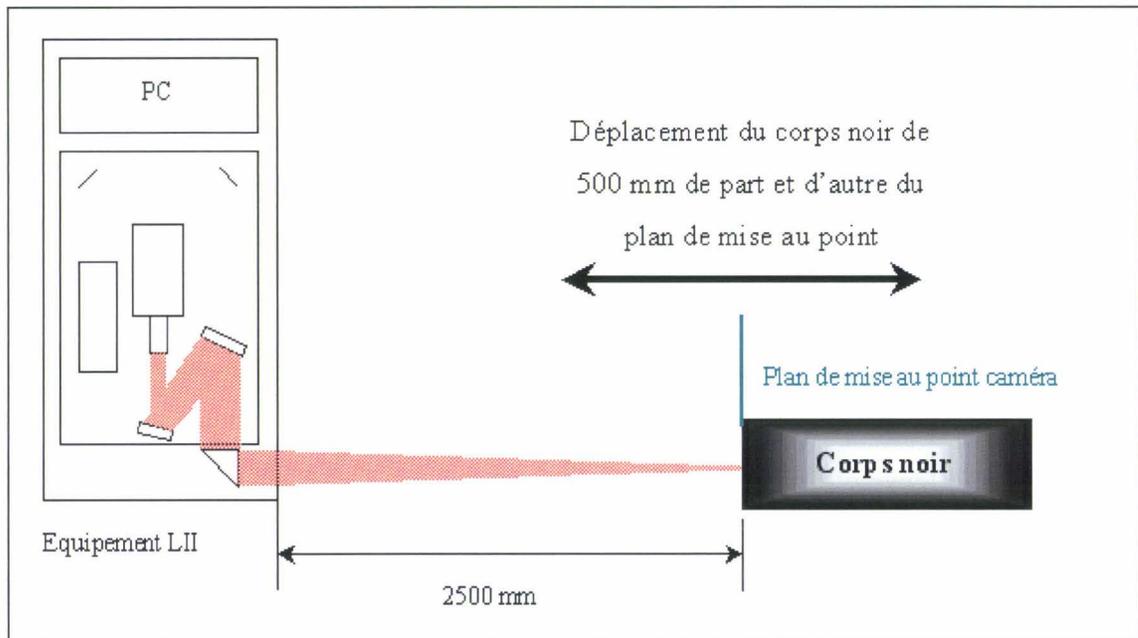


Figure 3.7 : Installation pour les mesures corps noir.

Les mesures ont été réalisées suivant trois ouvertures de diaphragme. Plus le diaphragme est ouvert, plus la profondeur de champ est faible (dans ce cas la profondeur de champ correspond à la distance autour du plan de focalisation pour laquelle l'image formée sur la photocathode de la caméra est nette). En utilisant une source stable telle que le corps noir, le nombre de photons collecté est proportionnel à l'ouverture du diaphragme. Ainsi, pour chaque ouverture, le temps d'exposition a été ajusté de façon à mesurer une intensité maximale sur le CCD de la caméra.

3.1.2.2.2 Résultats

Le corps noir est à une température de 1300°C. La Figure 3.8 montre l'évolution du signal du corps noir en fonction de la distance le séparant du prisme de sortie de l'équipement LII. Le signal présenté correspond à la plus petite ouverture étudiée mais les résultats sont similaires quelle que soit l'ouverture du diaphragme.

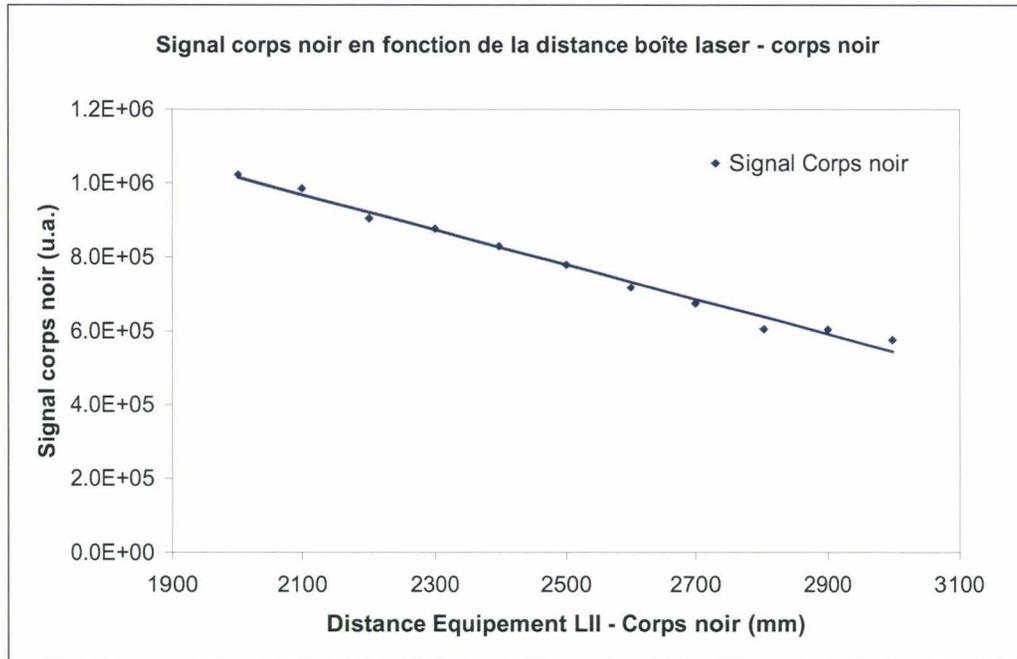


Figure 3.8 : Evolution du signal corps noir enregistré par la caméra en fonction de la distance

Le signal émis par le corps noir est enregistré de part et d'autre du plan de mise au point de la caméra sur une distance de 50 cm. Comme prévu le signal diminue lorsque la distance augmente. Sur cette distance et pour une émission de photons identique, le signal varie d'environ $\pm 20\%$ par rapport à la distance de mise au point. En pratique, il est donc possible de définir une fonction corrective pour corriger le signal LII provenant d'une source ponctuelle de particules de suie selon la distance la séparant du prisme. Cette correction peut être introduite lors de l'interprétation quantitative des signaux, à condition de connaître la distribution spatiale des particules de suie le long de l'axe d'intégration. C'est le cas par exemple lors du déplacement de notre brûleur de petite dimension le long du faisceau.

Dans le cadre du projet AEROTEST, les mesures sont intégrées le long de l'axe du faisceau laser sur une distance correspondant au diamètre D de la turbine ($\approx 300 \text{ mm} < D < 1.3 \text{ m}$). Sur cette distance, la distribution spatiale des particules de suie peut être inhomogène. La Figure 3.9 montre deux configurations pour lesquelles la localisation des

particules de suie dans les gaz d'échappement est différente. Sans correction de l'intensité mesurée par la caméra, la quantité de suies paraîtrait plus importante dans le cas A que dans le cas B.

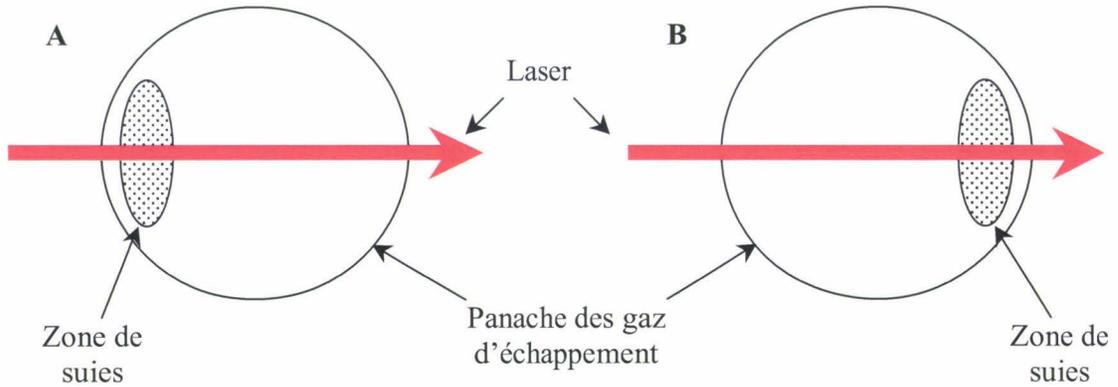


Figure 3.9 : Exemple de localisation des particules de suie dans les gaz d'échappement d'une turbine aéronautique. Sans correction de l'intensité LII mesurée par la caméra, la quantité de suies mesurée paraîtrait plus grande dans le cas A que dans le cas B.

La précédente correction ne peut donc pas être appliquée sans connaissance préalable de la distribution spatiale des particules de suie le long de l'axe laser. Elle ne sera donc pas utilisée dans le cadre de ce travail. Cependant, on notera que pour une distribution spatiale homogène, les intensités des signaux provenant de points symétriques par rapport au plan de mise au point (2.5 m) se compensent (Figure 3.8). La variation du signal reçu par la caméra a également été étudiée en déplaçant le corps noir sur une distance de 10 mètres par rapport au prisme et en réalisant une mise au point de l'objectif à chaque distance intermédiaire. Une loi en $1/d^2$ a été obtenue conformément à l'équation 3.9. Cette vérification atteste de la bonne linéarité de la chaîne de détection et pourra être exploitée pour des calibrages des signaux LII lorsque la distance turbine – dispositif LII sera différente de celle utilisée lors du calibrage à 2,5 m (cf. chapitre 4).

3.1.2.2.3 Conclusion

Le comportement de la chaîne de collection a été caractérisé sur le plan spectral et l'effet de profondeur de champ a été analysé. La linéarité du dispositif a été vérifiée et nous allons maintenant caractériser le volume de mesure qui correspond au recouvrement entre le volume du faisceau laser et celui occupé par les suies.

3.1.3 Détermination du volume de mesure

Cette caractérisation précise du volume de mesure est nécessaire pour le calibrage du dispositif et pour les futures mesures réalisées sur bancs moteurs. Le volume est déterminé par la forme du faisceau laser dans la zone de mesure contenant les suies. Celle-ci est définie par les caractéristiques spatiales du laser lui-même et par le télescope utilisé pour focaliser le faisceau laser.

3.1.3.1 Caractéristique énergétique du système

Le faisceau laser a une énergie de 170 mJ en sortie de tête laser, en passant à travers les différents éléments optiques, une partie de cette énergie est perdue par absorption. Les plus grandes atténuations de cette énergie sont dues au prisme de Glan (70% d'énergie absorbée) non adapté à 1064 nm et au prisme motorisé (20% d'énergie absorbée). Ainsi en sortie de l'équipement LII, l'énergie disponible n'est que de 35 mJ par pulse.

Le précédent projet AEROJET II a défini un télescope pour focaliser le faisceau laser à une certaine distance de l'équipement LII pour obtenir des mesures LII locales et donc spatialement résolues même en mode rétro. L'idée était que le signal émis par les particules de suie chauffées par le faisceau laser provenait d'une zone proche du point de focalisation. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, le signal d'incandescence est sensible à la densité d'énergie e_{laser} en [J.cm⁻²] donnée par la relation suivante :

$$e_{laser} = \frac{E_{laser}}{\pi D^2 / 4} \quad \text{Équation 3.10}$$

avec E_{laser} l'énergie laser en [J.pulse⁻¹] et D le diamètre du faisceau laser en [cm]. La connaissance du diamètre du faisceau laser le long de son axe de propagation est donc indispensable pour le calibrage du système.

3.1.3.2 Taille du faisceau laser

Etant donné que le projet AEROTEST prévoit une distance de 2,5 m entre l'équipement LII et l'axe de la turbine, le télescope a été réglé de façon à focaliser le faisceau laser à cette distance. La taille du faisceau laser au point de focalisation a été déterminée par la méthode du 'razor blade' [Wainner, 1999]. Cette méthode consiste à déplacer une lame de rasoir au sein du faisceau laser (supposé gaussien) et à mesurer l'énergie transmise. Ainsi, le

diamètre du faisceau est de 1,6 mm (mesuré à $1/e^2$) et augmente de façon quasi symétrique de part et d'autre de ce point, pour atteindre 4 mm à 35 cm du point de focalisation. La Figure 3.10 montre l'évolution du diamètre du faisceau laser autour du point de focalisation en fonction de la distance avec le dispositif laser. Le diamètre a été estimé à partir de l'impact laser sur un papier photosensible

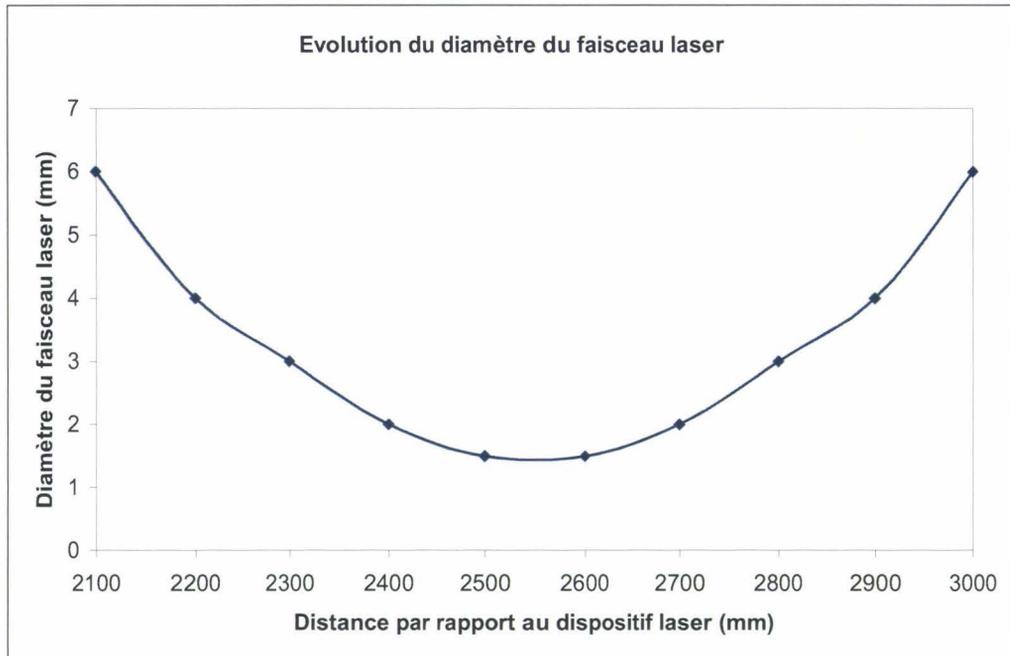


Figure 3.10 : Diamètre du faisceau laser autour du point de focalisation.

Le faisceau laser focalisé a ainsi une forme parabolique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, le régime de sublimation des particules de suie n'est effectif qu'à partir d'une densité d'énergie de $0,25 \text{ J.cm}^{-2}$ pour un faisceau gaussien. Dans notre cas, la variation du diamètre du faisceau laser entraîne une variation de la densité d'énergie proportionnelle à l'inverse du carré du diamètre du faisceau laser. Les phénomènes qui ont lieu dans ce volume de mesure varient ainsi rapidement, comme par exemple la sublimation des particules de suie, ce qui rend l'analyse des signaux complexe. Afin de mieux appréhender ces phénomènes, le brûleur Wolfhard Parker a été déplacé le long de l'axe laser autour du point de focalisation.

3.1.3.3 Le brûleur Wolfhard Parker

Afin de décrire le volume d'incandescence, nous avons déplacé une flamme suitée produite par un brûleur Wolfhard Parker le long de l'axe du laser, et enregistré le spot LII pour des distances par rapport à l'équipement LII comprises entre 2 et 3 mètres. Dans cette gamme de distance, la taille du faisceau laser est suffisamment petite pour être intégralement

balayé par les particules de suie, d'après l'étude détaillée réalisée sur ce brûleur dans une thèse précédente [Moreau, 2002]. Ce brûleur est constitué de trois fentes identiques par lesquels le comburant, mélange de O_2/N_2 , est injecté par les deux fentes périphériques, et le combustible par la fente centrale (chaque fente mesure 3 mm de large sur 35 mm de long). La combustion se situe à chaque interface combustible-comburant (Figure 3.11).

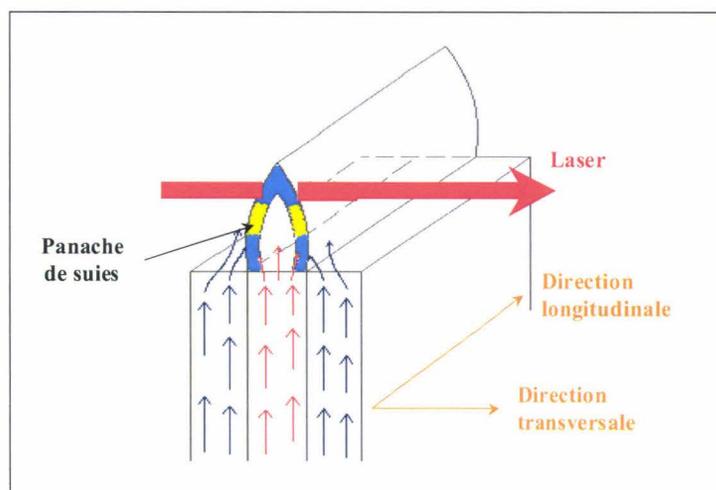


Figure 3.11 : Schéma du brûleur Wolfhard Parker.

Les deux flammes se rejoignent à une certaine hauteur, en fonction des débits de gaz contrôlés par des débitmètres massiques. Cette flamme, dite de diffusion, peut présenter un panache de suie selon la richesse globale des gaz.

La distribution spatiale des particules de suie dans la flamme étudiée est représentée Figure 3.12. Sur cette figure, le code de couleur correspond à la fraction volumique de suies exprimée en ppb.

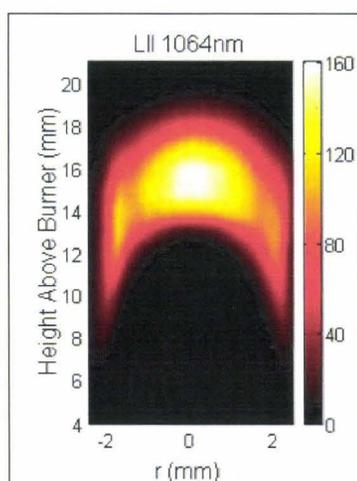


Figure 3.12 : Distribution spatiale des particules de suie exprimée en ppb dans la flamme du brûleur Wolfhard Parker d'après [Moreau, 2002].

A 15 mm au-dessus du brûleur, le laser traverse la zone la plus suitée. Le signal reçu par la caméra résulte de l'intégration spatiale sur la longueur transversale de la flamme soit approximativement 4 mm.

3.1.3.4 Caractérisation du volume d'incandescence

Le brûleur a été déplacé le long de l'axe laser et le signal LII a été enregistré. Ceci permet de déterminer les variations locales du signal LII en fonction de la densité d'énergie. Les mesures sont réalisées dans le sens transversal du brûleur (cf. Figure 3.11) et le signal d'incandescence a été enregistré par la caméra. La Figure 3.13 montre l'influence de la distance entre le système LII et le brûleur Wolfhard Parker sur l'intensité du signal LII intégré sur la largeur de la flamme pour différentes énergies laser (7, 12, 25 et 35 mJ/pulse). L'intensité du signal LII est la somme des intensités de chaque pixel sélectionné sur le CCD. Le point de focalisation se situe à 260 cm de la sortie du dispositif de mesure et le brûleur a été déplacé de 30 cm de part et d'autre de ce point. L'évolution du diamètre du faisceau laser est également représentée.

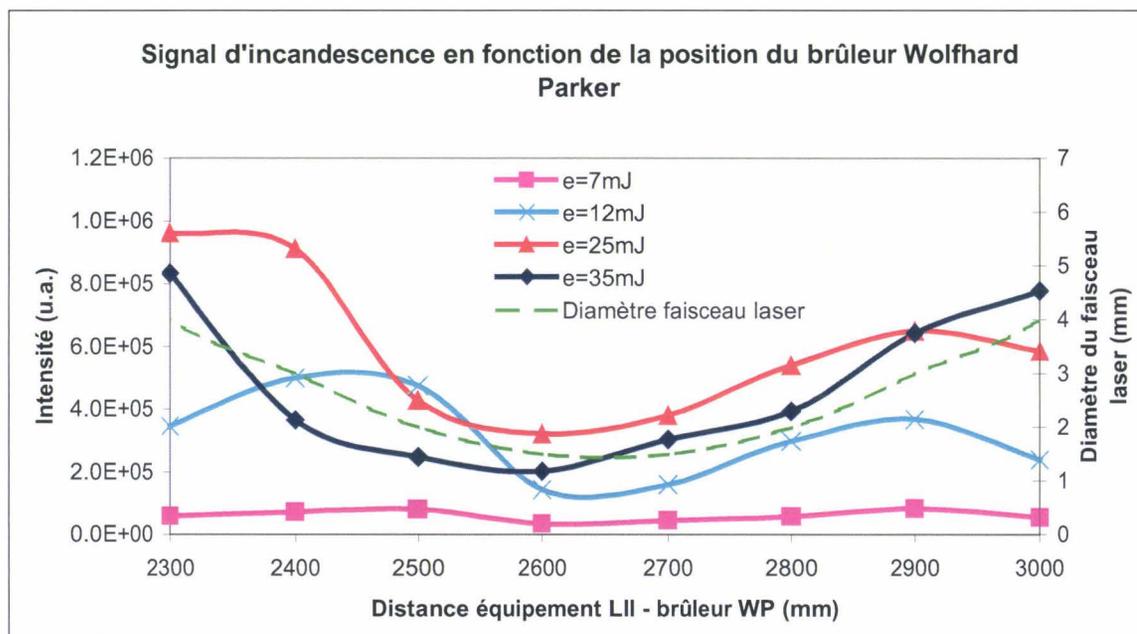


Figure 3.13 : Evolution du signal d'incandescence autour du point de focalisation.

Le signal LII est présent sur toute la distance balayée par le brûleur (70 cm) autour du point de focalisation. Contrairement à l'idée de départ, le signal a tendance à augmenter lorsqu'on s'éloigne du point de focalisation et ceci bien que la densité d'énergie laser moyenne soit plus faible. Cette tendance se retrouve quelle que soit l'énergie laser utilisée. La

Figure 3.14 montre les images enregistrées par la caméra à une hauteur de 12 mm dans la flamme.

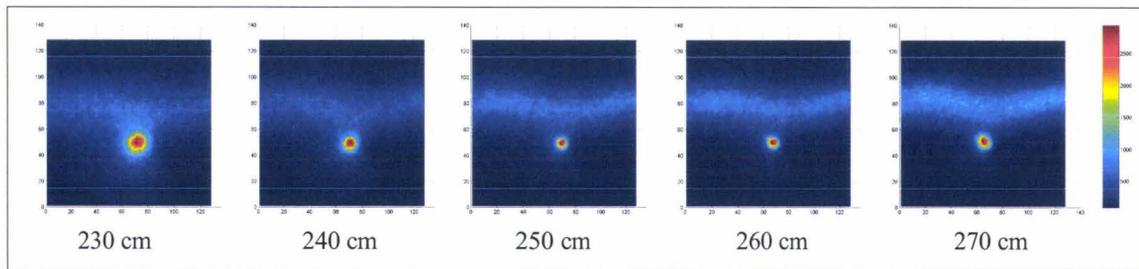


Figure 3.14 : Images du spot d'incandescence autour du point de focalisation pour une énergie de 7 mJ/pulse. De la gauche vers la droite, distance par rapport au système laser : 230 cm, 240 cm, 250 cm, 260 cm et 270 cm.

Cette étude a montré que le signal d'incandescence ne provient pas d'une zone centrée autour du point de focalisation, contrairement à l'hypothèse faite dans le projet AEROJET II. De plus, nous avons tenté de déterminer les limites de la longueur du volume de mesure en déplaçant le brûleur jusqu'aux limites techniques du banc. Malheureusement, l'ouverture des fenêtres d'accès au brûleur permettant le passage du faisceau laser et la taille de la flamme n'ont pas permis de déterminer ces limites.

3.1.3.5 Mise en évidence des effets de bord

Afin d'expliquer l'augmentation du signal LII de part et d'autre du point de focalisation, nous avons mené une étude à distance fixe en faisant varier l'énergie laser. Le diamètre du faisceau laser dans la flamme du brûleur Wolfhard Parker est de 3.6 mm (soit une position du brûleur d'environ 25 cm en amont du point de focalisation) et l'énergie laser est contrôlée avec l'atténuateur. Ceci permet d'avoir un bon compromis entre la dimension du spot laser enregistré sur la caméra et l'évolution du signal LII avec la densité d'énergie. La Figure 3.15 montre quelques images du signal LII en fonction de la densité d'énergie laser. Le code de couleur, proportionnel à l'intensité du signal, est le même pour chaque image. Pour de faibles énergies (jusqu'à $0,05 \text{ J.cm}^{-2}$) l'intensité du signal LII et le diamètre du spot augmentent. Au-delà de $0,05 \text{ J.cm}^{-2}$ l'intensité du signal LII n'augmente plus mais le diamètre du spot continue à s'élargir. A $0,34 \text{ J.cm}^{-2}$, l'image enregistrée présente une diminution du signal au centre du spot, en raison de la sublimation des particules de suie. Les courbes à gauche de chaque image représentent le profil horizontal du spot LII passant par son centre (en rouge) et le profil du faisceau laser (en bleu).

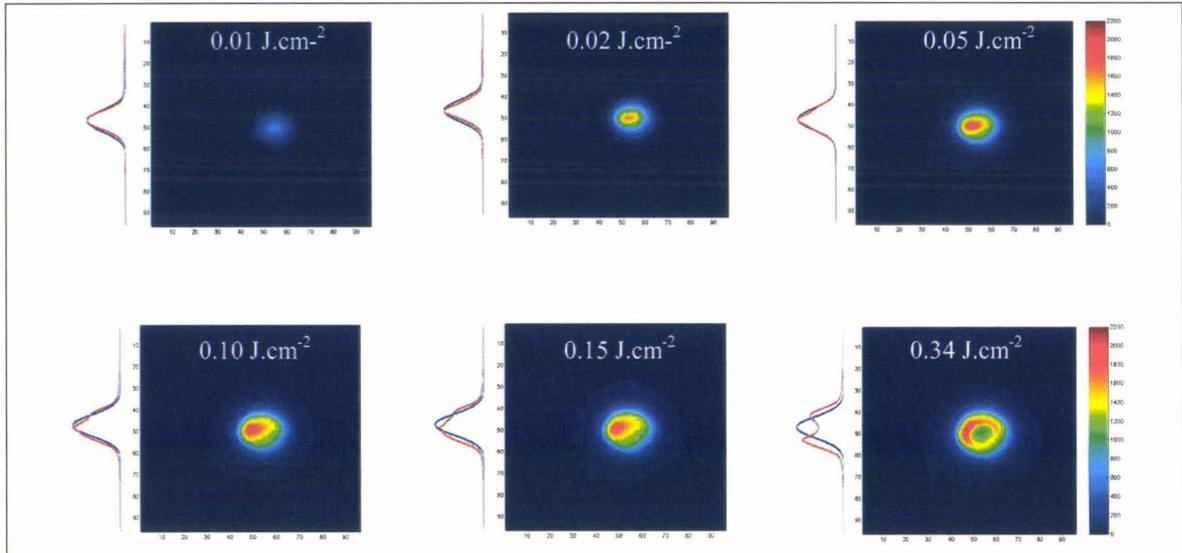


Figure 3.15 : Images LII enregistrées par la caméra CCD en fonction de la densité d'énergie laser. Le code de couleur est le même pour les six images.

L'augmentation de l'intensité du signal correspond à une augmentation de la température des particules de suie jusqu'à leur température de sublimation. L'élargissement du spot d'incandescence s'explique par l'augmentation de la densité d'énergie locale contenue dans les ailes du laser lorsque l'énergie laser augmente. Autrement dit, la densité d'énergie locale du laser permet de dépasser le seuil d'apparition du signal LII. Les profils montrent que le diamètre du faisceau laser et le diamètre du spot LII sont équivalents pour une densité de $0,05 \text{ J.cm}^{-2}$. Pour une densité plus faible, le diamètre du spot LII est plus petit que le diamètre du faisceau laser et, à l'inverse, pour une densité d'énergie plus grande, le diamètre du spot LII est plus grand.

Les phénomènes observés sont en bon accord avec les évolutions des signaux LII en fonction de la densité d'énergie rapportées dans la littérature pour différentes distributions de l'énergie laser. En effet, [Tait, 1993], en utilisant un faisceau laser gaussien, note que le signal LII croît avec la densité d'énergie, jusqu'à atteindre un plateau. La modélisation de ce phénomène a été réalisée pour des distributions de l'énergie laser gaussienne et homogène (*top hat*). Ces études numériques rendent bien compte de ce comportement. Pour une distribution d'énergie homogène, le signal croît puis diminue en fonction de la densité d'énergie. Cette diminution du signal LII s'explique par la sublimation des particules de suie dans tout le volume de mesure (Figure 3.16).

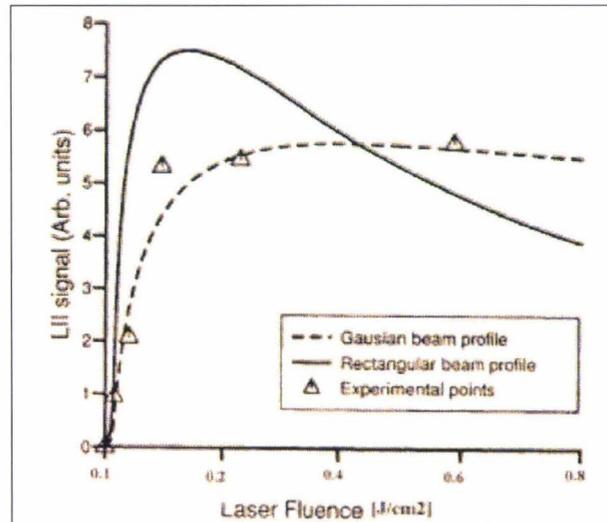


Figure 3.16 : Modélisation du signal LII en fonction de la densité d'énergie pour une distribution d'énergie gaussienne et une distribution homogène [Tait, 1993].

Lorsque le profil laser n'est pas de type homogène (distribution gaussienne) l'augmentation de la densité d'énergie entraîne une augmentation du volume de mesure dans lequel la densité locale d'énergie (dans les ailes du faisceau laser) dépasse le seuil d'apparition du signal LII [Ni, 1995], [Zizak, 2000].

Les études numériques ou expérimentales mettent bien en évidence les effets de la sublimation en fonction de la distribution spatiale de l'énergie laser. En revanche, les effets de bords qui se traduisent par une variation du volume de mesure effectif en fonction de la densité d'énergie ne sont abordés que de manière globale [Ni, 1995]. On explique l'apparition du plateau par un effet de compensation entre la sublimation et les effets de bord, mais aucune étude n'avait mise en évidence localement l'ampleur des effets de bord et quantifiée l'augmentation du volume effectif en fonction de la densité d'énergie moyenne. Cette connaissance est accessible idéalement avec la configuration rétro LII. Ceci est particulièrement intéressant pour valider la performance des modèles numériques LII. Dans cette optique, une expérience a été spécialement conçue au laboratoire afin de confronter les résultats expérimentaux et ceux de la modélisation. Pour des raisons de présentation, cette étude fondamentale est présentée en annexe. Elle a fait l'objet de deux publications : [Delhay, 2005], [Bladh, 2006]. La partie modélisation a été réalisée par l'université de Lund (Suède) avec laquelle nous collaborons dans le cadre du projet AEROTEST.

3.1.3.6 Conclusion

La caractérisation du dispositif rétro LII initial a montré que le signal d'incandescence collecté en configuration rétro LII provenait d'une zone très étendue. De plus, la variation de l'énergie laser a mis en évidence deux phénomènes : la sublimation et les effets de bords. Dans le brûleur Wolfhard Parker, ces phénomènes ne sont pas handicapant car la longueur d'intégration est de quelques millimètres, ce qui permet de considérer la densité d'énergie constante sur la longueur du volume de mesure. En revanche, dans les turbines aéronautiques où la répartition des particules de suie est inhomogène et la longueur d'intégration est grande, le signal provient de zones irradiées avec des densités d'énergies très différentes, ce qui complique l'analyse les résultats et la détermination de la fraction volumique de suies. Dans le cadre d'une collaboration avec l'université de Lund au sein du contrat AEROTEST, une modélisation des effets de bord et de la sublimation a été réalisée (par l'université de Lund) dans le cas d'une distribution d'énergie gaussienne et d'une distribution de suies homogène dans le volume de mesure. La Figure 3.17 illustre la variation du volume effectif LII en fonction de l'énergie laser incidente et de la forme du faisceau laser (focalisée ou non) selon deux directions d'observation (en configuration rétro et à angle droit).

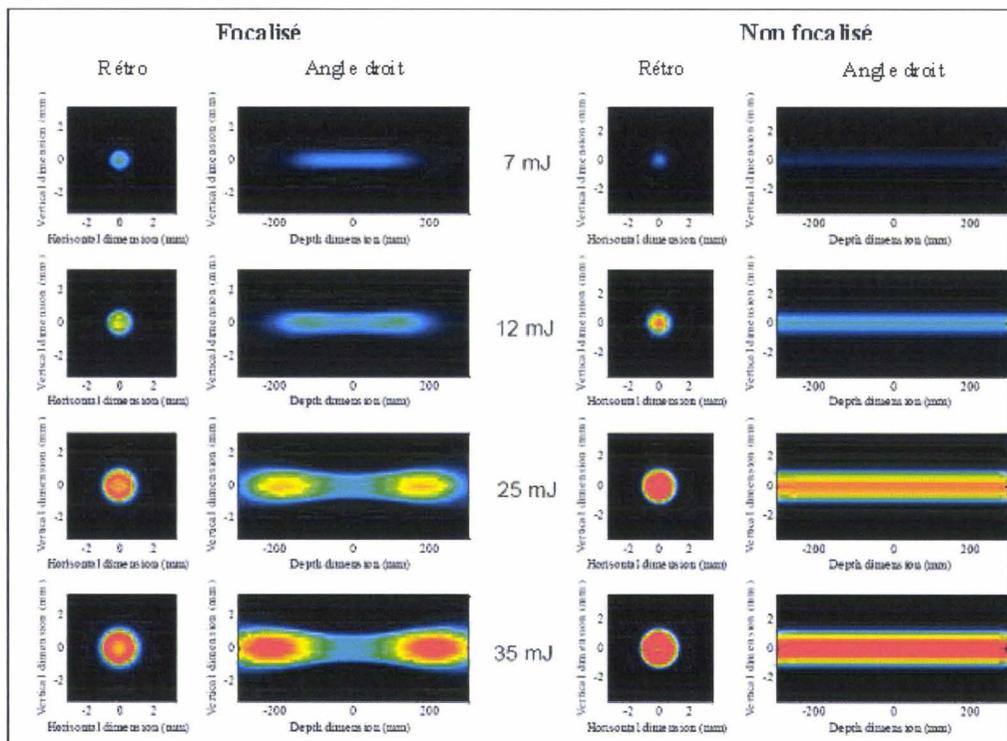


Figure 3.17 : modélisation du signal LII mesuré à angle droit et en rétro en fonction de la densité d'énergie laser et en fonction de la focalisation pour une distribution de suies supposée homogène dans le volume laser (réalisé par H. Bladh, université de Lund).

Les modélisations montrent bien l'intérêt d'une configuration non focalisée pour des applications dans les gaz d'échappement des turbines aéronautiques. Le système a donc évolué en retirant les lentilles du télescope et en n'utilisant que la divergence naturelle du faisceau laser. Cette modification a bien sûr entraîné d'autres modifications dans la chaîne d'acquisition du signal LII, dont nous faisons la description dans la section suivante.

3.2 Modification du système

Nous décrivons dans cette partie les nouvelles caractéristiques du volume de mesure et du signal LII en utilisant un laser non focalisé. Ainsi les évolutions successives du système LII ont été réalisées jusqu'à l'accomplissement de la version finale.

3.2.1 Caractérisation du volume de mesure

La Figure 3.18 montre l'évolution du rayon du faisceau laser CFR200 (divergence naturelle) en fonction de son éloignement de l'équipement LII. Le coefficient directeur de la droite de régression linéaire correspond à la divergence du faisceau laser.

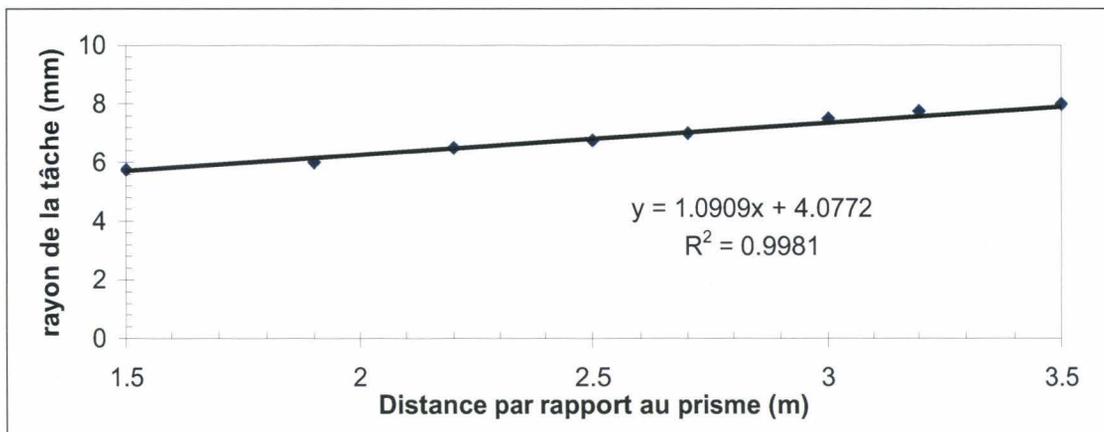


Figure 3.18 : Evolution du rayon du faisceau laser en fonction de la distance par rapport au prisme.

Pour une distance moyenne à 2,5 m, le diamètre de faisceau laser est de 14 mm. Par ailleurs, la divergence est de 1,1 mrad (sur une distance d'un mètre, le rayon du faisceau laser augmente de 1,1 mm). La densité d'énergie évolue ainsi moins rapidement qu'en utilisant le télescope. Comme pour la configuration focalisée, nous avons étudié l'évolution du signal LII en fonction de la distance par rapport à l'équipement LII.



3.2.2 Evolution du signal LII

La Figure 3.19 montre le signal LII enregistré par la caméra en fonction de la distance séparant l'équipement LII et le brûleur Wolfhard Parker, pour plusieurs énergies. Nous avons constaté que la densité d'énergie est trop faible pour atteindre la sublimation des particules de suie.

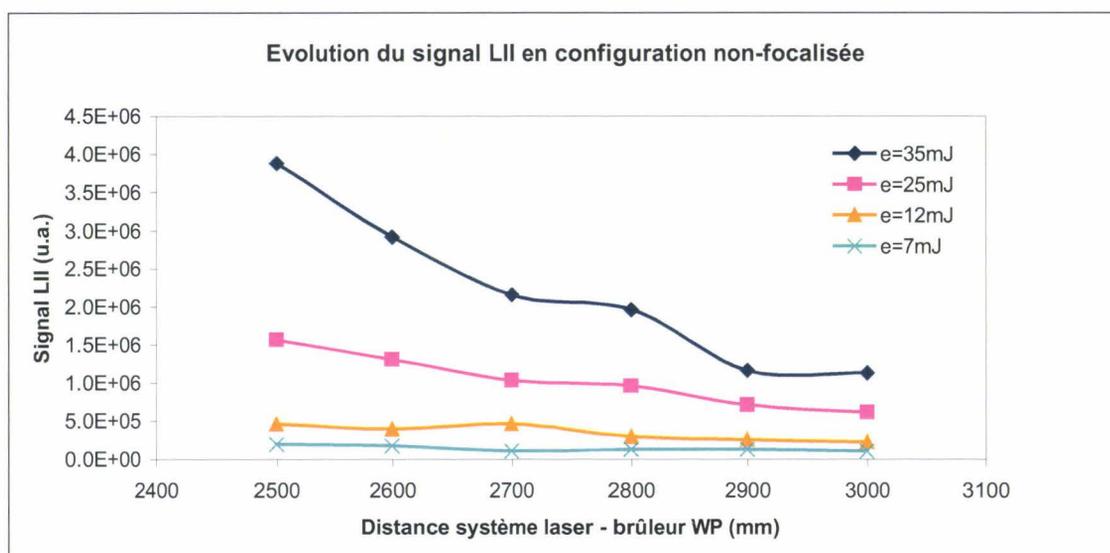


Figure 3.19 : Signal LII enregistré en fonction de la distance équipement laser – brûleur pour différentes énergies avec la configuration non-focalisée.

Quelle que soit l'énergie laser utilisée pour exciter les particules de suie produites par le brûleur Wolfhard Parker, le signal LII diminue lorsque le brûleur est éloigné. La première raison vient de l'augmentation du diamètre du faisceau laser due à sa divergence, ce qui entraîne une diminution de la densité d'énergie. Ceci a pour conséquence une diminution locale de la température atteinte par les particules de suie et donc du nombre de photons qu'elles émettent. La seconde raison a été mise en évidence précédemment. Le signal émis par une source constante et enregistré par un photo-détecteur diminue lorsqu'on augmente la distance entre l'émetteur et le récepteur. Cependant, cette analyse montre que le signal décroît sur toute la plage de mesure testée, ce qui rend l'analyse beaucoup plus simple qu'en configuration focalisée.

3.2.3 Optimisation du système

La suppression du télescope dans la chaîne d'excitation a entraîné un certain nombre de modifications dans la chaîne d'excitation et dans la chaîne de détection. La Figure 3.20

montre une photographie du système dans sa version finale. Nous décrivons dans les sections suivantes les modifications apportées au système, ainsi que la description du fonctionnement du logiciel.

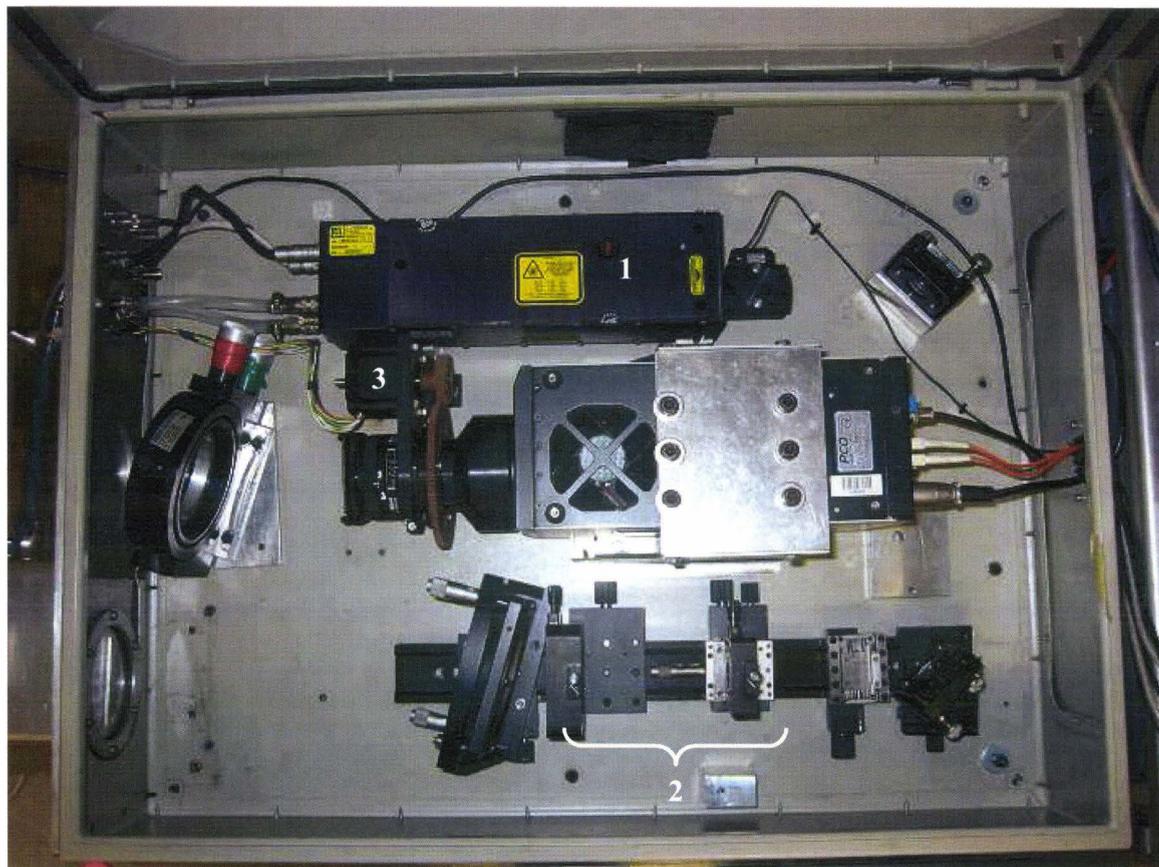


Figure 3.20 : Système LII dans sa version finale. (1) CFR400 équipé d'un atténuateur et d'un mesureur d'énergie, (2) Télescope pour limiter la divergence du faisceau laser, (3) Objectif de la caméra équipé d'un moteur pas à pas pour le contrôle du diaphragme.

Il est à noter que le pointeur laser émettant une radiation dans le visible et destiné à viser une cible correspondant à la zone de mesure et la photodiode destinée à déterminer l'intensité laser ont été supprimés du système car inadaptés aux conditions de mesure.

3.2.3.1 Chaîne d'excitation

Le système initial utilisait un laser CFR200, dont l'énergie était suffisante pour atteindre la sublimation des particules de suie au point de focalisation. Le retrait du télescope a permis d'avoir un volume de mesure plus grand à l'intérieur duquel la variation de la densité d'énergie est plus faible. Malheureusement, cette densité d'énergie est trop faible pour atteindre la région du plateau LII. Le laser CFR200 et l'atténuateur ont donc été remplacés au

profit d'un laser CFR400 (cf. chapitre 2), équipé d'un atténuateur d'énergie et d'un mesureur d'énergie. Les têtes laser CFR200 et CFR400 ont les mêmes dimensions, ce qui a permis de faire un simple échange standard. Les premiers tests réalisés avec le CFR400 à l'université RWTH ont montré un problème de sensibilité dû à la trop faible densité d'énergie laser. En effet, la divergence du faisceau laser du CFR400 (constatée à la réception) étant assez élevée, conduisait à un diamètre du faisceau de l'ordre de 17 mm au point de mesure. La densité d'énergie moyenne était tout juste suffisante pour atteindre le plateau LII. Il a donc été nécessaire d'introduire un nouveau télescope afin de compenser la divergence naturelle du faisceau laser afin d'obtenir une densité d'énergie suffisante dans le volume de mesure. Notons que la définition du télescope a été obtenue empiriquement. En effet, le caractère très multi-mode du laser CFR400 n'a pas permis d'opérer des calculs satisfaisants en optique gaussienne. Par tâtonnement et en expérimentant un grand nombre de combinaisons de lentilles convergentes et divergentes, nous avons obtenu un résultat satisfaisant de taille et de divergence du faisceau laser pour des études à 2,5 m du prisme. Le nouveau télescope sélectionné est formé de deux lentilles traitées à 1064 nm, de focales $f_4 = -75$ mm et $f_5 = 200$ mm et séparées d'une distance de 133,93 mm pour réduire la divergence dans la zone de mesure souhaitée. Cette configuration focalise le faisceau laser à une distance d'environ 3,3 m du prisme de sortie. La Figure 3.21 montre l'évolution du rayon du faisceau laser avec et sans télescope.

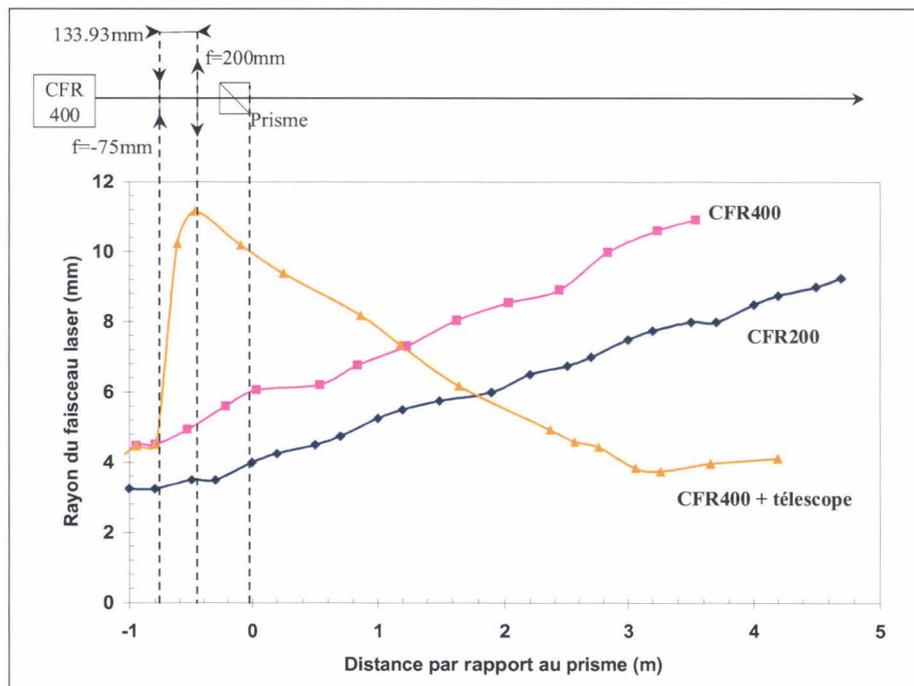


Figure 3.21 : Evolution du rayon du faisceau laser avec et sans télescope.

Typiquement à 2,5 m du prisme, l'adjonction du télescope permet d'augmenter d'un facteur 4 la densité d'énergie. Ainsi, le diamètre du faisceau laser est de 9,5 mm à 2,5 m du prisme et de 7,5 mm au point de focalisation (3,2 m).

3.2.3.2 Chaîne de détection

Dans sa version initiale, le dispositif LII comptait un télescope à trois lentilles. L'une de ces lentilles intervenait également dans la collection du signal LII (cf. figure 3.1) afin de former l'image du spot sur la caméra. La suppression du télescope initial a conduit à modifier les lentilles de collection. Ainsi, la lentille divergente et la bague macroscopique placées devant la caméra ont été supprimées pour enregistrer une image nette sur la photocathode de la caméra.

De plus au cours d'un essai sur turbine, il peut être nécessaire de faire varier l'ouverture du diaphragme de l'objectif lorsque le signal devient trop important. Un moteur pas à pas a été implanté dans le système dans le but de contrôler la bague du diaphragme de l'objectif. Ce moteur est contrôlé via un logiciel supplémentaire fourni par le concepteur (OPTOEL).

3.2.3.3 Logiciel

Dans la présentation initiale du système LII, nous n'avions pas décrit le logiciel de pilotage du système. La présentation suivante décrit en détail le logiciel final qui résulte d'améliorations successives apportées au logiciel initial.

Le logiciel développé par Auxitrol permet d'enregistrer soit une série d'images à une position donnée, soit de réaliser un balayage vertical à l'aide du prisme de sortie motorisé (pour parler de ce mode, on utilise généralement le mot anglais '*Scanning*'). La Figure 3.22 montre la fenêtre du logiciel.

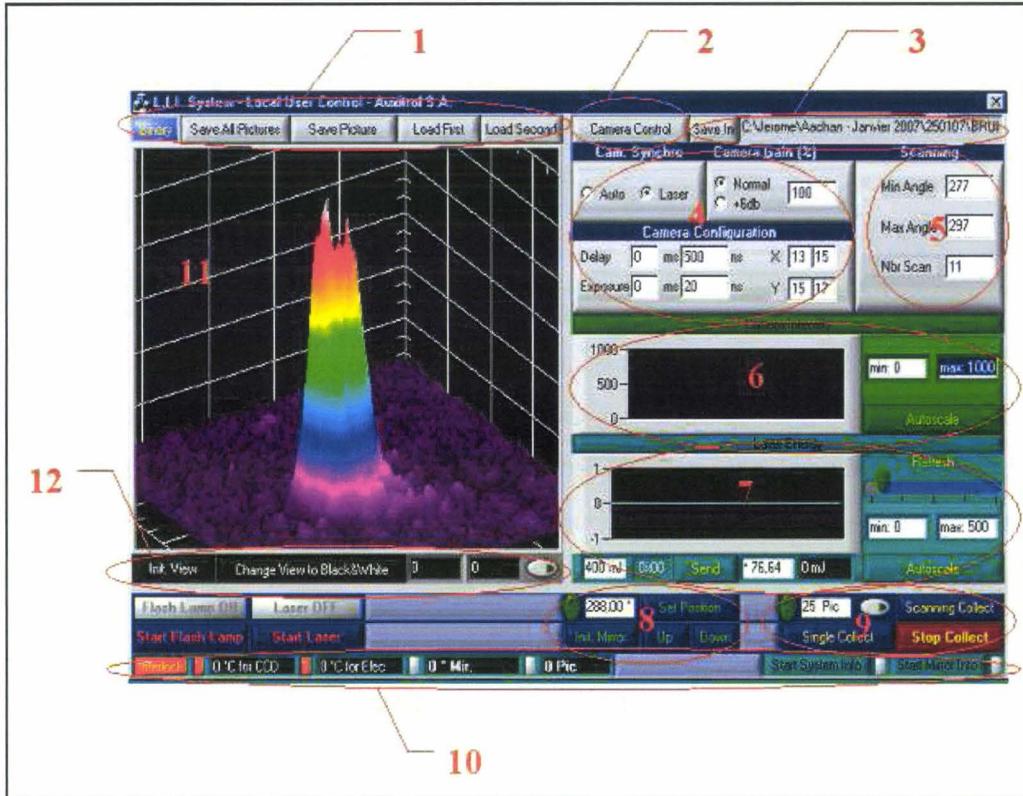


Figure 3.22 : Logiciel du système LII.

1. **Sauvegarde et chargement.** Ces boutons permettent d'enregistrer toutes les images collectées 'Save All Pictures' ou la dernière image 'Save Picture' et de charger une et/ou deux images 'Load First' et 'Load Second'. Le bouton 'Binary' permet d'enregistrer les fichiers au format binaire pour une plus grande rapidité de vitesse d'enregistrement (fichiers plus petits qu'en mode ASCII). L'inconvénient de ce format est qu'il n'est pas exploitable à partir des logiciels comme Excel ou Matlab. Il faut les transformer en format ASCII à l'aide d'un exécutable 'bintotext.exe'. Il est possible de choisir le format d'enregistrement : soit 'Binary' soit 'text', en cliquant sur ce bouton.

2. **Panneau de contrôle de la caméra.** Ce bouton 'Camera Control' permet d'accéder aux fonctions de la caméra. Les principales informations sont directement accessible à partir de 4.

3. **Chemin d'accès.** Le bouton 'Save in' permet d'indiquer le chemin pour l'enregistrement des fichiers en mode Scan.

4. **Contrôle de la caméra.** Cette zone permet de contrôler les principales fonctions de la caméra : synchronisation de l'ouverture de la caméra en automatique ou en externe (déclenchement à partir d'un signal électrique du laser), gain de la caméra, temps de

délai '*Delay*' pour la synchronisation et temps d'exposition du CCD '*Exposure*', et région du CCD sélectionnée '*X*' et '*Y*', communément appelé '*region of interest*'

5. **Scanning.** Ces fenêtres permettent d'indiquer les angles minimum '*Min Angle*' et maximum '*Max Angle*' de balayage ainsi que le nombre de positions '*Nbr Scan*' en mode *Scanning*.

6. **Informations sur les images visualisées.** Cette zone est composée d'un graphique représentant l'intensité maximale (en ordonnées) atteinte par les pixels d'une image collectée. L'échelle de l'intensité est contrôlée soit automatiquement '*Autoscale*', soit en déterminant les valeurs minimale et maximale. A noter que l'abscisse correspond au nombre d'images et représente les 200 dernières images collectées.

7. **Réglage de l'énergie laser.** Cette partie permet de contrôler l'atténuateur du laser CFR400 et de mesurer l'énergie en sortie de la tête laser. La consigne d'énergie est réglable à partir de la case blanche. Le bouton '*Send*' permet de valider cette consigne. L'énergie mesurée est affichée dans la case noire et peut être suivie simultanément sur le graphique. L'échelle peut être contrôlée soit automatiquement '*Autoscale*' soit manuellement en indiquant les valeurs minimale et maximale du graphique. La barre '*Refresh*' permet d'augmenter ou de diminuer la vitesse de rafraîchissement.

8. **Réglage de l'angle du prisme.** Le prisme de sortie du système est contrôlé par un moteur pas à pas. L'angle du prisme correspond à l'angle du moteur. Il est réglable à partir de la case blanche. Le bouton '*Init. Mirror*' permet d'atteindre l'angle 0. Le bouton '*Set Position*' permet de positionner le prisme à l'angle indiqué dans la zone blanche. Les boutons '*Up*' et '*Down*' permettent de déplacer le miroir par pas vers le haut ou vers le bas.

9. **Boutons de marche/arrêt de collecte d'images.** La zone en blanc permet d'indiquer le nombre d'images à collecter (valeur comprise entre 1 et 1000). Il est possible de réaliser soit une collecte simple '*Single Collect*' du nombre d'images, soit de réaliser un balayage avec le prisme '*Scanning Collect*'. Pour le mode '*Scanning Collect*', pour chaque position du prisme, un fichier est créé dans lequel les images sont enregistrées. Le bouton '*Stop Collect*' permet d'interrompre la collecte d'image, quel que soit le mode choisi.

10. **Boutons d'information du système.** Les boutons '*Start System Info*' et '*Start Mirror Info*' permettent de connaître la température du CCD et de l'électronique de la caméra, l'angle du prisme et du nombre d'images en cours de collection. Leur activation est symbolisée par une lumière clignotante à côté du bouton. Il faut noter que leur activation

ralentit le fonctionnement de l'ensemble du logiciel, principalement au moment de la collecte des images.

11. **Visualisation du signal.** Le signal peut être visualisé en 2D ou 3D. A l'aide de la souris, il est possible d'agrandir et de déplacer le graphique.

12. **Boutons de contrôle de l'image.** Le bouton '*Init. View*' permet de repositionner l'image dans sa version initiale (visualisation de l'image en 2D). Le bouton '*Change View to Black&White*' permet de visualiser l'image en noir et blanc. Les deux cases supplémentaires permettent de connaître l'intensité minimale et maximale des pixels de l'image affichée.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre, les évolutions successives du dispositif LII ont été décrites. Ces évolutions sont liées aux objectifs suivants : (1) réaliser des mesures quantitatives de suies en turbine et (2) augmenter la sensibilité de la technique rétro-LII. Nous avons montré que la version initiale focalisée ne permettait pas d'atteindre le premier objectif du fait de l'inhomogénéité trop importante de la distribution d'énergie laser 'effective' au sein du volume de mesure. Ce volume de mesure est en effet très sensible à la distribution énergétique du fait de la présence des effets de bord et de la sublimation des particules de suie. C'est pourquoi nous avons opté pour une version non focalisée. Le laser commercial trop divergent nous a contraints à incorporer à nouveau un télescope à deux lentilles pour compenser la divergence naturelle du faisceau laser. Enfin, nous avons précisé les caractéristiques spectrales, énergétiques et spatiales du dispositif LII et son pilotage automatique a été décrit. La vérification de la linéarité du système permet de garantir l'opérationnalité de la procédure de calibrage présentée au chapitre 4.

**CHAPITRE 4 : CALIBRAGE DU DISPOSITIF
LII DANS UNE FLAMME DE KEROSENE**

4 Calibrage du dispositif LII dans une flamme de kérosène

Dans ce chapitre, nous présentons la méthode mise en œuvre au laboratoire pour calibrer le système LII. Nous avons déjà présenté au chapitre 2 le système conçu au laboratoire pour la production de particules de suie de kérosène. Ce système est composé d'un brûleur de chaudière domestique produisant une flamme tourbillonnante et connecté à une cheminée munis de différentes ouvertures pour la mesure de la fraction volumique de suies et l'enregistrement des signaux rétro LII et à angle droit. Les premiers tests décrits dans ce chapitre permettront de déterminer les conditions de mesures dans la flamme et dans la cellule de calibrage. Ensuite, la fraction volumique de suies, mesurée par la technique d'extinction, sera reliée au signal LII par comparaison des signaux en fonction des conditions de combustion et d'acquisition du signal.

4.1 *Caractérisation du brûleur kérosène*

Nous avons effectué des mesures LII dans différentes zones de la cheminée. Dans un premier temps, nous avons étudié la distribution de particules de suie au sein de la flamme (hublot 1) en utilisant la configuration à angle droit, ainsi que le signal intégré le long de l'axe laser en configuration rétro.

4.1.1 Distribution spatiale des particules de suie dans la flamme

Des mesures LII ont été effectuées dans la flamme du brûleur kérosène à angle droit pour déterminer la distribution spatiale des particules de suie en tir à tir puis en accumulant un certain nombre de tirs. Ces mesures ont ensuite été comparées aux mesures obtenues en rétro LII. Les expériences ont été réalisées avec le laser Brilliant (diamètre du faisceau à 2,5 m : 6 mm).

4.1.1.1 Signaux LII enregistrés en tir à tir

Les résultats obtenus en rétro ont été enregistrés avec la caméra Dicam Pro en configuration non focalisée et les résultats obtenus à angle droit ont été enregistrés avec la caméra Princeton Instrument. Comme cela a été évoqué au cours du chapitre 2, le déflecteur installé sur le nez du brûleur donne un effet tourbillonnaire à la flamme (généralement appelé

swirl). Ceci permet de garder la flamme accrochée au nez du brûleur, mais a pour conséquence de produire une combustion très turbulente. La Figure 4.1 représente une séquence de signaux LII mesurés à angle droit. Chaque image correspond à un tir laser. Les valeurs de l'axe des abscisses et de l'axe des ordonnées est en pixel et chaque pixel correspond à 0,328 mm dans la flamme. Ainsi, chaque image correspond à une surface d'environ 13 mm × 171 mm. Comme le montre la Figure 4.1, la répartition et les quantités des particules de suie sont très inhomogènes d'une image à l'autre.

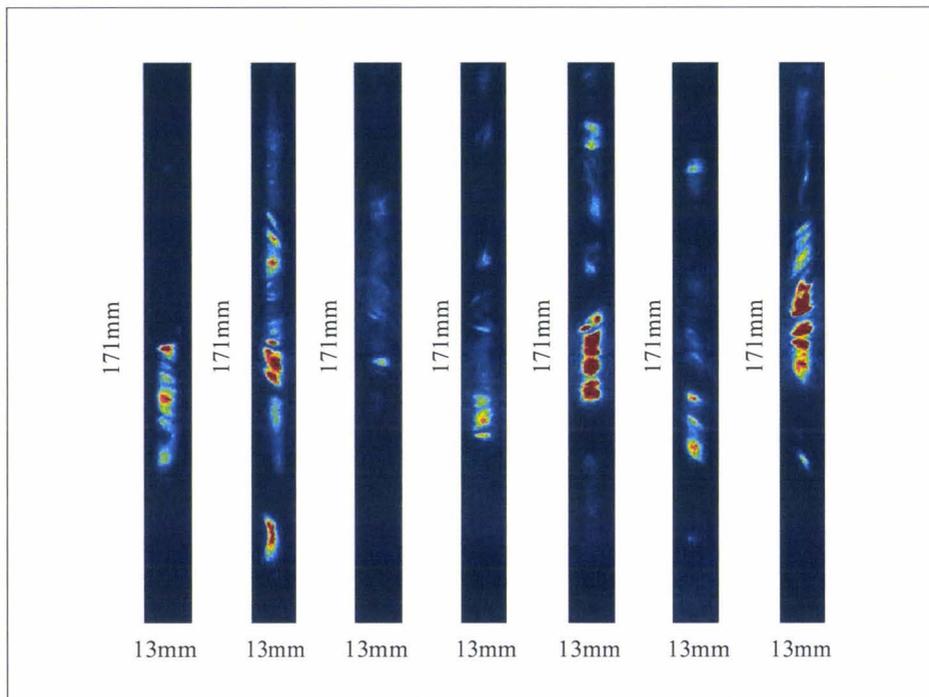


Figure 4.1 : Signal LII mesuré à angle droit avec le laser Brilliant. Cette représentation permet de rendre compte de la répartition spatiale des particules de suie dans la flamme (hublot 1).

La Figure 4.2 montre le signal LII enregistré en rétro pour des tirs laser individuels. L'intensité du signal LII, qui représente la fraction volumique de suies intégrée le long du volume de mesure varie d'environ un facteur 3, ce qui traduit bien cette inhomogénéité dans la flamme en tir à tir.

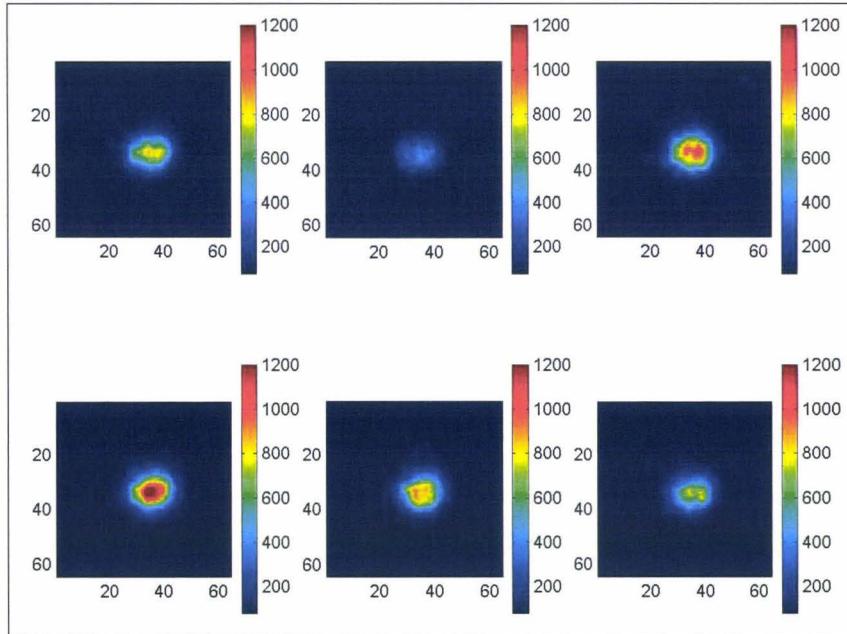


Figure 4.2 : Signal LII enregistré en rétro avec le laser Brilliant dans la flamme de kérosène (hublot 1).

A travers ces mesures, il apparaît que les signaux LII enregistrés en tir à tir sont très fluctuants. Nous avons donc décidé de procéder à des accumulations d'images afin d'étudier l'effet de l'ouverture du volet d'air qui alimente le brûleur sur l'intensité d'incandescence recueillie.

4.1.1.2 Signaux LII par accumulation d'images

Pour déterminer le profil moyen de suies dans la flamme, nous avons réalisé une accumulation de 200 images individuelles pour obtenir un signal reproductible. Notons qu'une accumulation plus importante n'améliore pas la qualité des signaux. La Figure 4.3 représente le signal LII enregistré pour un volet d'air de 0,85 après une accumulation de 200 tirs individuels mesurés à angle droit. Le graphique représente le profil des signaux enregistrés en fonction de l'axe radial de l'enceinte de combustion. La courbe bleue représente le profil spatial du signal LII (somme de l'intensité des pixels suivant l'axe de détection). Cette répartition peut être comparée à une fonction gaussienne (courbe rouge) centrée sur l'axe de la flamme. La courbe jaune représente le profil de l'émission propre de la flamme, qui a été retranchée au signal LII brut. On peut noter une légère asymétrie du profil du signal LII, qui peut être attribuée à la diminution de la densité d'énergie du laser lors de la traversée dans la flamme.

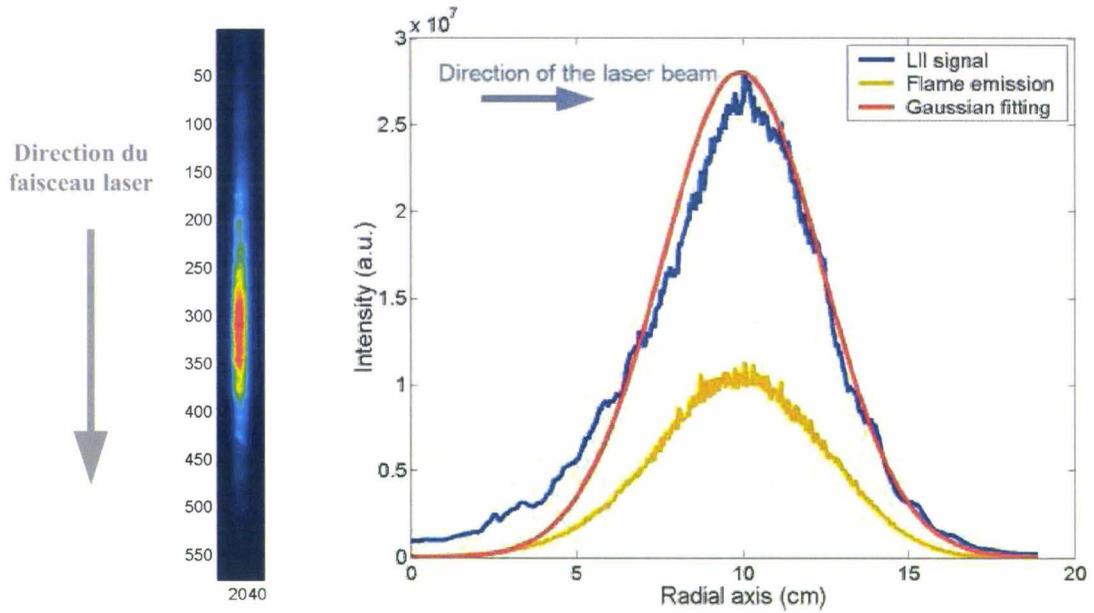


Figure 4.3 : Signal LII enregistré à angle droit pour un volet d'air de 0.85 représentant une accumulation de 200 tirs individuels. La distribution spatiale est de forme gaussienne.

La longueur du volume de mesure a été déterminé à $1/e^2$ de l'intensité maximale. Dans ces conditions de richesse de flamme, la longueur du volume de mesure est de 10 cm, mais évolue suivant l'ouverture du volet d'air.

4.1.2 Température de la flamme

La densité d'énergie apportée par le faisceau laser doit être plus ou moins importante pour atteindre la température d'activation du phénomène LII pour des températures initiales des particules de suie différentes. Dans notre cas, nous considérons que la température des particules de suie est équivalente à la température de la flamme car les particules sont supposées de tailles nanométriques. Les études théorique et expérimentale sur la réponse spectrale du système LII réalisées au chapitre 3 vont permettre d'estimer la température des particules de suie. Cette détermination est basée sur la technique de pyrométrie à deux couleurs.

Cette technique décrite en détail par [Zhao, 1998] permet de déterminer la température moyenne d'un milieu radiatif à partir des signaux enregistrés à deux longueurs d'ondes différentes. [Snelling, 2005] utilise la pyrométrie à deux couleurs pour calibrer son système de mesure LII et pour déterminer la fraction volumique absolue des particules de suie à l'échappement des moteurs diesel. La mesure des températures nécessitent la connaissance

des propriétés optiques des particules de suie en fonction de la longueur d'onde et de la température. Faute de données suffisantes dans la littérature nous avons supposé que la fonction d'absorption $E(m)$ est constante quelle que soit la température des particules de suie. Pour les mesures de température de surface des particules de suie, nous supposons que les particules sont des corps gris, c'est à dire que leur coefficient d'émissivité est constant sur la gamme spectrale étudiée (ici de 410 nm à 650 nm).

Une moyenne de 200 images a été réalisée pour obtenir un signal stable dans le temps. Les largeurs des portes d'exposition et les ouvertures du diaphragme de la caméra ont été ajustées pour chaque filtre interférentiel et pour chaque condition expérimentale. La température des particules de suie est ensuite calculée à partir de l'équation déterminée au chapitre 3 (cf équation 3.8). Les conditions expérimentales et les températures calculées pour deux conditions de production de suies (volet d'air 0,8 et 0,9) sont résumées dans les tableaux 4.1 et 4.2.

<i>Volet d'air = 0,8</i>		
	<i>410 nm</i>	<i>650 nm</i>
Conditions expérimentales	Temps d'exposition : 800ms Ouverture caméra : f/8 Densité neutre : 10^{-1}	Temps d'exposition : 800ms Ouverture caméra : f/11 Densité neutre : 10^{-3}
Température	Flamme : 1850 K	

Tableau 4.1 : conditions expérimentales de la mesure de température par pyrométrie à deux couleurs et résultats pour un volet d'air de 0.8.

<i>Volet d'air = 0,9</i>		
	<i>410 nm</i>	<i>650 nm</i>
Conditions expérimentales	Temps d'exposition : 800ms Ouverture caméra : f/11 Densité neutre : 10^{-1}	Temps d'exposition : 800ms Ouverture caméra : f/11 Densité neutre : 10^{-3}
Température	Flamme : 1980 K	

Tableau 4.2 : conditions expérimentales de la mesure de température par pyrométrie à deux couleurs et résultats pour un volet d'air de 0,9.

Ces résultats ont été comparés à des mesures réalisées avec un pyromètre commercial à deux couleurs (pyromètre Mikron IS 8-GS plus) au niveau de la flamme. Les températures déterminées étaient de 1900 K pour un volet d'air de 0,8 et de 2100 K pour un volet d'air de 0,9, ce qui correspondait respectivement à un écart de 2,7% et 5,7% avec nos mesures réalisées avec le dispositif rétro-LII.

4.1.3 Conditions de mesure dans la cellule de calibrage

La position éloignée de la cellule de calibrage par rapport à la flamme et la diminution de section de la cheminée contribue à une diminution des turbulences de l'écoulement. Ainsi, les mesures dans la cellule de calibrage permettent d'avoir des conditions plus homogènes en terme de température, d'écoulement et de répartition spatiale des particules de suie. Le calibrage du système LII sera donc plus aisé. Par ailleurs, nous montrerons que les températures des particules des suies dans la cellule de calibrage sont plus proches de celles des gaz d'échappement des turbines aéronautiques, ce qui rend les mesures de calibrage au laboratoire plus réalistes.

4.1.3.1 Distribution spatiale des suies

Nous avons dans un premier temps déterminé la distribution spatiale des particules de suie au sein de l'écoulement. Pour cela, nous avons utilisé le laser CFR400 pour une densité d'énergie de $0,15 \text{ J.cm}^{-2}$. Le graphique de la Figure 4.4 montre la distribution radiale normalisée des particules de suie au sein de l'écoulement dans la cellule de calibrage pour différents volets d'air. L'image placée sur la droite du graphique est une moyenne de 10 images individuelles enregistrées pour un volet d'air de 0,85. La distribution radiale est obtenue en faisant la somme des pixels suivant le sens de l'écoulement des gaz brûlés. Contrairement aux mesures réalisées dans la flamme dans laquelle la répartition des particules de suie était très inhomogène, la distribution spatiale dans la cellule de calibrage est homogène sur quasiment tout le diamètre de la cellule, quel que soit le volet d'air. Il faut cependant noter une légère diminution du signal LII dans le sens de propagation du faisceau laser probablement due à une atténuation de l'énergie laser par absorption des particules de suie.

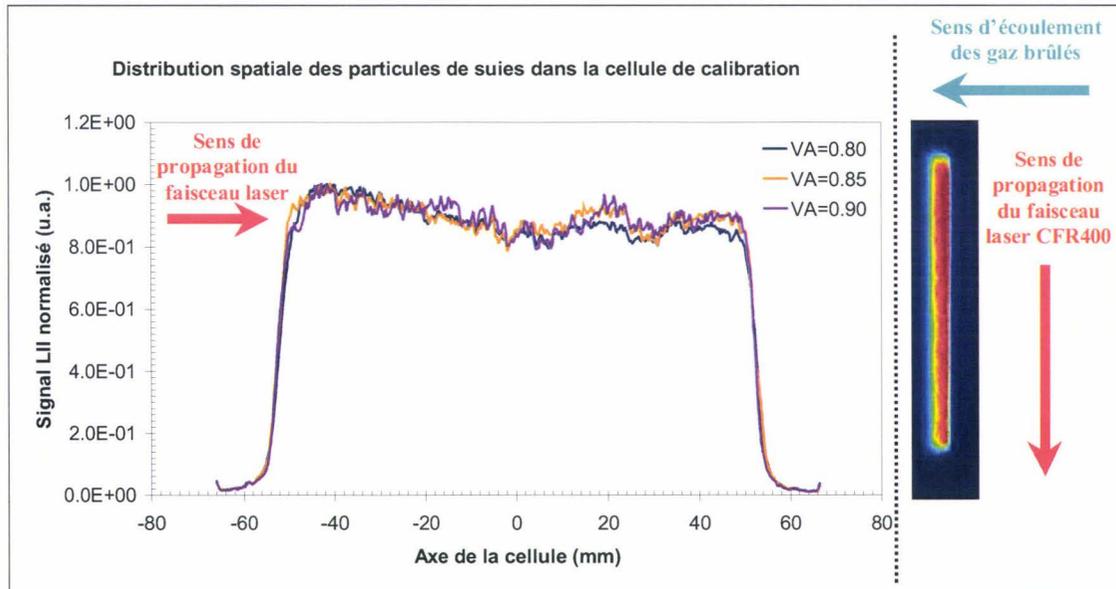


Figure 4.4 : Distribution spatiale des particules de suie au sein de l'écoulement au niveau de la cellule de calibrage pour différents volets d'air (VA) et exemple d'image enregistrée par la caméra CCD à angle droit.

La longueur du volume de mesure déterminée à mi-hauteur (FWHM) est de 10,4 cm quel que soit le volet d'air, longueur prise en compte dans les mesures par extinction.

4.1.3.2 Mesure de la température

Le profil radial de température a été déterminé en déplaçant un thermocouple chromel-alumel (longueur : 300, diamètre : 1 mm) suivant l'axe du faisceau laser. La Figure 4.5 montre les profils de la température pour différents volets d'air. Comme pour la répartition radiale des particules de suie, la température est homogène sur quasiment tout le diamètre de la cellule de calibrage. Lorsque le volet d'air diminue (mélange plus riche), on constate une diminution de la température de 810 K (volet d'air 0,9) à 680 K (volet d'air 0,8). Par ailleurs, cette température se rapproche de celle mesurée à l'échappement des turbines aéronautiques (autour de 750 K).

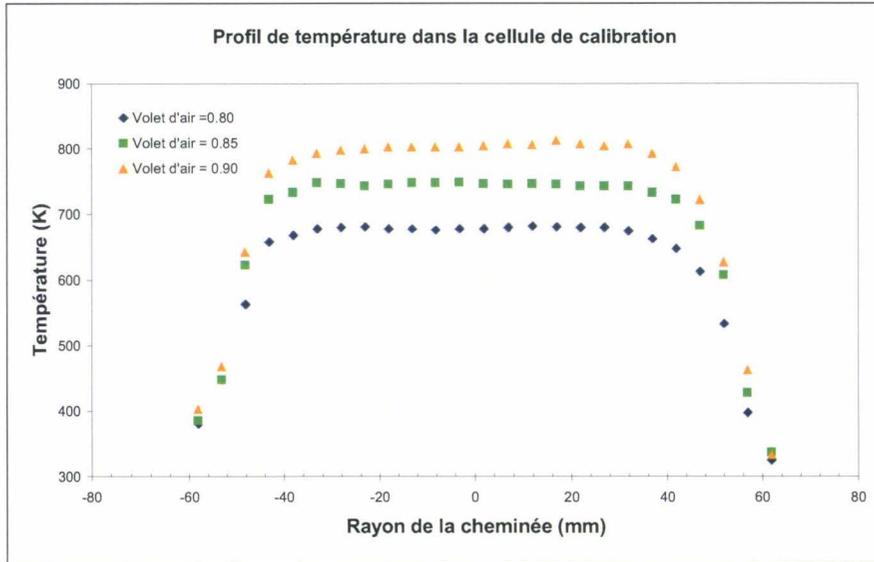


Figure 4.5 : Evolution de la température pour différents rapport air/combustible dans la cellule de calibrage.

Les profils radiaux de la température et de la distribution spatiale des suies montrent une très bonne homogénéité au sein de la cellule de calibrage. La Figure 4.6 compare ces deux profils et montre que la zone homogène de la température correspond à la zone homogène de la distribution spatiale des particules de suie.

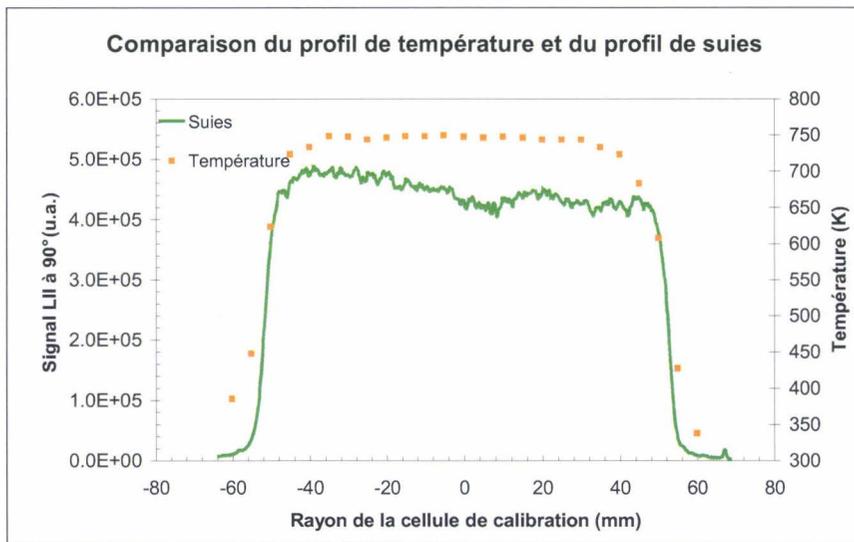


Figure 4.6 : Comparaison de la distribution radiale des particules de suie et du profil de température pour un volet d'air à 0,85 dans la cellule de calibrage.

4.1.3.3 Vitesse de l'écoulement

La vitesse de l'écoulement a été déterminée en utilisant un tube de Pitot constitué d'un micro manomètre *Furness controls FC014* et d'un tube de 3 mm de diamètre (diamètre intérieur) placé dans les gaz brûlés. Le principe repose sur la loi de Bernoulli (équation 4.1) :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z + p = cste \quad \text{Équation 4.1}$$

- avec ρ : Masse volumique du fluide [Kg.m^{-3}]
 V : Vitesse du fluide [m.s^{-1}]
 g : Constante de gravité terrestre, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
 z : Hauteur [m]
 p : Pression [Pa]

La Figure 4.7 montre le principe de fonctionnement d'un tube de Pitot appliqué à notre étude.

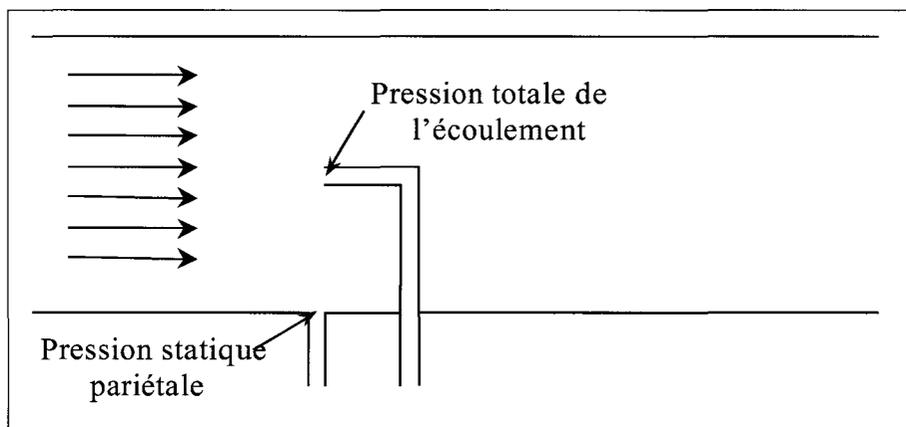


Figure 4.7 : Schéma de principe du fonctionnement d'un tube de Pitot.

Le principe consiste à mesurer la différence de pression entre la pression totale ($p_{\text{écoulement}}$) et la pression statiques (p_{paroi}). Cette différence de pression permet de remonter à la vitesse de l'écoulement suivant l'équation 4.2 :

$$V = \left[\frac{2(p_{\text{écoulement}} - p_{\text{paroi}})}{\rho} \right]^{1/2} \quad \text{Équation 4.2}$$

La mesure de la différence de pression correspond à un déplacement h d'une colonne d'eau. L'équation 4.2 s'écrit alors :

$$V = \left(\frac{2\rho_{eau}gh}{\rho_{air}} \right)^{1/2} \quad \text{Équation 4.3}$$

Les mesures ont été réalisées au centre de la cellule de calibrage pour différents volets d'air et les vitesses calculées sont résumées dans le tableau 4.3.

Volet d'air	Vitesse (m.s ⁻¹)
2,0	5,18
1,5	4,28
1,0	3,75
0,90	3,56
0,85	3,46
0,80	3,36

Tableau 4.3 : Vitesses de l'écoulement au niveau de la cellule de calibrage calculées à partir des mesures réalisées avec le tube de Pitot.

Les valeurs des vitesses axiales permettent d'estimer le nombre de Reynolds de l'écoulement à partir de l'équation 4.4.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad \text{Équation 4.4}$$

Avec ρ : Masse volumique des gaz brûlés [Kg.m⁻³]

V : Vitesse de l'écoulement [m.s⁻¹]

D : Diamètre de la cellule [m]

μ : Viscosité dynamique [Kg.m⁻¹.s⁻¹]

Les valeurs de la masse volumique et de la viscosité dynamique des gaz brûlés étant difficile à déterminer, nous avons estimé le nombre de Reynolds pour de l'air à 750 K, correspondant à un volet d'air de 0,85. Le nombre de Reynolds ainsi calculé est égal à 5620. L'écoulement dans la cellule de calibrage doit donc être proche de celui représenté Figure 4.8, caractéristique d'un écoulement turbulent dans une canalisation cylindrique.

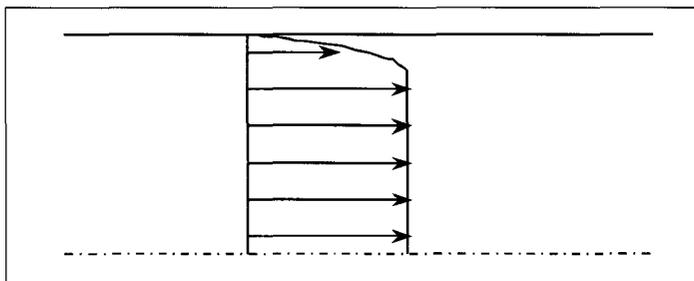


Figure 4.8 : Forme d'un écoulement turbulent dans une canalisation cylindrique.

Le fort gradient au niveau de la paroi et une zone constante sur quasiment tout le rayon de la canalisation indique un profil proche de ceux obtenus pour la température et la distribution spatiale des particules de suie.

4.1.4 Conclusion

Les signaux LII enregistrés dans la flamme en tir à tir avec le laser Brilliant montrent une forte fluctuation de la distribution spatiale des particules de suie au cours du temps. Une accumulation de 200 images a cependant permis de déterminer une distribution gaussienne et une longueur d'intégration de 10 cm pour un volet d'air de 0,85. De plus la température des particules de suie (≈ 2000 K) est peu représentative des particules de suie émises à l'échappement des turbines aéronautiques. Ces résultats montrent qu'il est peu aisé de réaliser un calibrage dans ces conditions de turbulence par une méthode d'absorption. C'est pourquoi la cellule de calibrage a été conçue et insérée sur la cheminée de 125 mm de diamètre au cours de la thèse. Les conditions de distribution spatiale des particules de suie, de température et d'écoulement sont plus homogènes, ce qui permettra un calibrage du système dans des conditions idéales et également plus proches de celles rencontrées à l'échappement des turbines aéronautiques.

4.2 Etude énergétique du processus LII dans le brûleur

Cette étude a pour but de déterminer l'évolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie du laser et de mettre en évidence l'influence de la température initiale des particules de suie sur cette évolution.

4.2.1 Distribution d'énergie du laser CFR400

Etant donné que le laser CFR400 utilise une cavité stable, sa distribution d'énergie n'est pas gaussienne, contrairement au faisceau du laser Brilliant. Afin de mieux appréhender par la suite la forme des spots d'incandescence, il est nécessaire de déterminer la distribution d'énergie au sein du faisceau à l'aide d'un analyseur de faisceau (modèle 2321 beam profiler ATP SM20). Les mesures ont été réalisées à une distance de 2,5 m de la boîte laser. La taille du CCD (6,2 mm × 4,7 mm) étant petite devant la taille du faisceau laser, la caméra a balayé l'ensemble du faisceau en enregistrant à chaque fois l'image de chaque distribution spatiale locale. L'image totale du faisceau laser a ensuite été reconstituée à partir de la juxtaposition des zones imagées puis un lissage a été effectué. La Figure 4.9 montre la distribution de l'énergie laser au sein du faisceau à 2,5 m du système LII.

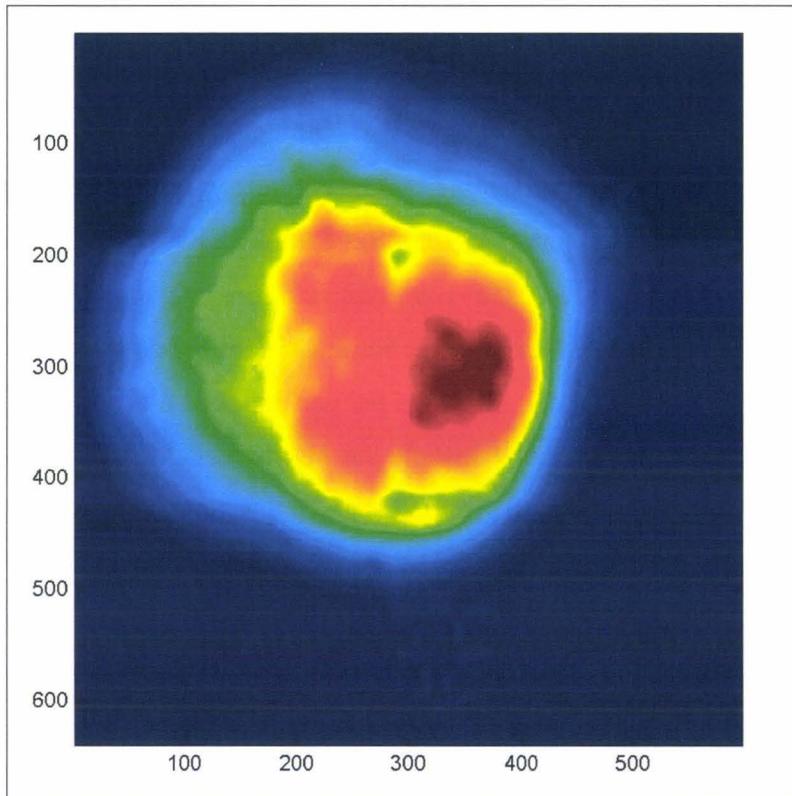


Figure 4.9 : Distribution d'énergie du laser CFR400 à 2,5 m du système LII.

Comme nous pouvons le voir, l'irradiance est plus importante dans la partie droite du faisceau. Ceci a une incidence directe sur la forme des spots LII enregistrés par la caméra. La Figure 4.10 présente les spots d'incandescences enregistrés dans la cellule de calibrage pour différentes énergies.

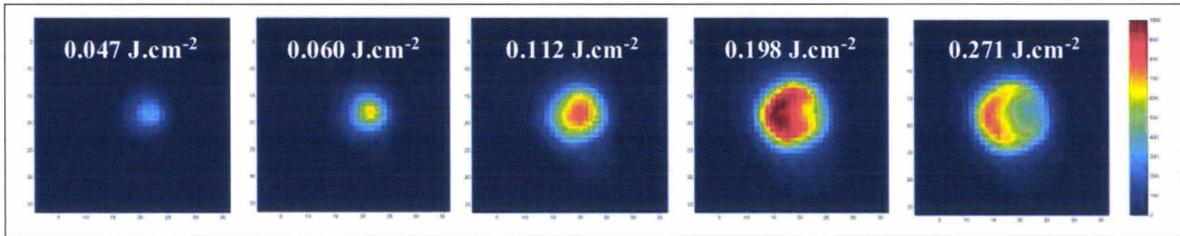


Figure 4.10 : Spots d’incandescences en fonction de la densité d’énergie.

Nous pouvons constater que l’apparition du signal LII (à faible densité d’énergie) et la sublimation des particules de suie (à haute énergie) correspondent à la zone du faisceau laser où la densité d’énergie est la plus forte. La Figure 4.11, qui représente les profils des spots d’incandescence suivant l’axe horizontal passant par le centre des spots et le profil du faisceau laser, permet de visualiser plus facilement ce phénomène.

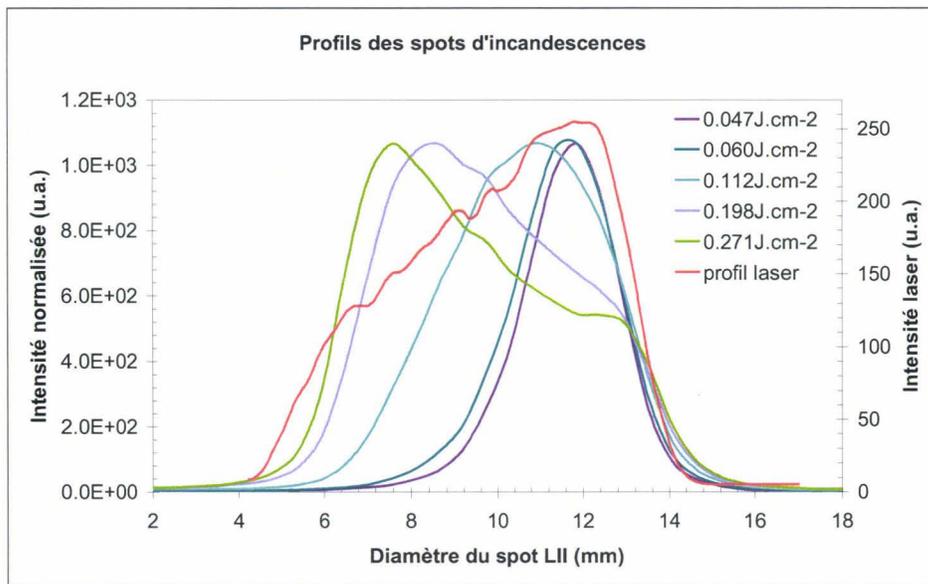


Figure 4.11 : Profils des spots d’incandescences normalisés. Le signal LII apparaît tout d’abord dans la partie droite du spot où le laser possède son pic d’irradiance. Lorsque la densité d’énergie laser augmente, l’intensité maximale se déplace ensuite vers la gauche, traduisant la perte de signal due à la sublimation des particules de suie, activée dans la partie droite.

Ce graphique montre bien l’apparition du signal LII puis la sublimation des particules de suie dans la zone la plus énergétique du faisceau laser.

Les courbes de saturation LII étant en général représentées en fonction de la densité d’énergie, nous avons choisi de déterminer le diamètre du faisceau à $1/e^2$ de l’intensité maximum, comme dans le cas d’un faisceau gaussien. A 2,5 m du système LII, le diamètre utilisé dans le calcul de la densité d’énergie est de 9,5 mm.

4.2.2 Correspondance des spots LII et du signal LII

Le signal LII collecté sur une région du CCD de la caméra correspond à une zone de 96×96 pixels. Pour le calibrage du système la valeur du signal LII correspond à la somme des intensités de chaque pixel compris dans un carré de 35×35 pixels, centré sur le spot d'incandescence. La Figure 4.12 montre cette zone où l'intensité des pixels correspond à un nombre de coups, proportionnel au nombre de photons collectés.

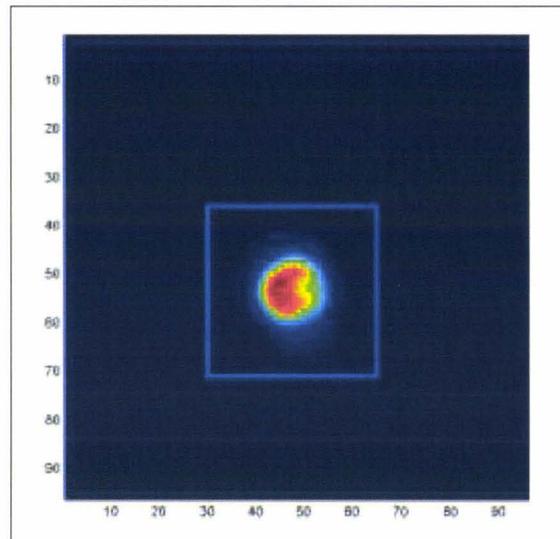


Figure 4.12 : Image collectée par la caméra CCD. Cette image correspond à une région de 96×96 pixels. Le signal LII utilisé pour le calibrage du système correspond à une zone de 35×35 pixels délimitée par la ligne bleue claire centrée sur le spot d'incandescence.

4.2.3 Influence de la température initiale des particules de suie sur le signal LII

Les mesures ont été réalisées au niveau du hublot 1 et dans la cellule de calibrage avec le laser CFR400 mais sans correction de sa divergence (Figure 4.13).

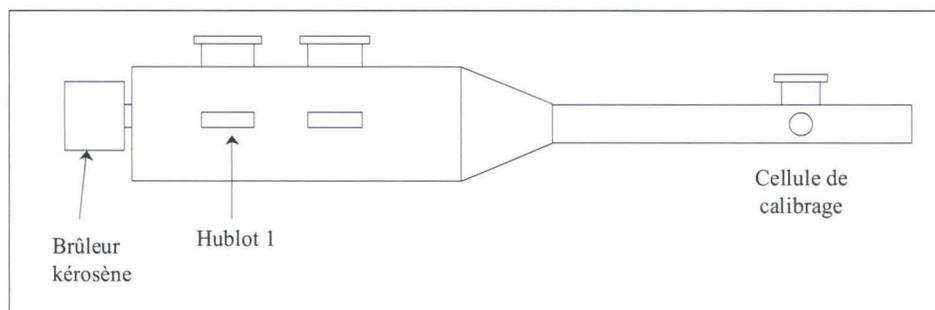


Figure 4.13 : Schéma de la cheminée et du brûleur kérosène.

Comme nous venons de le voir, la température mesurée par pyrométrie à deux couleurs au niveau du hublot 1 (dans la flamme) est de l'ordre de 2000 K alors que la température des gaz de combustion au niveau de la cellule de calibrage est de 750 K. La variation de la température des particules de suie est de l'ordre de 1250 K.

Les signaux LII sont enregistrés pendant une durée de 20 ns. La Figure 4.14 montre les courbes de saturations normalisées obtenues pour les deux zones de mesures. Les deux courbes sont homothétiques. Cependant, les mesures réalisées dans la flamme, où la température initiale des particules de suie est la plus grande, sont décalées vers les basses énergies.

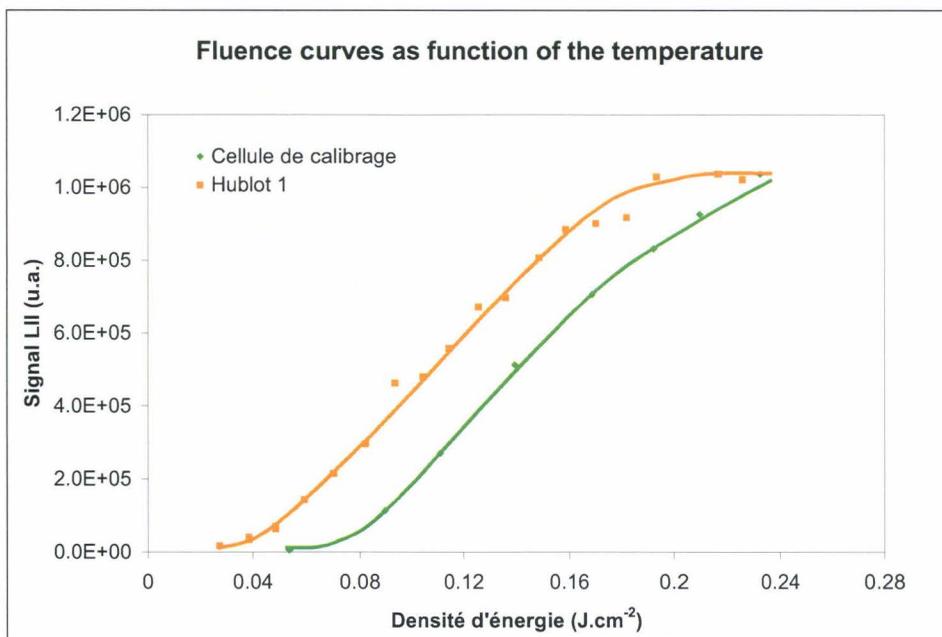


Figure 4.14 : Evolution de signal LII dans la flamme et dans la cellule de calibrage en fonction de la densité d'énergie du laser CFR400.

Les origines de ce décalage peuvent être dues à :

1. une variation des propriétés optiques et morphologiques entre la flamme et la cellule de calibrage,
2. une variation de la température initiale des particules de suie.

Nous pensons que la température initiale est le facteur le plus probable expliquant le décalage de 0,04 J.cm⁻² du fait de la différence de température de 1250 K entre les particules de suie dans la flamme et celles dans la cellule de calibrage. Il est nécessaire d'apporter une

quantité d'énergie supplémentaire aux particules de suie plus froides pour atteindre la même température maximale.

Des simulations effectuées par H. Bladh (Université de Lund Suède), dans le cadre du projet AEROTEST ont d'ailleurs confirmé qualitativement le décalage. La différence de température imposée dans les calculs est équivalente à celle de notre étude expérimentale. La Figure 4.15 montre l'évolution des courbes de saturation normalisées dans le cas d'une distribution d'énergie correspondant à celui du laser CFR200. L'évolution des signaux modélisés est bien similaire à celle des signaux mesurés. Cependant, l'énergie supplémentaire à apporter aux particules de suie est deux fois plus importante dans le cas de la modélisation.

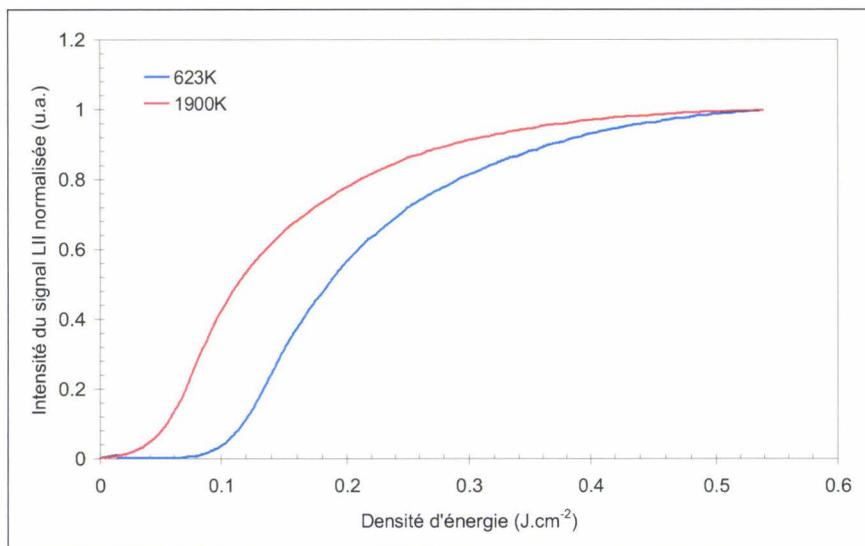


Figure 4.15 : Modélisation numérique de l'évolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie pour deux températures différentes : 1900 K et 623 K. Réalisée par l'université de Lund (Suède).

4.3 Calibrage des mesures LII

Il est important de rappeler que le but de la thèse est de déterminer la fraction volumique de suies dans les gaz d'échappement des turbines aéronautiques à partir du signal rétro-LII enregistré par la caméra dans des conditions expérimentales données. Le calibrage des mesures LII en turbine passe par trois étapes successives :

1. Mesure de la fraction volumique de suies dans la cellule de calibrage pour différentes conditions de fonctionnement,
2. Etablissement de la relation entre les signaux LII mesurés dans la cellule de calibrage et les fractions volumiques de suies correspondantes,

3. Etablissement de la relation entre les signaux LII mesurés dans la cellule de calibrage et ceux mesurés dans les turbines aéronautiques.

Les deux premières étapes constituent le calibrage du système rétro LII.

4.3.1 Méthode de calibrage

La fraction volumique de suies a été mesurée dans la cellule de calibrage par extinction avec le laser Brilliant à 1064 nm. Les mesures rétro LII ont été réalisées avec le laser CFR400 corrigé de sa divergence. L'utilisation de deux lasers différents n'est pas importante car le laser Brilliant ne sert qu'à déterminer les quantités de suies produites par le brûleur kérosène. Le calibrage du système consiste à comparer l'intensité des signaux enregistrés par la caméra Dicam Pro à la fraction volumique de suies mesurée par extinction en fonction de l'ouverture du volet d'air qui alimente le brûleur kérosène. Toutes les mesures enregistrées avec la caméra correspondent à une largeur de porte de 20 ns, temps minimum d'ouverture pour la caméra Dicam Pro, et le signal est enregistré au pic de l'intensité du signal LII (prompt).

4.3.1.1 La loi de Beer-Lambert

La détermination de la fraction volumique de suies produite par le brûleur kérosène en fonction du volet d'air a été réalisée par extinction. La mesure de l'atténuation du faisceau laser à 1064 nm lors de sa traversée dans la cellule de calibrage, où la concentration en particules de suie est homogène et de longueur L en [m], est reliée au coefficient d'extinction K_{ext} [m^{-1}]. Le coefficient d'extinction K_{ext} représente la somme du coefficient d'absorption K_{abs} et du coefficient de diffusion K_{diff} . Les particules de suie primaires étant supposées très petites devant la longueur d'onde du faisceau laser, ceci place le phénomène LII dans le régime de Rayleigh, et ainsi le terme de diffusion est négligeable devant le terme d'absorption et nous pouvons écrire $K_{\text{ext}} = K_{\text{abs}}$. Ainsi, d'après la loi de Beer-Lambert (équation 4.5) :

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -K_{\text{abs}}L \quad \text{Équation 4.5}$$

où I_0 et I sont respectivement les intensités incidente et transmise de l'énergie laser.

Le coefficient d'absorption peut alors être relié à la fraction volumique f_v suivant l'équation 4.6 :

$$K_{abs} = \frac{6\pi E(m)}{\lambda} f_v \quad \text{Équation 4.6}$$

avec λ la longueur d'onde du faisceau laser. Ainsi, la fraction volumique des particules de suie peut être exprimée suivant l'équation 4.7 :

$$f_v = -\frac{\lambda \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{6\pi E(m)L} \quad \text{Équation 4.7}$$

Dans le cas d'un calibrage dans la cellule, la longueur L correspond à la longueur d'intégration contenant les particules de suie, déterminée par l'enregistrement du signal LII à angle droit (chapitre 4.2), et la fonction d'indice $E(m)$ a été choisie d'après la littérature. Dans un récent article de synthèse, [Schulz,2006] fait une synthèse critique des valeurs de $E(m)$ répertoriées dans la littérature et propose une valeur $E(m) = 0,3$ pour une gamme spectrale allant du visible au proche infra rouge. Dans le cas de particules de suie issues de la combustion du kérosène JP-8, [Zhu, 2004] avait déterminé une constante d'extinction adimensionnelle $K_e = 6\pi E(m)$ de 9,8 par la combinaison des techniques de gravimétrie et d'extinction. On en déduit une valeur de $E(m) = 0,52$ à 1064 nm. Une publication récente⁵ du laboratoire Sandia aux Etats Unis indique que la valeur précédente pouvait être biaisée du fait de la sous-évaluation de la contribution de la diffusion dans l'expression du coefficient d'extinction ($K_{ext} = K_{abs} + K_{diff}$). Les auteurs proposent une valeur de K_e voisine de 7 (soit $E(m) = 0,37$ à 1064 nm). La détermination précise de la valeur de $E(m)$ reste à ce jour assez imprécise et fait l'objet de débats. Dans ce travail, nous avons opté pour une valeur du $E(m) = 0,4$ proposée par [Snelling, 2004] à partir de calculs, et qui se situe dans la moyenne des données récentes.

4.3.1.2 Mesures d'extinction

Le calibrage du système a été réalisé dans la cellule de calibrage du brûleur kérosène en utilisant le laser Brilliant. Nous rappelons que le faisceau de ce laser est gaussien et a une très faible divergence. L'atténuation de l'intensité de l'énergie laser a été mesurée à l'aide d'un mesureur d'énergie (Nova de *Ophir Optronics*). La Figure 4.16 schématise le montage utilisé pour réaliser les mesures dans la cellule de calibrage. L'énergie du laser est mesurée directement après la cellule de calibrage.

⁵ [http://www.ca.sandia.gov/crf/news/CRFnews/news_pdf/CRFV28N6.pdf]

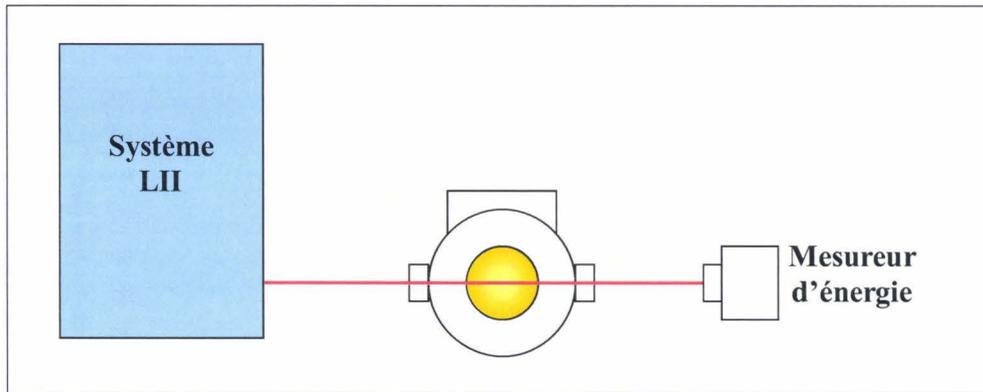


Figure 4.16 : Schéma de mesure par extinction.

Les mesures ont été réalisées avec le laser Brilliant pour une énergie d'environ 35 mJ/pulse ($0,12 \text{ J.cm}^{-2}$). En utilisant l'équation 4.7, nous avons déterminé la fraction volumique de suies pour trois différents volets d'air : 0,82, 0,85 et 0,87. Les valeurs calculées sont respectivement 82 ppb, 44 ppb et 20 ppb. Des mesures d'extinction réalisées pour des densités d'énergie plus faibles conduisent aux mêmes résultats.

Pour le calibrage du dispositif, nous avons comparé la fraction volumique de suies au signal LII enregistré par la caméra CCD pour chaque volet d'air.

4.3.1.3 Lien entre les mesures d'extinction et les mesures rétro LII

Les mesures ont été réalisées avec le système LII dans sa version finale pour les trois volets d'air 0,82, 0,85 et 0,87. Les signaux LII ont ensuite été comparés aux fractions volumiques obtenues par extinction (Figure 4.17). La sortie de la boîte laser est positionnée à 2,5 m de l'axe de la cellule de calibrage et la densité d'énergie est de $0,18 \text{ J.cm}^{-2}$.

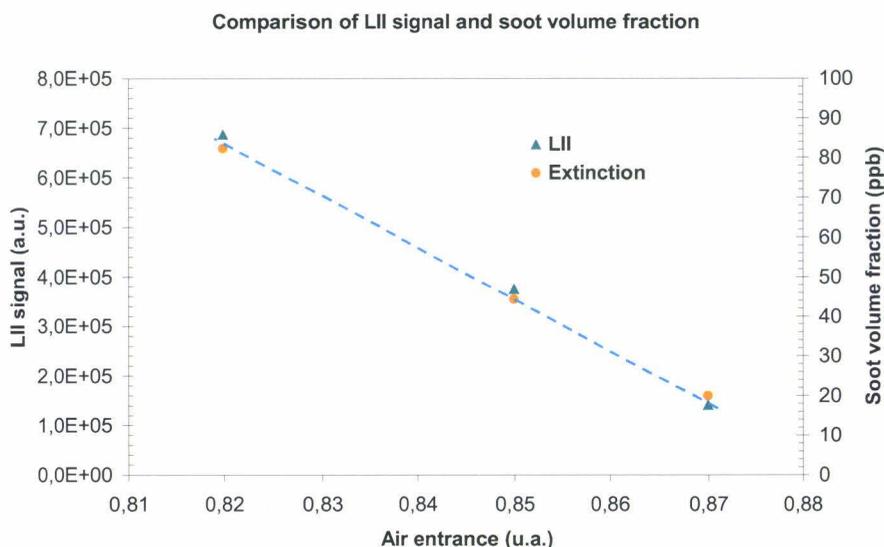


Figure 4.17 : Comparaison des signaux rétro-LII et des mesures par extinction pour différents volet d’air, normalisés arbitrairement pour un volet d’air de 0,87.

L’évolution des signaux LII et de la fraction volumique de suies pour les trois valeurs de volets d’air ont une très bonne concordance. La dynamique des signaux LII et des fractions volumique de suies mesurés pour chaque volet d’air est identique ce qui montre la bonne proportionnalité des signaux.

Au vu de tous les résultats, nous avons décidé de calibrer le système LII pour un volet d’air de 0,85. Pour ce point, la température des particules de suie est de 750 K, à mi-chemin ente les limites inférieure (500 K) et supérieure (1000 K) de la plage de température des gaz brûlés sur les bancs moteurs. Ainsi pour ce rapport comburant/combustible, la fraction volumique correspondante est de 44 ppb.

4.3.1.4 Calibrage du dispositif rétro LII

A partir du point de référence que nous venons de définir, nous avons mesuré l’évolution du signal LII en fonction de la densité d’énergie (Figure 4.18). On note comme pour chaque courbe de saturation, d’abord une croissance du signal puis la région plateau pour laquelle le signal LII reste constant. Nous avons déterminé une valeur du signal LII correspondant à la fraction volumique de suies de 44 ppb juste en dessous de la région plateau.

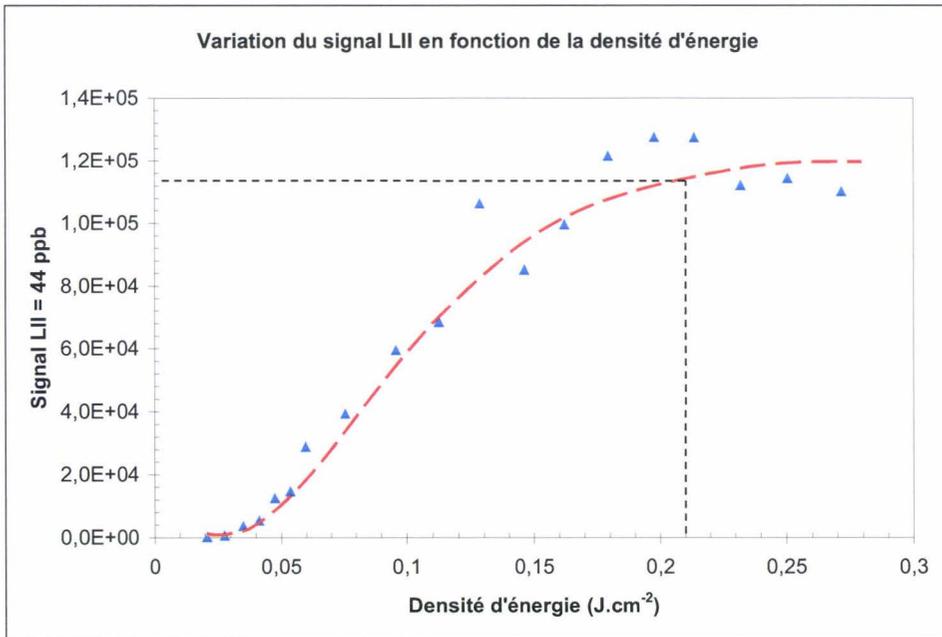


Figure 4.18 : Courbe de saturation représentant l'évolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie.

Notons que l'atténuation du faisceau laser sur la distance d'intégration est négligeable et donc, les particules de suie atteignent la même température.

Ainsi pour une fraction volumique de 44 ppb, le signal LII intégré sur la cible définie préalablement (35×35 pixels) est de $1,16 \cdot 10^5$ coups pour une densité d'énergie de $0,21 \text{ J.cm}^{-2}$. Le tableau 4.5 résume toutes les conditions de mesure.

$S_{LII} = 1,16 \cdot 10^5$ coups correspond à $f_v = 44$ ppb	
Paramètres	Valeurs
Température initiale des particules de suie	750 K
Ouverture diaphragme	f/8
Délai de synchronisation (délai interne pour réaliser des mesures en prompt LII)	480 ns
Temps d'exposition	20 ns
Distance sortie système LII – zone de mesure	2,5 m
Nombre de pixels sélectionnés	35 × 35

Tableau 4.4 : Récapitulatif des conditions de mesures pour le calibrage du système LII.

4.3.2 Quantification des mesures LII réalisées dans les turbines

4.3.2.1 Relation entre les signaux LII mesurés dans la cellule de calibrage et dans une turbine

Nous avons montré dans ce chapitre que les conditions de calibrage dans la cellule de calibrage sont idéales (cf. chapitre 4.1.3). En effet, la répartition spatiale de la température est homogène et atteint une valeur voisine de celles rencontrées à l'échappement des turbines aéronautiques. De même la distribution spatiale des particules de suie est homogène, quelles que soient les conditions de combustion. Nous avons également montré dans l'étude énergétique, qu'il faut apporter plus ou moins d'énergie aux particules de suie pour qu'elles atteignent le même niveau d'échauffement en fonction de leur température initiale.

Les paramètres susceptibles de varier pendant un essai sur un banc moteur sont l'ouverture du diaphragme de la caméra, qui est réglée en fonction de la quantité de signal reçu sur le CCD, et la distance d'intégration, qui est estimée ou supposée équivalente au diamètre de la turbine. Nous expliquerons au chapitre 5, qu'il est également possible de tenir compte de la variation des propriétés optiques des particules de suie. Comme nous l'avons dit, le signal LII mesuré dans la cellule de calibrage correspond à une fraction volumique de suies connue (déterminée par les mesures d'extinction). On rappelle que le signal LII s'exprime de façon synthétique d'après la relation (cf. chapitre 1) :

$$S_{LII}(x) = K \frac{E(m)}{\lambda_{det}^6} f_v(x) \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{det} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad \text{Équation 4.8}$$

où K est une constante de calibrage, E(m) la fonction d'absorption des particules de suie à la longueur d'onde de détection, λ_{det} la longueur d'onde de détection du signal LII, $f_v(x)$ la fraction volumique de suie locale et le terme entre crochet représente la dépendance en température du rayonnement d'un corps noir (ici les particules de suie).

Par suite de l'intégration du signal LII suivant l'axe x le long du diamètre L de la turbine, on obtient :

$$\int_L S_{LII_{Turbine}}(x) dx = K_{Turbine} \int_L f_v(x) \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{det_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{det_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} dx \quad \text{Équation 4.9}$$

En négligeant les variations de $E(m)$ de long de l'axe de la turbine et en supposant que les particules de suie ont atteint une température similaire le long de l'axe x , on en déduit :

$$S_{LII_{Turbine}} = \int_L S_{LII}(x) dx = K_{Turbine} \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{dét_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \int_L f_v(x) dx$$

Équation 4.10

soit :

$$S_{LII_{Turbine}} = K_{Turbine} \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{dét_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \bar{f}_{v_{Turbine}} L_{Turbine}$$

Équation 4.11

Où \bar{f}_v représente une fraction volumique moyennée sur la longueur du diamètre de la turbine. La condition d'obtention d'une température similaire des particules de suie, contenues dans le panache des gaz d'échappement le long de l'axe x pendant l'irradiation, est que les caractéristiques énergétiques moyennes du laser en tout point de x soient constantes. Cette condition est respectée dans notre configuration expérimentale rétro LII non focalisée, avec une détection prompte, moins sensible aux effets de taille des particules de suie primaires.

De même dans la cellule de calibrage, on peut écrire :

$$S_{LII_{Calib}} = K_{Calib} \frac{E(m)_{Calib}}{\lambda_{dét_{Calib}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Calib}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \bar{f}_{v_{Calib}} L_{Calib}$$

Équation 4.12

Afin de s'affranchir de la connaissance du terme entre crochet, il est nécessaire de porter les particules de suie de la cellule de calibrage et de la turbine à une température voisine. Afin de s'approcher de cette condition, nous avons opté pour irradier les particules de suie avec une densité d'énergie correspondant au départ du plateau de la courbe de saturation. Nous verrons au chapitre 5 que les courbes de saturation ont pu être réalisées en turbines ce qui permettra de garantir l'atteinte du plateau et de prendre en compte les variations éventuelles des propriétés physico-chimiques et morphologiques entre la cellule de calibrage et les gaz d'échappement de la turbine.

Le principe de la méthode de calibrage consiste à comparer les signaux d'incandescence issus de la cellule de calibrage et de la turbine. Les conditions de détection

sont identiques sur le plan spectral ($\lambda_{dét_{Calib}} = \lambda_{dét_{Turbine}}$). Le gain et le temps d'exposition de la caméra étant identiques entre les expériences, la relation permettant de déterminer la fraction volumique de suies produite par les turbines aéronautiques est donnée par l'équation 4.13 :

$$\bar{f}_{v_{Turbine}} = \bar{f}_{v_{Calib}} \left(\frac{L_{Calib}}{L_{Turbine}} \right) \left(\frac{S_{LII_{Calib}}}{S_{LII_{Turbine}}} \right)^{-1} \left(\frac{E(m)_{Calib}}{E(m)_{Turbine}} \right) \left(\frac{D_{Calib}}{D_{Turbine}} \right) \quad \text{Équation 4.13}$$

avec D^{Calib} et $D^{Turbine}$ désignant l'ouverture du diaphragme de la caméra pour les mesures dans la cellule de calibrage et dans la turbine respectivement (ces termes se retrouvent initialement dans les termes K_{calib} et $K_{turbine}$ équations 4.11 et 4.12). Le diaphragme possède 7 positions correspondant chacune à une section d'ouverture ; le passage d'une position à une autre fait varier cette section d'un facteur 2, ce qui entraîne la variation du signal LII d'un facteur 2 également. Le rapport des ouvertures du diaphragme correspond donc à une valeur en 2^n avec n un entier représentant le nombre de positions séparant la position du diaphragme pour la mesure dans la cellule de calibrage à celle pour la mesure dans la turbine. Pour une ouverture plus petite, l'exposant se verra affecté une valeur négative.

L'équation 4.13 donne accès à la fraction volumique de suies moyenne de la turbine le long du trajet optique du faisceau laser dans le panache des gaz d'échappement. Comme nous le verrons dans le chapitre 5, l'axe laser défini pour les mesures en turbines coïncide avec le diamètre horizontal du panache.

4.3.2.2 Détermination de la fraction volumique de suies intégrée sur la section du panache

En principe, on peut aussi avoir accès à la fraction volumique de suies moyennée sur la section complète du panache à partir d'un balayage angulaire du laser par rapport à l'axe de la turbine. La Figure 4.19 schématise l'évolution du profil radial du signal rétro LII ($LII_{back}(y)$) obtenu par balayage angulaire du faisceau laser.

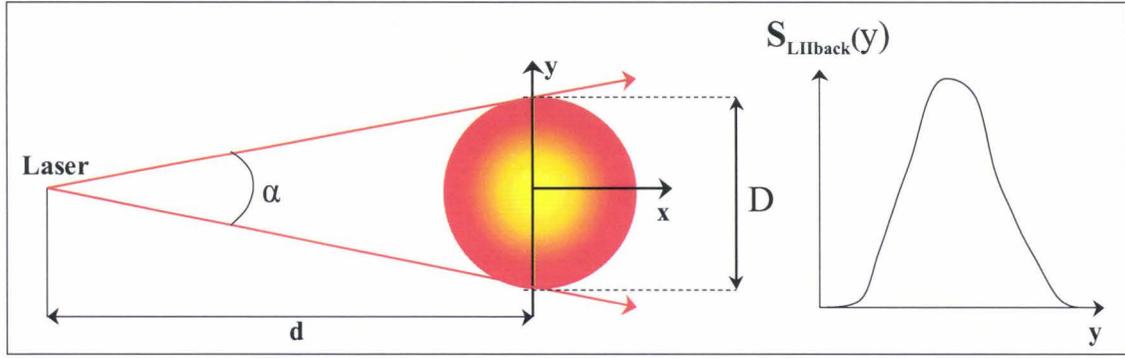


Figure 4.19 : Evolution du profil radial du signal rétro LII obtenu par balayage angulaire du laser.

En intégrant le signal rétro recueilli pour différentes positions y du faisceau laser dans le panache des gaz d'échappement, on en déduit :

$$S_{LII_{Total}} = \sum_y S_{LII_{Turbine}}(y) = \int_y S_{LII_{Turbine}}(y) dy \quad \text{Équation 4.14}$$

Le signal $S_{LII_{Total}}$ s'exprime également à partir de l'équation 4.8 intégrée sur la section $\Phi_{panache}$ du panache, en considérant que les particules ont toutes atteintes la même température (en travaillant au début du plateau de la courbe de saturation) :

$$S_{LII_{Total}} = K \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{dét_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \iint_{\Phi_{panache}} f_v(x, y) dx dy \quad \text{Équation 4.15}$$

soit :

$$S_{LII_{Total}} = K \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{dét_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \bar{f}_{v_{panache}} \Phi_{panache} \quad \text{Équation 4.16}$$

où $\bar{f}_{v_{panache}}$ désigne la fraction volumique moyennée sur la surface $\Phi_{panache}$ du panache.

Cette fraction volumique moyennée sur la section du panache peut être reliée à la fraction volumique déduite de la mesure rétro LII pour la position $y=0$ du laser. En effet d'après l'équation 4.11, on a :

$$S_{LII_{Turbine}}^{y=0} = K \frac{E(m)_{Turbine}}{\lambda_{dét_{Turbine}}^6} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_{dét_{Turbine}} kT}\right) - 1 \right]^{-1} \bar{f}_{v}^{y=0} L_{Turbine}^{y=0} \quad \text{Équation 4.17}$$

En admettant que la fonction d'absorption $E(m)$ est constante dans le panache ainsi que la température atteinte par les particules au cours de l'irradiation, la comparaison des équations 4.16 et 4.17 conduit à :

$$\bar{f}_{v_{panache}} = \frac{L_{Turbine}^{y=0}}{\Phi_{panache}} \frac{S_{LII_{Total}}}{S_{LII_{Turbine}}^{y=0}} \bar{f}_v^{y=0} \quad \text{Équation 4.18}$$

4.3.2.3 Détermination du débit massique de suies produites par la turbine

Le débit massique des particules de suie est une grandeur en $[\text{kg.s}^{-1}]$ également bien adaptée pour quantifier les particules de suie à l'émission des turbines aéronautiques car elle tient compte de la vitesse de l'écoulement. La détermination du débit massique nécessite la connaissance de la masse volumique des particules de suie ρ_{suie} en $[\text{kg.m}^{-3}]$ et de la vitesse des gaz d'échappement v_{gaz} en $[\text{m.s}^{-1}]$. Ainsi, le débit massique traversant la section du panache représentée Figure 4.19 s'exprime selon l'équation 4.19 :

$$\dot{m}_{suie} = \iint_{x,y} \rho_{suie}(x,y) v_{gaz}(x,y) f_v(x,y) dx dy \quad \text{Équation 4.19}$$

La masse volumique locale des particules de suie et la vitesse locale des gaz d'échappement ne sont pas des valeurs connues. Nous utiliserons par la suite les valeurs moyennes de ces deux paramètres définies telles que l'équation 4.19 peut s'écrire :

$$\dot{m}_{suie} = \bar{\rho}_{suie} \bar{v}_{gaz} \iint_{x,y} f_v(y,z) dx dy \quad \text{Équation 4.20}$$

D'après l'équation 4.18, l'expression du débit massique est reliée aux signaux mesurés par le système LII à partir de l'équation

$$\dot{m}_{suie} = \bar{\rho}_{suie} \bar{v}_{gaz} L_{Turbine}^{y=0} \bar{f}_v^{y=0} \frac{S_{LII_{Total}}}{S_{LII_{Turbine}}^{y=0}} \quad \text{Équation 4.21}$$

Pour calculer le débit massique de suies, nous devons déterminer la masse volumique des particules, qui dépend de leur composition et de leur porosité. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1, les particules de suie sont composées de 80% d'atome de carbone et l'autre partie correspond à la partie soluble. [Vander Wal, 1999b] utilise des valeurs de masse volumique de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ pour des particules de suie amorphes et $2,1 \text{ g.cm}^{-3}$ pour des particules de suie graphitiques (dédit des masses volumiques du carbone graphitique et du carbone

amorphe). Cependant la plupart des auteurs utilisent une masse volumique comprise entre $1,85 \text{ g.cm}^{-3}$ [Xu, 2003], [Sunderland, 1995], [Kim, 2004] et 2 g.cm^{-3} [Wen, 2003] pour des particules de suie issues de la combustion de combustibles gazeux. [Snelling, 2004] utilise pour des suies issues de la combustion d'éthylène une masse volumique de $1,9 \text{ g.cm}^{-3}$. Dans notre étude, nous utiliserons une masse volumique de $1,86 \text{ g.cm}^{-3}$ [Douce, 2000] issue de la combustion de diesel. Dans le cas de la cellule de calibrage pour un volet d'air de 0,85 ($f_v = 44 \text{ ppb}$), on obtient un débit massique des particules de suie de $2,4 \text{ mg.s}^{-1}$, pour un débit de kérosène de 560 mg.s^{-1}

4.4 Conclusion

Afin de calibrer le dispositif rétro LII, une cellule de calibrage a été conçue. Elle est connectée en aval du brûleur kérosène mis en place au laboratoire. Les distributions radiales de la température et de la fraction volumique de suies sont remarquablement homogènes sur une distance de 10,4 cm. Cette cellule s'avère donc être un outil idéal pour la mesure par extinction car les fractions volumiques de suies sont stables et reproductibles. D'autre part la température est voisine de celle mesurée en aval d'une turbine et nous avons montré que la température initiale des particules de suie était un paramètre important à prendre en compte dans la procédure de calibrage. Enfin, le dispositif génère des particules de suie de kérosène. La fraction volumique de suies a été déterminée par extinction à 1064 nm dans différentes conditions de fonctionnement du brûleur. A partir de cet étalonnage, des expériences rétro LII ont été réalisées dans cette cellule afin de recueillir les intensités du signal LII dans les mêmes conditions expérimentales que celles mises en place sur les turbines. Nous en avons déduit une relation permettant de faire le lien entre le signal LII mesuré en turbine et le signal LII mesuré dans la cellule de calibrage. Cette procédure a ensuite été appliquée aux mesures obtenues en aval des turbines et décrites dans le chapitre 5.

CHAPITRE 5 : APPLICATION A LA MESURE SUR BANCS MOTEURS

5 Application à la mesure sur bancs moteurs

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des six campagnes de mesures effectuées sur des turbines aéronautiques de différents diamètres et sur une turbine à gaz. Nous avons choisi de présenter les résultats de manière chronologique afin de mieux comprendre les modifications apportées au système LII pendant le déroulement de la thèse.

Avant de présenter les résultats des campagnes de mesures, le fonctionnement des turbines aéronautiques et leur évolution au cours du temps est également présenté brièvement.

5.1 Fonctionnement d'un moteur

Dans ce chapitre, nous décrivons le fonctionnement d'un réacteur, avec ses différents organes. On distingue deux types de réacteur :

- ✓ Le turbopropulseur ou turbine, qui est le type de moteur sur lequel nous avons réalisé les mesures. Il est constitué d'un compresseur de type axial ou centrifuge pour réduire le volume d'air admis et élever sa température. Cet air est ensuite envoyé dans la chambre de combustion où il est mélangé à du kérosène pour la combustion, pendant laquelle la pression et la température continuent d'augmenter. Les gaz brûlés sont ensuite détendus dans la turbine puis évacués à travers la tuyère.
- ✓ Le statoréacteur, à la différence, n'utilise pas d'organes tournants. Son fonctionnement est lié à la forme de son conduit. L'air pénètre dans ce réacteur à grande vitesse et se comprime. Il est ensuite mélangé à du kérosène pour la combustion. Ceci augmente encore la pression et la température des gaz qui sont ensuite éjectés à très grande vitesse par la tuyère. Son fonctionnement nécessite une vitesse initiale. En fonctionnement, il permet d'atteindre une vitesse de l'ordre de Mach 3 et un vol à très haute altitude.

Les essais réalisés au cours du projet AEROTEST ont été effectués sur des moteurs fonctionnant comme un turbopropulseur. Nous allons donc décrire les différents éléments le constituant et nous familiariser à la terminologie aéronautique.

5.1.1 Fonctionnement d'un turboréacteur - terminologie

Les premiers turboréacteurs étaient ce qu'on appelle simple corps, c'est à dire que le compresseur et la turbine, constitués de plusieurs aubes (sorte de roue sur laquelle sont fixées des pales ; on parle d'aubes de compresseur et d'aubes de turbine) formaient un unique ensemble cinématique. Aujourd'hui, on parle de double corps car le compresseur et la turbine ont été divisés en deux parties successives, à base de haute pression et de basse pression. Ceci permet de gagner en efficacité et on vient même à parler maintenant de triple corps pour des turbines à fort taux de dilution (avions commerciaux). Ainsi, le compresseur permet de compresser l'air d'admission. En se compressant, l'air est chauffé puis envoyé dans la chambre de combustion. La turbine permet de récupérer l'énergie potentielle des gaz brûlés et d'en transformer une partie en énergie cinétique pour la propulsion de l'aéronef.

On parle également de moteur simple flux d'air lorsque la totalité de l'air entre dans la chambre de combustion. Dans un moteur double flux, une certaine quantité de l'air est envoyée dans l'ensemble compresseur – chambre de combustion – turbine et qu'on nommera flux chaud. L'autre partie est envoyée dans la périphérie et on le nomme flux froid. Il permet à la fois de refroidir le moteur, de diminuer le bruit dû à l'éjection des gaz chauds et d'augmenter la poussée lorsque son débit d'air est augmenté. La Figure 5.1 montre le fonctionnement d'un turboréacteur double flux et double corps.

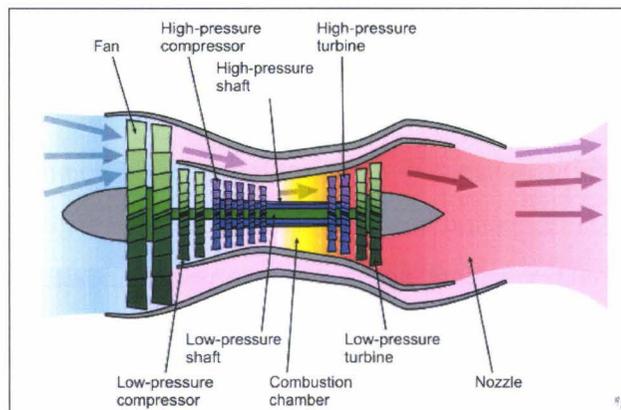


Figure 5.1 : Fonctionnement d'un turboréacteur double flux [Wikipédia].

L'air est aspiré par la soufflante (fan) avant qu'une partie ne soit envoyée dans le compresseur basse pression et l'autre partie dans la périphérie du moteur (flux froid). L'air injecté dans le compresseur basse pression passe ensuite dans le compresseur haute pression avant d'être injecté dans la chambre de combustion. L'énergie dégagée par la combustion est en partie récupérée par les étages haute et basse pression de la turbine. Les étages haute

pression de la turbine et du compresseur ainsi que les étages basse pression sont reliés par un arbre (low pressure shaft et high pressure shaft sur la Figure 5.1) ce qui permet le fonctionnement du compresseur haute et basse pression mais également sert d'alimentation à tous les organes de l'aéronef. Les gaz brûlés poursuivent leurs détente dans la tuyère, élément servant à la propulsion.

Les mesures réalisées dans le cadre du projet AEROTEST se situeront à la sortie de la tuyère, où les gaz d'échappement ont une température comprise entre 500 K et 1000 K, une pression statique d'environ 10^5 Pa et une vitesse maximum de 0,95 Mach.

5.1.2 Les turbines testées

Les campagnes de mesures se sont déroulées tout au long du projet AEROTEST sur trois sites différents et donc trois moteurs différents : Université RWTH à Aachen (Allemagne), Siemens à Lincoln (Angleterre) et Rolls-Royce à Derby (Angleterre). Une grande partie des campagnes a été réalisée à l'université RWTH, disposant d'une turbine aéronautique militaire (ATAR 101 F2) et désignée comme turbine de référence dans le projet AEROTEST. La campagne chez Siemens a été réalisée sur une turbine à gaz (SGT300) et la campagne chez Rolls-Royce a été réalisée sur une turbine d'hélicoptère (Gnome).

5.1.2.1 Le moteur ATAR

La turbine mise à disposition pour le projet AEROTEST à l'université de Aachen est une turbine militaire ATAR 101 F2 de 1956 construite par SNECMA (Figure 5.2). La partie compresseur est de type axial (écoulement parallèle à l'axe de rotation), composé de 9 aubes. La partie turbine est composée de deux aubes avec la possibilité de post-combustion (non disponible sur le moteur testé). La Figure 5.2 montre une photo du banc d'essai et le moteur ATAR.



Figure 5.2 : Photo du moteur ATAR 101 F2.

La Figure 5.3 montre une photographie et un schéma de la tuyère de moteur et du système d'extraction des gaz d'échappement du banc. Le plan de sortie de la tuyère est de forme circulaire en configuration ouverte et le diamètre est de 70 cm. En configuration fermée, le plan de sortie est de forme ovale dont l'axe vertical mesure 40 cm et l'axe horizontal mesure 70 cm. La distance entre la sortie de la tuyère et l'extraction des gaz brûlés est de 90 cm.

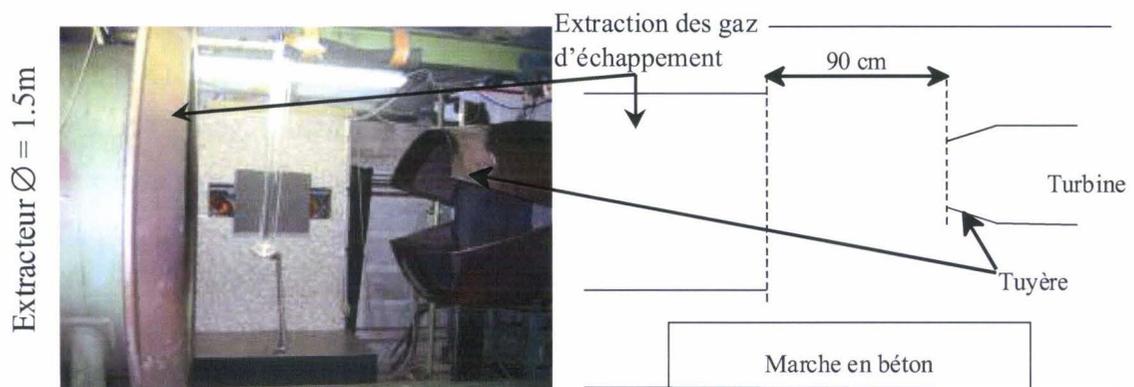


Figure 5.3 : Configuration du banc moteur de l'université RWTH.

Les mesures LII ont été réalisées pour différents régimes moteur correspondant à des conditions de fonctionnement de l'avion :

- ✓ Idle (ou taxi ground) : correspond à une faible vitesse. Ce régime est utilisé par l'avion pour les déplacements sur le tarmac,

- ✓ Cruise : correspond au régime de croisière. Ce régime n'est utilisé qu'en vol après la phase de décollage,
- ✓ Take off : correspond au décollage. Ce régime n'est utilisé par l'avion que pendant un court instant (cf. chapitre 1, cycle LTO),
- ✓ Thrust : correspond au mode take off avec la tuyère fermée. Ce mode ne se retrouve que sur les moteurs militaires. Il permet d'avoir une poussée supplémentaire. Ce régime ne peut être utilisé que pendant un court instant à cause des températures élevées qu'atteignent les pièces mécaniques.

Les différentes campagnes nous ont permis d'optimiser le système LII (densité d'énergie, motorisation du diaphragme, ...) et différentes configurations de mesures ont été testées afin de déterminer la mieux adaptée. Dans la présentation des résultats de chaque campagne de mesure, nous donnerons la configuration testée.

5.1.2.2 Le moteur GNOME

La turbine testée sur un banc d'essais Rolls-Royce est une petite turbine adaptée d'un moteur d'hélicoptère GNOME. Il utilise un compresseur axial, composé de deux étages de compression, constitué de 10 aubes alors que la turbine n'est composée que d'un étage. La chambre de combustion est annulaire et le diamètre de la turbine est de 28 cm. La Figure 5.4 montre le banc d'essai du moteur.



Figure 5.4 : Photo du moteur GNOME.

Contrairement aux moteurs d'avions, les moteurs d'hélicoptères ne disposent pas de tuyères à section variable. La vitesse du moteur est exprimée en tours par minute et le réglage est manuel.

5.1.2.3 La turbine à gaz SGT300

La turbine à gaz testée pendant la campagne de mesure chez Siemens permet de brûler un combustible liquide ou gazeux. Elle délivre une puissance de 7,9 MW. La Figure 5.5 montre un schéma de fonctionnement de la turbine.

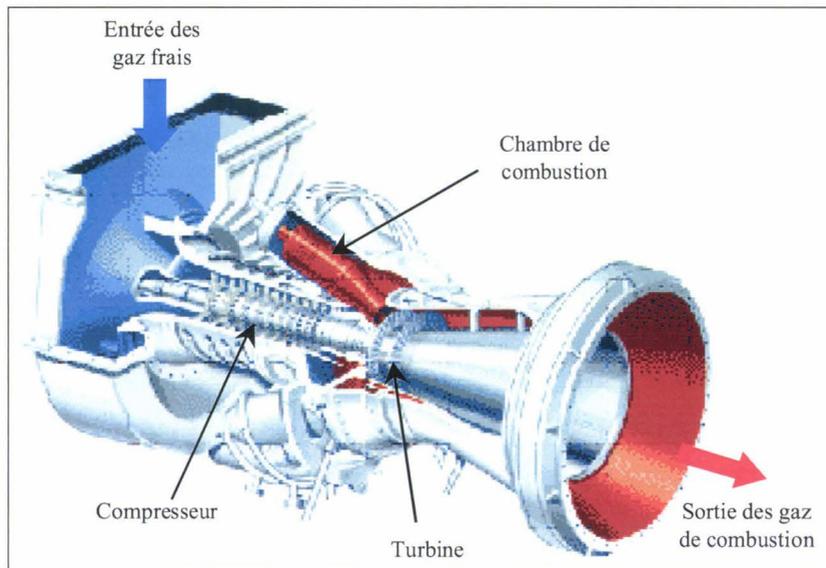


Figure 5.5 : Schéma de la turbine à gaz SGT300.

Cette turbine est équipée d'un système de combustion DLE (Dry Low Emissions) permettant une production de NO_x très faible, quel que soit le combustible utilisé. La combustion se fait à plus haute température que dans les turbines à gaz classique pour une meilleure combustion. Par ailleurs, plus la charge est importante (la charge correspond à la puissance), plus la température de combustion est élevée, plus les émissions polluantes sont faibles.

5.2 Résultats des campagnes de mesures

Nous allons présenter les résultats des campagnes de mesures de façon chronologique afin de suivre les améliorations du système de mesure, conditionnées par les résultats des

campagnes et par le calibrage. Au total, six campagnes de mesures ont été réalisées dont quatre sur le moteur ATAR.

Pour chaque campagne, nous donnerons une description du système LII et de son implantation sur le banc moteur. Par ailleurs, l'intensité des signaux LII obtenus pendant les premières campagnes de mesures ne seront pas traduites en terme de fraction volumique car les conditions de mesures sont différentes de celles utilisées pendant la phase de calibrage dans le brûleur kérosène.

De plus il faut noter que la méthode du smoke number (seule méthode officielle de l'émission des particules de suie) impose de réaliser les mesures aussi proches que possible du plan de sortie du moteur sans dépasser une distance égale à la moitié du diamètre de la tuyère [ICAO, 1994]. Pour les mesures réalisées sur les deux turbines aéronautiques testées, nous avons, dans la mesure du possible, respecté ce critère.

5.2.1 Université RWTH, janvier 2005

Cette première campagne de mesure nous a permis de tester en conditions réelles l'équipement LII et de confronter les signaux enregistrés en configuration focalisée et non focalisée. Pendant cette campagne, trois vitesses ont été testées : Idle, croise et take off, décrites précédemment.

5.2.1.1 Installation du système LII

La Figure 5.6 montre le schéma d'installation du système LII sur le banc de mesure au cours de cette campagne.

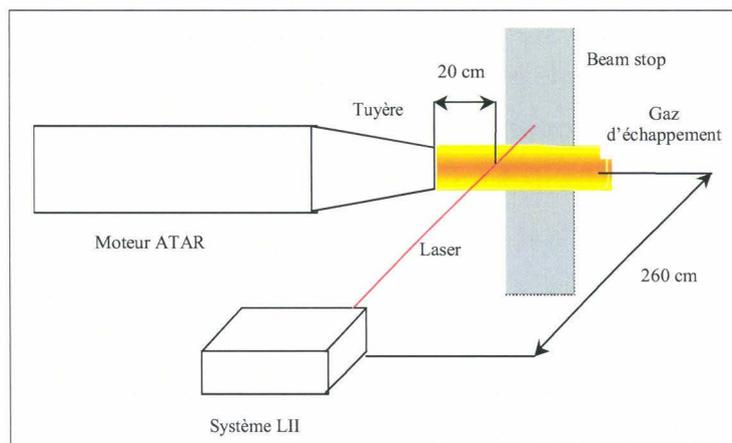


Figure 5.6 : Configuration du banc de mesure.

La sortie du système LII était placée à 2,6 m de l'axe de la tuyère et le faisceau laser traversait les gaz d'échappement 20 cm en aval de la tuyère. L'axe horizontal du laser coupait perpendiculairement l'axe de la turbine. Le balayage des gaz d'échappement était réalisé par la rotation du prisme. Le système LII était composé du laser CFR200, de l'atténuateur d'énergie d'origine (Figure 5.7). L'ensemble du système était posé sur une table en bois.

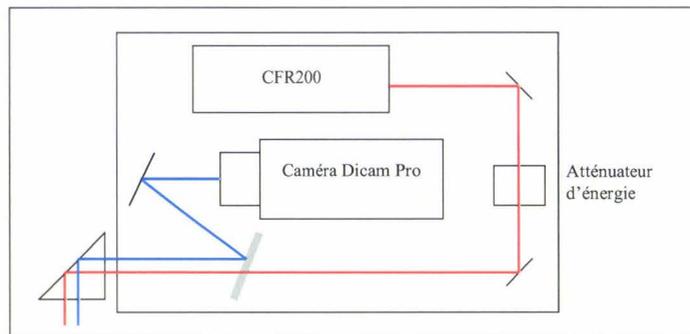


Figure 5.7 : Configuration du système LII pendant la première campagne de mesure à Aachen.

L'énergie en sortie du prisme était de 40 mJ et le diamètre du faisceau laser dans les gaz d'échappement variait de 9,6 mm à 10,1 mm sur le diamètre de la turbine en version non focalisée. La densité d'énergie ainsi obtenue était de $0,05 \text{ J.cm}^{-2}$. La position du diaphragme de la caméra était contrôlée manuellement avant et après chaque fonctionnement moteur. L'alignement du système laser a été réalisé à l'aide d'une bougie, avec laquelle un signal LII intense est enregistré à la caméra (ouverture caméra f/16).

5.2.1.2 Résultats

Au cours de cette campagne, nous avons réalisé sept tests en modifiant les paramètres. Nous avons résumé dans le tableau 5.1 les conditions de mesure et les observations. Au cours de cette campagne, plusieurs systèmes pour absorber ou diffuser le faisceau laser (appelés *beam stop* ou *beam dump*) après le passage dans les gaz brûlés ont été testés, pour réduire le signal "bruit" enregistré par la caméra et ainsi avoir une meilleure sensibilité. De plus ces systèmes doivent être de grandes dimensions pour absorber le faisceau laser sur une hauteur correspondant au balayage vertical du faisceau laser dans les gaz d'échappement. Les premiers tests ont permis de visualiser des signaux LII à la caméra, mais qui sont devenus de plus en plus faibles jusqu'à disparition complète au troisième test. Il faut noter que la turbine n'avait pas fonctionné depuis plusieurs années. Le signal visualisé au cours des premiers tests peut correspondre à un décollage du moteur, c'est à dire à des particules qui se décollent des parois du moteur.

Test	Configuration équipement LII	Observation – Résultats
1	Chaîne d'excitation : Laser CFR200, atténuateur, miroir dichroïque et prisme. Faisceau laser arrêté par une plaque en bois recouvert de mousse.	Très faible signal (ouverture caméra : f/16).
2	Même conditions que pour le test 1 ; ouverture caméra : f/2.8.	Signal enregistré par la caméra faible. Problème de place sur le disque flash utilisé (capacité du disque : 250 Mo).
3	Retrait de l'atténuateur d'énergie pour avoir une densité d'énergie plus importante. Utilisation d'un tissu noir pour arrêter le faisceau laser.	L'extracteur a aspiré une partie du tissu. Pas de signal
4	Même conditions que pour le test 3. Le tissu noir a été déplacé et accroché sur le mur du banc. Mais pas de possibilité de réaliser un balayage des gaz d'échappement.	Pas de signal.
5	Utilisation d'une plaque métallique recouverte d'une peinture aéronautique pour absorber le faisceau laser.	Signal dû à la réflexion du faisceau laser sur la plaque métallique.
6	Remplacement de la configuration non-focalisée en configuration focalisée. Faisceau laser focalisé sur l'axe de la turbine.	Pas de signal.
7	Faisceau laser focalisé avant l'axe de la turbine (2,2 m).	Pas de signal.

Tableau 5.1 : Récapitulatif des tests réalisés au cours de la campagne de mesure (Janvier 2005).

5.2.1.3 Conclusion

Comme nous pouvons le constater, les tests en configuration focalisée et non focalisée n'ont pas permis d'enregistrer de signal LII au cours de cette campagne. Les signaux visualisés pendant les premiers tests peuvent correspondre à un signal LII provenant de particules carbonées se détachant des parois du moteur, mais ne sont pas représentatives des émissions polluantes. Cependant les alignements réalisés avec une bougie ont permis de visualiser un signal LII intense, montrant bien que le système fonctionne. Le système LII

ayant été initialement conçu (lors de projets antérieurs) pour être utilisé en configuration focalisée, disposait d'une densité d'énergie laser suffisante (au point de focalisation) pour atteindre le régime plateau (cf. figure 4.18). Par contre la densité d'énergie était trop faible en configuration non focalisée et ceci pourrait être à l'origine de nos problèmes. Par ailleurs, nous n'avons pas encore réalisé, au moment de cette campagne, l'étude de l'impact de la température initiale des particules de suie sur la courbe de saturation. Avec le recul, il est clair que nos conditions d'utilisation du système LII étaient défavorables.

Cette campagne a néanmoins été déterminante pour justifier l'achat d'un laser plus puissant. La configuration focalisée est définitivement abandonnée dans la suite du projet. Enfin le problème de l'absorption du faisceau laser après les gaz d'échappement pour limiter le signal "bruit" mesuré par la caméra s'est avéré crucial et des solutions ont été apportées par la suite.

5.2.2 Rolls Royce, août 2005

La deuxième campagne de mesure a été réalisée sur une turbine d'hélicoptère (GNOME) avec la configuration non focalisée. Deux lasers ont été utilisés au cours de cette campagne : le CFR200 et le Brilliant. Ce dernier est utilisé pour palier la trop faible densité d'énergie du CFR200 en configuration non focalisée.

5.2.2.1 Installation

La Figure 5.8 montre l'implantation du système LII sur le banc d'essai du moteur Gnome.

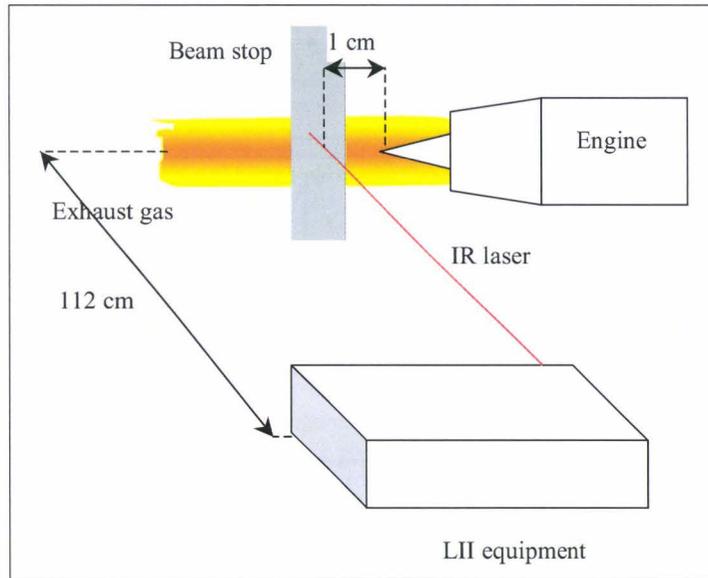


Figure 5.8 : Installation de l'équipement laser sur le banc de mesure Gnome.

La sortie de l'équipement laser était positionnée à 1,12 m de l'axe de la turbine pour des contraintes liées à l'espace autour du moteur et le faisceau laser passait 1 cm en aval du cône de la turbine. Le faisceau laser traversait ensuite un nouveau '*beam dump*' fourni par Rolls-Royce. C'est un cylindre en plastique (PMMA) de 70 mm de diamètre et 1,2 m de long rempli d'eau. Le changement d'indice des milieux lui confère la capacité de se comporter comme une lentille convergente ; le faisceau laser est très rapidement focalisé derrière le cylindre puis diverge. L'utilisation de ce système évite d'enregistrer un signal "bruit" trop important sur la caméra et permet de réduire très rapidement la densité d'énergie du faisceau laser qui se diffuse ensuite dans le banc d'essai.

Le laser Brilliant a aussi été utilisé au cours de cette campagne pour palier le manque d'énergie du laser CFR200. La Figure 5.9 montre l'installation réalisée sur le banc Rolls-Royce. Le laser CFR200 est positionné dans la boîte alors que le laser Brilliant est positionné à l'extérieur.

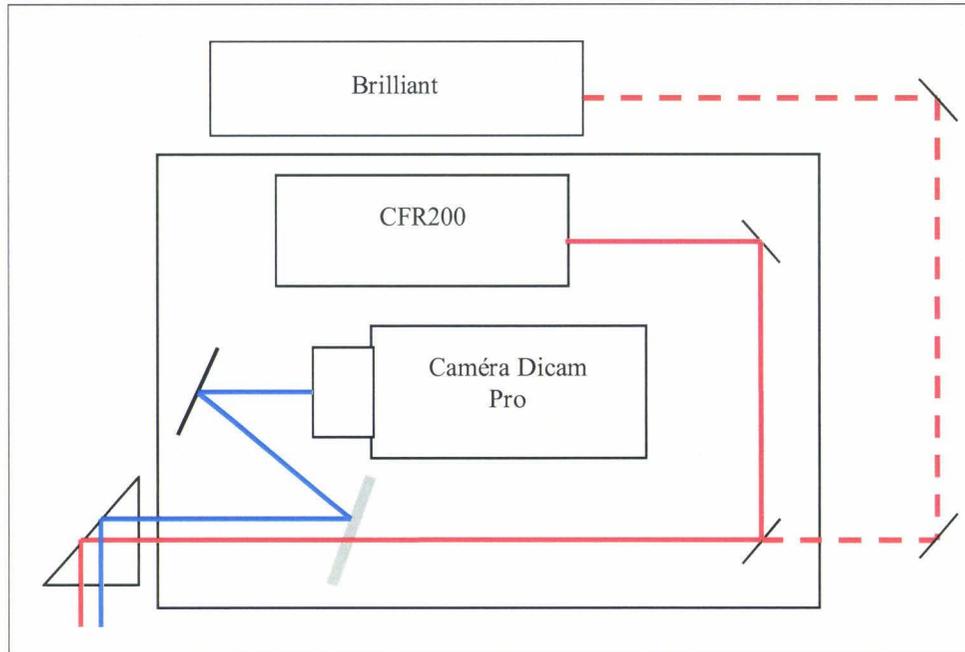


Figure 5.9 : Installation de l'équipement LII.

A la sortie de la boîte, les axes des deux faisceaux laser coïncident. L'énergie laser ne peut être contrôlée qu'en faisant varier la haute tension des lampes flash pour le CFR200 ou manuellement pour le laser Brilliant. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'arrêter le moteur pour pénétrer dans le banc moteur.

5.2.2.2 Résultats

Les premiers essais ont été réalisés avec le laser CFR200 sans atténuateur d'énergie. L'énergie laser en sortie de l'équipement varie de 130 mJ à 190 mJ par pulse avec des temps d'exposition de 100 ns. Les images enregistrées permettent de montrer que le système (identique à celui utilisé à l'université RWTH) fonctionne, mais la plage d'énergie disponible ne permet pas d'atteindre le régime de sublimation des particules de suie. La Figure 5.10 montre un exemple d'image enregistrée avec le laser CFR200 pour une énergie de 190 mJ et un temps d'exposition de 100 ns.

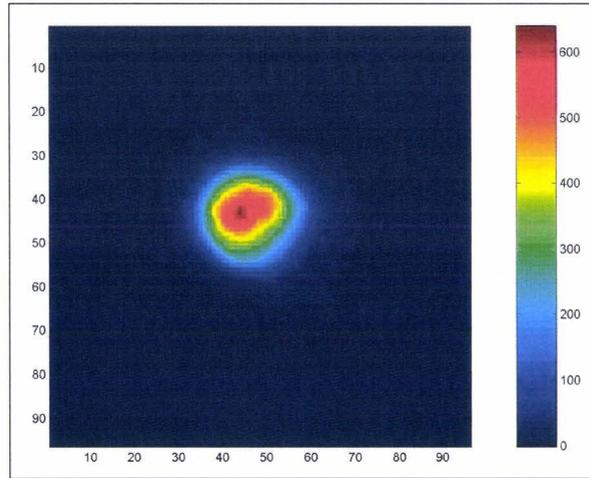


Figure 5.10 : Exemple d'image enregistrée avec le laser CFR200. L'énergie laser est de 190 mJ/pulse et le temps d'exposition de 100 ns.

Cette image a été corrigée du bruit de lecture de la caméra (bruit thermique plus bruit provenant de la réflexion laser sur le *beam dump*) qui s'élevait à environ 110 coups par pixels dans nos conditions expérimentales. Le bruit thermique s'est avéré très stable au cours des différentes campagnes réalisées. Le bruit provenant de la réflexion du laser sur le *beam dump* est très aléatoire en fonction de la position angulaire du faisceau laser. Dans la suite de ce chapitre, tous les signaux LII sont corrigés du bruit de lecture enregistré par la caméra. La procédure de soustraction du bruit est schématisée sur la Figure 5.11 :

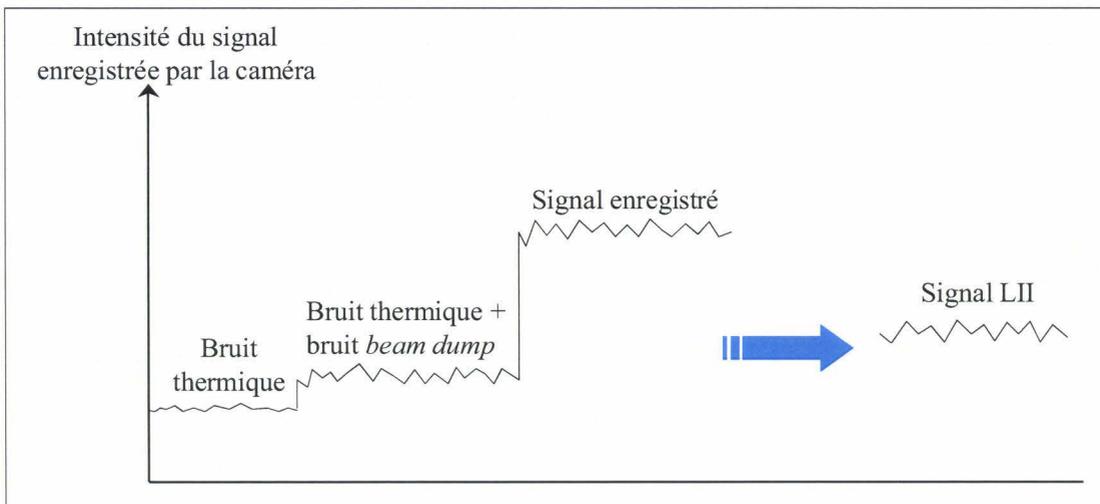


Figure 5.11 : Représentation du bruit suivant chaque type de mesure. Le signal LII correspond au signal enregistré auquel le bruit thermique plus le bruit *beam dump* ont été retranchés.

5.2.2.2.1 Signaux LII en régime transitoire

Le but recherché dans le projet AEROTEST est de déterminer la fraction volumique de suies pour des régimes stabilisés. Cependant, nous avons enregistré le signal LII pendant la phase de démarrage. La Figure 5.12 montre un exemple des intensités des signaux enregistrés pendant deux différents démarrages du moteur. L'axe des abscisses représente le nombre de pulses (le laser étant pulsé à 10 Hz, 10 pulses représentent 1 seconde).

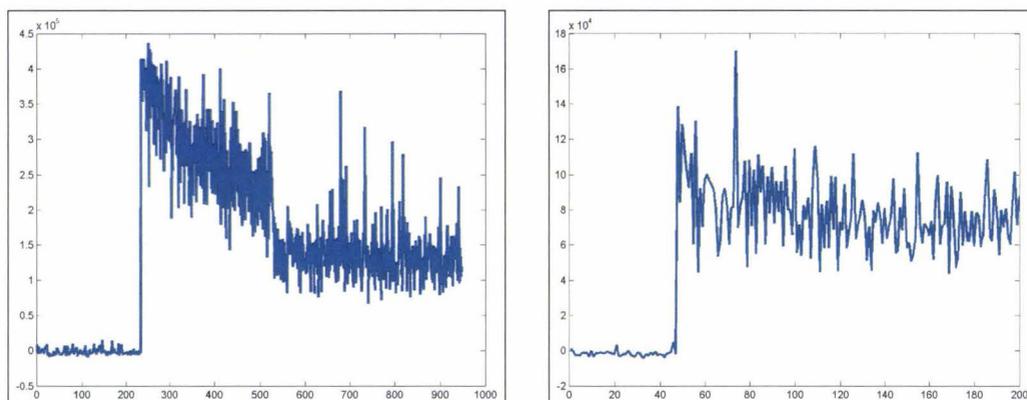


Figure 5.12 : Exemples d'intensité totale des signaux LII enregistrés pendant la phase de démarrage du moteur. Les particules de suie sont excitées en utilisant le laser CFR200.

Le démarrage du moteur se traduit par l'enregistrement d'un pic du signal LII, qui décroît ensuite. Ceci indique une production importante de suies qui est due à une injection de kérosène supplémentaire pendant la phase de démarrage (combustion riche). La différence des signaux enregistrés vient du fait que la vitesse du moteur est contrôlée manuellement.

Il est intéressant de noter un phénomène similaire pendant une phase d'accélération du moteur. La Figure 5.13 montre le signal LII enregistré par la caméra lors d'une phase d'accélération lente du moteur de 20000 à 24000 tours par minute, suivie d'une décélération rapide.

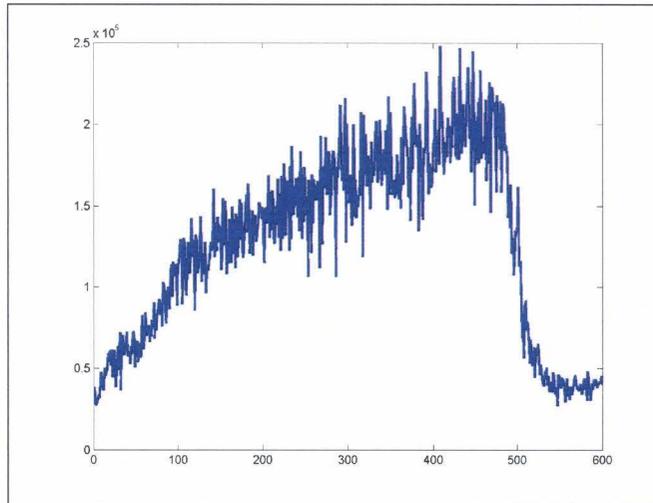


Figure 5.13 : Signal LII enregistré pendant l'accélération lente du moteur de 20000 à 24000 tours par minute, suivie d'une décélération rapide. Signaux enregistrés avec le laser Brilliant pour une densité d'énergie de $0,24 \text{ J.cm}^{-2}$.

On observe une augmentation lente du signal puis une décroissance très rapide qui est liée à la variation de la vitesse moteur.

Au cours d'expériences LII réalisées avec le système Metrolaser (cf. chapitre 1) sur un moteur aéronautique de 1 m de diamètre, [Jenkins, 2003] a également montré que la production intense de particules de suie s'effectuaient lors des changements rapides de régime. La Figure 5.14 montre les signaux LII enregistrés corrélés à la vitesse du moteur en fonction du temps. Pour chaque phase d'accélération, un signal pic est enregistré ; pendant les phases à vitesse constante, le signal est constant et varie en fonction de la puissance moteur ; pendant les phases de décélération, le signal LII chute.

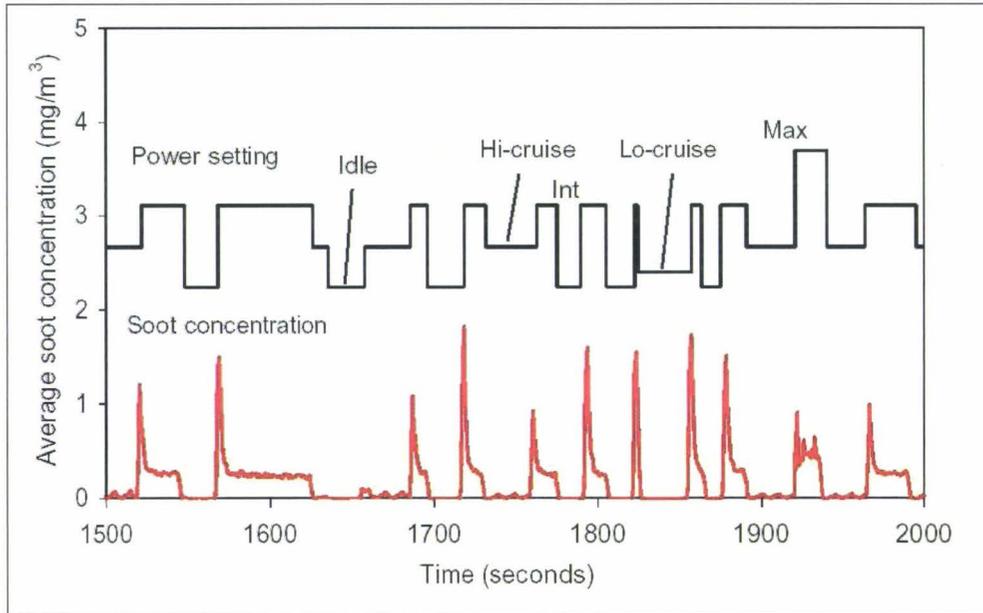


Figure 5.14 : Signaux LII enregistrés par [Jenkins, 2002] avec le système Metrolaser sur un moteur de 1 mètre de diamètre.

5.2.2.2 Signaux LII en régime stationnaire

Le régime stationnaire correspond à une vitesse constante du moteur et donc à une émission de polluants supposée constante. Les gaz d'échappement ont été balayés avec les deux lasers. Le balayage correspond à 8 positions équidistantes pour lesquelles les mesures LII ont été réalisées. La Figure 5.15 montre les profils du signal LII selon l'axe vertical obtenus avec le laser CFR200 pour une densité d'énergie de $0,22 \text{ J.cm}^{-2}$ et un temps d'exposition de 100 ns. Trois vitesses ont été testées : 10800 rpm, 15700 rpm et 21000 rpm.

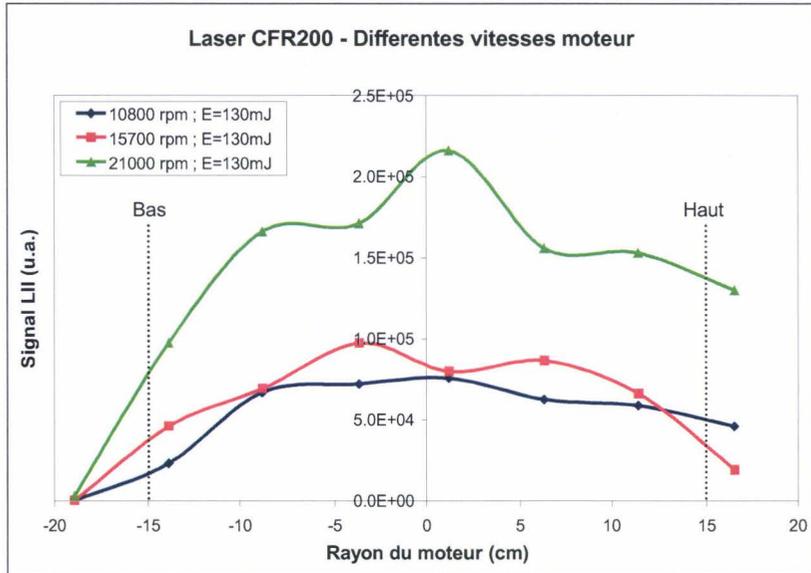


Figure 5.15 : Balayage des gaz d'échappement pour différentes vitesses avec le laser CFR200 (densité d'énergie de $0,22 \text{ J.cm}^{-2}$).

La partie gauche du graphique représente la partie basse des gaz d'échappement alors que la partie de droite représente la partie haute. L'axe des abscisses représente le rayon de la turbine ; la valeur 0 correspond à l'axe de la turbine. Quelle que soit la vitesse du moteur les profils sont de forme similaires. En revanche, plus la vitesse du moteur est grande plus l'intensité du signal enregistrée par la caméra est grande. Des observations similaires ont été faites avec le laser Brilliant pour des temps d'exposition plus courts (40 ns).

5.2.2.2.3 Signal LII en fonction de la densité d'énergie

Au cours de cette campagne de mesure, nous avons tenté d'enregistrer le signal LII en fonction de la densité d'énergie. Cette étude a été réalisée avec le laser Brilliant. L'énergie laser étant contrôlée manuellement par l'atténuateur, il n'a pas été possible d'enregistrer une courbe de saturation car, il est nécessaire d'arrêter le moteur pour entrer dans le banc moteur et changer l'énergie laser. Cependant, la Figure 5.16 montre les images LII enregistrées pour différentes densités d'énergie afin de déterminer l'apparition du régime de sublimation des particules de suie.

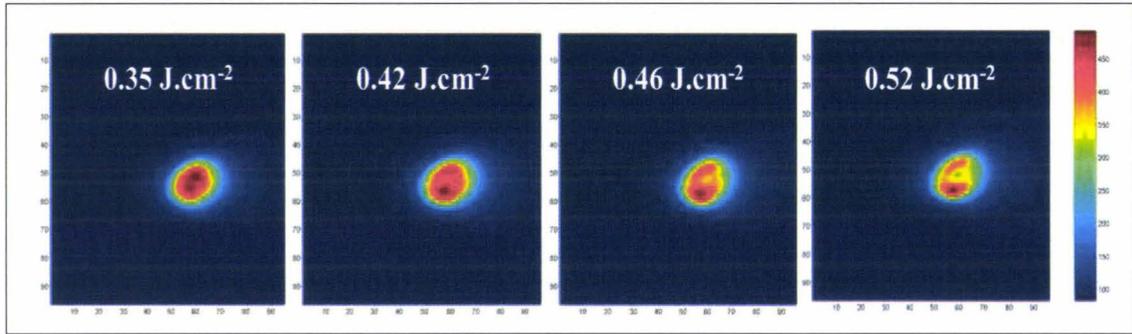


Figure 5.16 : Images LII enregistrées en fonction de la densité d'énergie du laser Brilliant.

La forme ovale du spot LII provient d'une distorsion du faisceau laser au passage du prisme du système LII. L'apparition du trou au centre du spot LII, indiquant la sublimation des particules de suie, est visible pour les densités d'énergie $0,46 \text{ J.cm}^{-2}$ et $0,52 \text{ J.cm}^{-2}$. En effet, pour des densités d'énergie égales ou supérieures à $0,46 \text{ J.cm}^{-2}$, la sublimation des particules de suie est activée et on observe la disparition du signal dans la zone centrale du spot LII (cf. annexe B). Cette densité d'énergie est bien supérieure à celle nécessaire pour sublimer les particules de suie dans le brûleur kérosène.

5.2.2.3 Conclusion

Bien que la configuration de l'installation du système LII soit différente de celle de l'université RWTH, le système utilisant le laser CFR200 non focalisé a montré son bon fonctionnement en dépit de sa faible densité d'énergie. En effet, la turbine étudiée chez Rolls-Royce produit beaucoup plus de particules de suie que la turbine ATAR. Avec le laser CFR200 il n'a pas été possible d'atteindre la sublimation des particules de suie. Au cours de cette campagne, les problèmes rencontrés lors de la première campagne de mesure ont été résolus : l'utilisation d'un beam dump permet de limiter le signal bruit et l'utilisation du laser Brilliant permet d'avoir une plage de densité d'énergie suffisante pour atteindre la sublimation des particules de suie. L'inconvénient est qu'il n'était pas possible de contrôler l'énergie laser à distance.

A la suite de cette campagne de mesure, il a été décidé de remplacer le laser CFR200 par un CFR400 intégrant un contrôleur d'énergie et un mesureur d'énergie. L'ensemble sera piloté à distance via le réseau Internet.

5.2.3 Université RWTH, mars 2006

Nous rappelons que le projet AEROTEST vise à mesurer l'émission de particules de suie à l'échappement des turbines aéronautiques, mais aussi les émissions gazeuses polluantes : CO, CO₂ et NO_x. Au cours de cette campagne, les mesures LII ont été réalisées simultanément avec des mesures spectroscopiques FTIR (Transformée de Fourier Infra Rouge) pour déterminer les concentrations en CO/CO₂ et NO_x. C'est pourquoi les configurations de mesures sont différentes des précédentes.

Cette campagne de mesure a été réalisée avec un laser CFR400 prêté par la société Quantel.

5.2.3.1 Installation

Deux configurations ont été testées au cours de cette campagne. La Figure 5.17 montre la première installation du système LII pendant cette campagne de mesure. Le système était positionné sur un plan incliné. L'ensemble était placé sur un système absorbant les vibrations mécaniques générées par la turbine en fonctionnement. Cette configuration, décidée par le consortium AEROTEST, impose de réaliser les mesures LII à 90 cm du plan de sortie de la tuyère. Les mesures ont été réalisées avec le même système LII utilisé au cours de la dernière campagne, mais le laser CFR200 a été remplacé par CFR400 cadencé à 30 Hz prêté par la société Quantel.

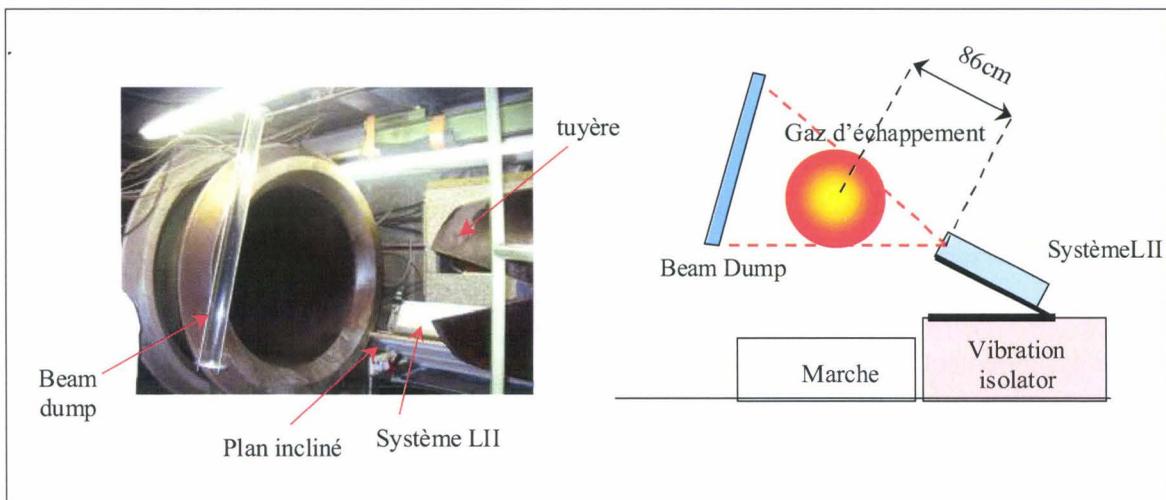


Figure 5.17 : Installation du système LII.

La deuxième configuration testée a permis de diminuer la distance entre la tuyère et l'axe du faisceau laser. Cependant cette configuration ne permet pas de réaliser simultanément les mesures LII et FTIR. La Figure 5.18 montre la deuxième configuration testée pendant cette campagne de mesure.

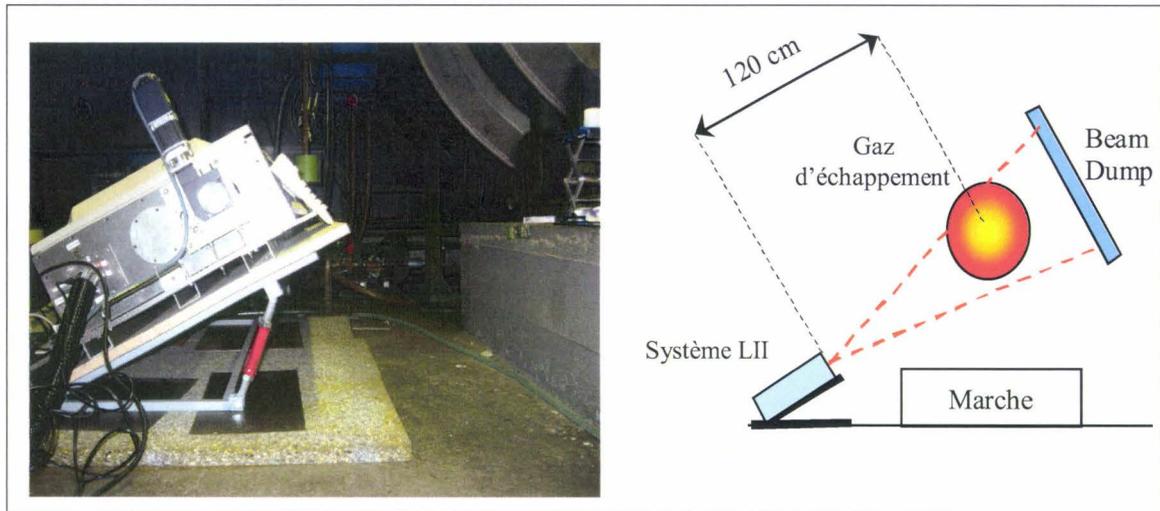


Figure 5.18 : deuxième configuration de mesure. L'équipement LII est positionné sur un plan incliné. L'ensemble repose au sol sur des plaques en mousse pour absorber les vibrations mécaniques générées par la turbine.

Le système LII est toujours positionné sur un plan incliné. L'ensemble repose au sol sur des plaques de mousse pour absorber les vibrations mécaniques de la turbine. Le faisceau laser traverse les gaz d'échappement 45 cm en aval de la turbine. Cette distance est toujours supérieure à celle imposée par les normes de l'ICAO pour les mesures de smoke number.

5.2.3.2 Résultats

Les mesures réalisées suivant la première configuration n'ont pas permis d'enregistrer un signal LII quel que soit le régime moteur, la densité d'énergie utilisée et le temps d'exposition. La Figure 5.19 montre le signal enregistré par la caméra pendant le balayage des gaz d'échappement. Chaque image correspond à une position du prisme. Les images enregistrées montrent un signal diffus provenant de la réflexion du laser sur le beam dump. Ceci s'explique par les vibrations produites par la turbine en fonctionnement qui ont sensiblement affecté le dispositif LII placé à proximité de l'extracteur au cours de cette campagne.

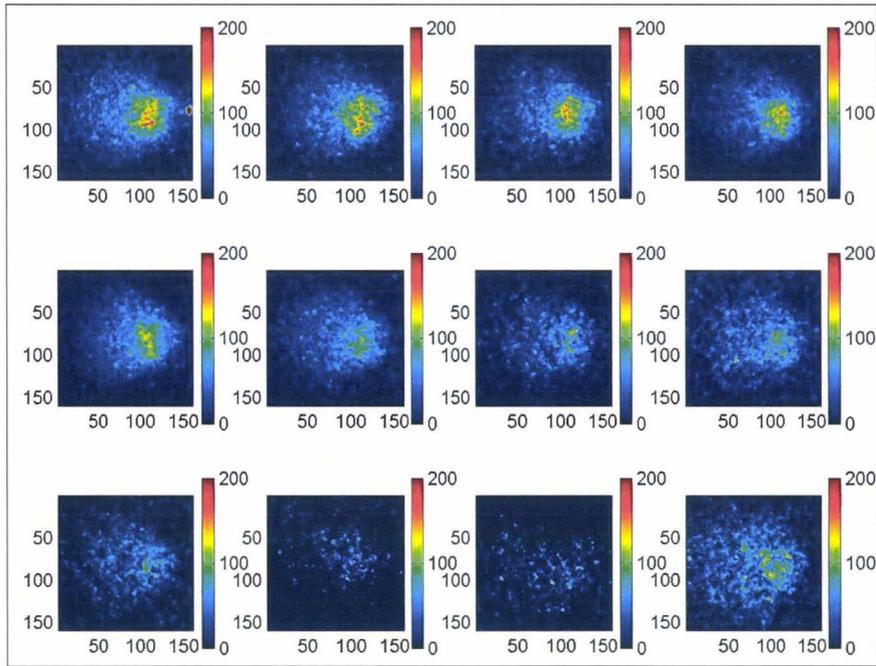


Figure 5.19 : Signal enregistré pendant le balayage des gaz d'échappement suivant la première configuration testée. Chaque image correspond à une position du prisme.

La deuxième configuration testée a permis de réaliser les mesures 45 cm en aval de la sortie de la tuyère. Les mesures ont été réalisées pour les quatre régimes cités précédemment : *Idle*, *cruise*, *take off* et *thrust*. Pour chaque régime, un balayage des gaz d'échappement est effectué. Aux régimes *Idle* et *cruise*, aucun signal n'a pu être enregistré. Au régime *take off*, une très faible intensité de signal LII a été enregistrée, mais le rapport signal sur bruit est inférieur à 2. En revanche, pour le régime *thrust*, un signal LII a été enregistré avec un rapport signal sur bruit de 2,5. La Figure 5.20 montre les profils verticaux des signaux enregistrés aux régimes *take off* et *thrust* (le balayage correspond à 12 points de mesure équidistants). La forte intensité du signal enregistré dans la partie supérieure des gaz d'échappement correspond à des réflexions du faisceau laser sur les murs, derrière le *beam dump* (nous rappelons que le *beam dump* fonctionne comme une lentille convergente et non pas comme un absorbeur d'énergie). Ceci vient du fait que l'axe horizontal du faisceau laser est très bas par rapport à l'axe de la turbine. Le banc d'essai étant très confiné, la diffusion du faisceau laser après le *beam dump* ne peut se faire convenablement. Nous ne tiendrons donc pas compte des résultats obtenus dans la partie supérieure des gaz d'échappement. De plus, le diamètre du faisceau laser du CFR400 est de 12 mm au niveau de l'axe de la turbine ce qui permet d'atteindre une densité d'énergie maximale de $0,18 \text{ J.cm}^{-2}$ en sortie de l'équipement.

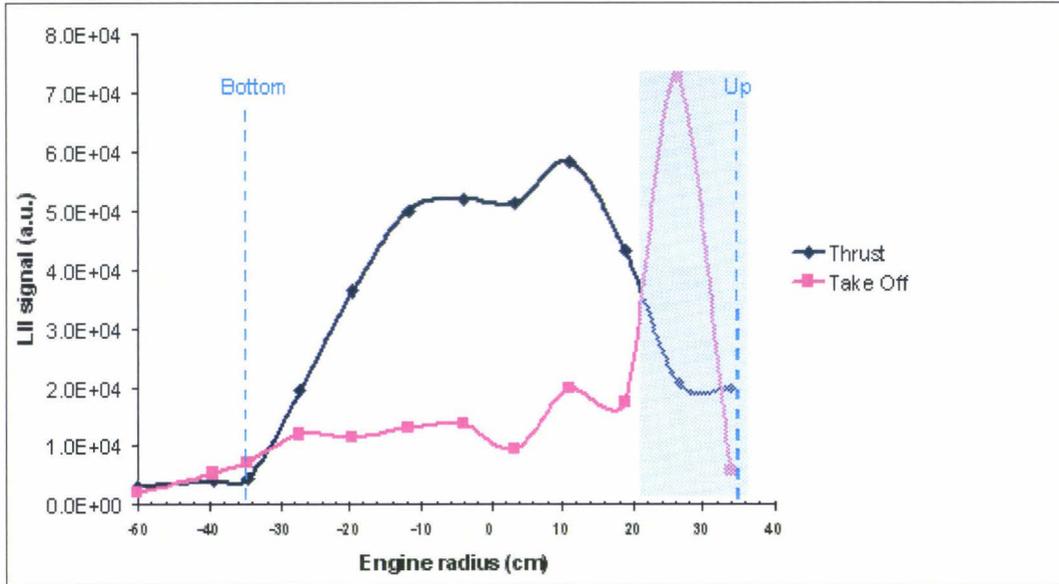


Figure 5.20 : Profils verticaux des signaux LII pour les régimes take off et thrust.

Nous rappelons que le régime *thrust* correspond au régime *take off* mais avec la tuyère fermée. La fermeture de la tuyère provoque la concentration des gaz d'échappement mais également entraîne une augmentation du débit de kérosène injecté dans la chambre de combustion pour le même débit d'air. La production de particules de suie est donc plus importante due à une combustion plus riche. L'intensité des signaux est ainsi plus grande en régime *thrust* qu'en régime *take off*. Les profils obtenus montrent un signal LII plus grand au niveau de l'axe de la turbine ce qui semble indiquer que la distribution des particules de suie est concentrée au centre des gaz d'échappement, pour une distance d'intégration identique de 70 cm. Cependant, cette distance d'intégration est plus petite lorsqu'on s'écarte de l'axe de la turbine, ce qui a pour effet d'augmenter la concentration (cf. équation 4.13).

5.2.3.3 Conclusion

Pour les deux configurations testées au cours de cette campagne, la distance entre le plan de sortie des gaz d'échappement de la tuyère et la zone de mesure est supérieure à la distance imposée par l'ICAO pour les mesures du smoke number. Cette distance était liée aux contraintes initiales du projet AEROTEST de réaliser les mesures LII/FTIR simultanément et à la configuration confinée du banc de mesure. Pour une distance de 90 cm en aval de la turbine, aucun signal n'a été mesuré. En aval de 45 cm de la turbine, seul le régime *thrust* a permis d'enregistrer un signal LII. Dans le but d'optimiser les mesures LII, il a été décidé de se rapprocher de la tuyère afin de réduire l'effet de la dilution importante générée par

l'extracteur très puissant associé au moteur. Les deux campagnes qui ont suivi ont donc été réalisées en l'absence du système FTIR (qui ne permettait pas ce rapprochement).

5.2.4 Université RWTH, août 2006

Cette nouvelle campagne de mesure réalisée à l'université RWTH de Aachen a été réalisée avec le laser CFR400 acquis pendant le projet pour remplacer le laser CFR200. Les caractéristiques de ce faisceau montrent qu'il est plus divergent que le laser initial. Les mesures ont été réalisées sans le télescope destiné à corriger cette divergence. Cette campagne a pour objectif de déterminer la meilleure position en aval de la tuyère pour réaliser les mesures LII.

5.2.4.1 Installation

Au cours de cette campagne, deux configurations ont été testées (Figure 5.21). L'équipement LII était posé sur une table équipée d'absorbeur de vibrations. L'axe du faisceau laser était à une hauteur légèrement supérieure à l'axe de la turbine, afin de pouvoir balayer toute la section des gaz d'échappement. Le faisceau laser passait à 4 cm (première configuration) et à 45 cm (seconde configuration) après le plan de sortie de la tuyère. Le diamètre du faisceau laser au niveau de l'axe de la tuyère était de 15 mm dans la première configuration et de 14 mm dans la deuxième configuration, ce qui correspond à une densité d'énergie maximale de $0,13 \text{ J.cm}^{-2}$ et $0,14 \text{ J.cm}^{-2}$ respectivement.

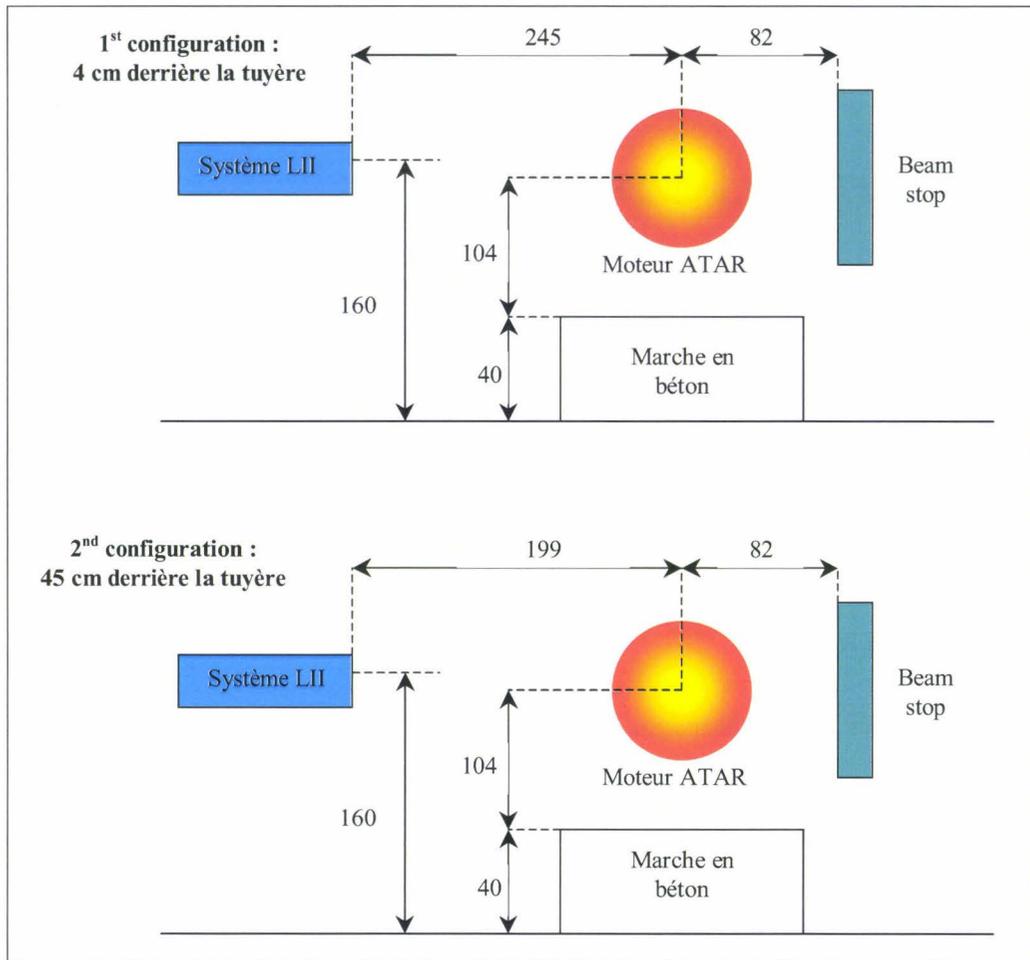


Figure 5.21 : Configurations de mesure testées au cours de la 4^{ème} campagne de mesure.

5.2.4.2 Résultats

Pour les deux configurations testées, les signaux enregistrés aux régimes *Idle* et *cruise* sont très bas (très légèrement supérieurs à l'intensité du bruit). Au régime *take off*, l'intensité du signal LII est légèrement supérieure au bruit dû au *beam dump*. Dans ces conditions, il est très difficile de déterminer un profil vertical des particules de suie dans les gaz d'échappement de la turbine. En revanche, au régime *thrust*, la qualité des signaux est satisfaisante. La Figure 5.22 montre le profil du signal LII et les images associées pour chaque position du faisceau laser.

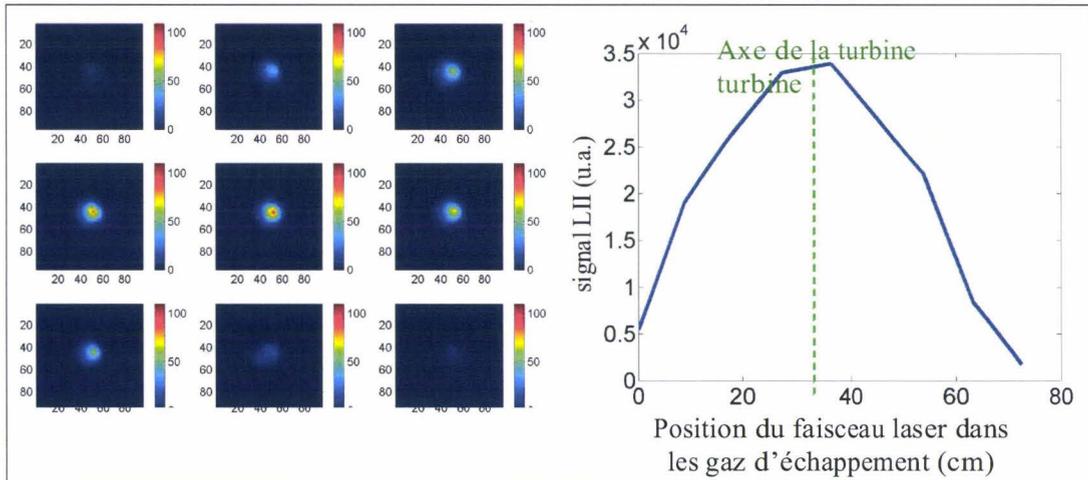


Figure 5.22 : Profil du signal LII dans les gaz d'échappement (à droite) et images associées (à gauche) au régime *thrust*.

Le graphique montre le profil du signal LII en fonction de la position dans les gaz d'échappement du moteur. L'origine des abscisses correspond à la limite inférieure du moteur. Le profil du signal LII suivant l'axe vertical est similaire à celui enregistré lors de la deuxième campagne de mesure sur ce moteur. Ceci confirme ainsi les résultats précédents.

5.2.4.3 Conclusion

Pendant cette campagne, les seuls signaux LII exploitables sont ceux obtenus pour le régime *thrust*, pour lequel le rapport signal sur bruit est de 2. Cette campagne nous a permis de tester le laser CFR400 acquis lors de ce projet pour remplacer le laser CFR200 de l'équipement LII. L'atténuateur d'énergie et le mesureur d'énergie intégrés sont très précis. Malheureusement, la divergence du faisceau laser, qu'on espérait meilleure, ne permet toujours pas d'atteindre une densité d'énergie suffisante pour atteindre le régime de sublimation des particules de suie. Un télescope a aussi été étudié afin de compenser cette divergence (cf. chapitre 3).

5.2.5 Siemens, Novembre 2006

Cette campagne de mesure a été réalisée sur une turbine à gaz SGT300.

5.2.5.1 Installation

Contrairement aux turbines aéronautiques pour lesquelles les gaz de combustion sont éjectés à l'air libre, ceux de la turbine à gaz sont confinés dans une canalisation. Les mesures ont été réalisées environ 10 m après la chambre de combustion où la température des gaz est d'environ 750 K.

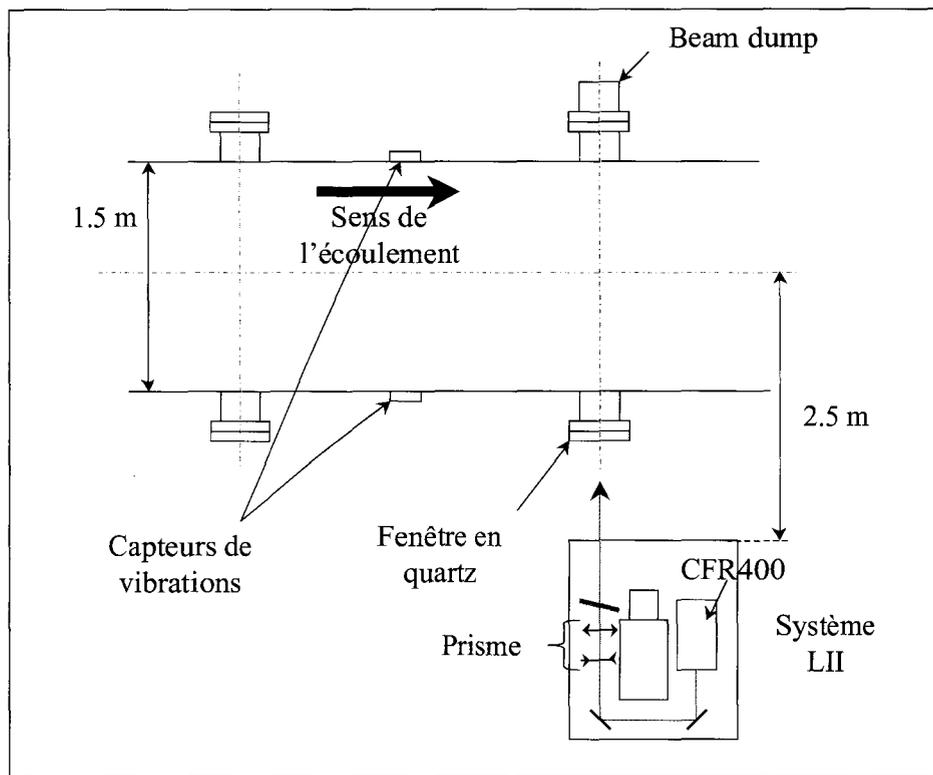


Figure 5.23 : Installation de l'équipement LII pour les mesures dans la turbine à gaz.

Les mesures LII ont été réalisées suivant un seul axe coupant l'axe de la canalisation de diamètre 1,5 m. Le système LII était composé du laser CFR400 et du télescope pour limiter la divergence du faisceau. Pour réaliser ces mesures, le prisme de sortie, permettant le balayage des gaz d'échappement, a été enlevé. La sortie de l'équipement laser était à 2,5 m de l'axe de la canalisation. Le diamètre du faisceau laser était de 12 mm à l'entrée de la canalisation et 10 mm à la sortie. Un nouveau beam dump permettant de 'piéger' le faisceau laser et fourni par Rolls-Royce a été testé. Notons que les mesures ont été réalisées sur une plate-forme à environ 5 m de hauteur. Pendant les mesures la température ambiante atteignait 45°C et davantage dans l'équipement LII où se trouvent la caméra et le laser.

5.2.5.2 Résultats

Les mesures ont été réalisées pour deux combustibles : un gazeux (gaz naturel) l'autre liquide (huile) et pour différentes charges (ou puissances de la turbine). Généralement, les turbines à gaz sont prévues pour fonctionner à pleine charge (100%). Les mesures ont donc été réalisées à pleine charge puis la charge a été diminuée progressivement. Un signal LII a pu être détecté uniquement pour le combustible liquide et en deçà d'une charge de 50%.

Nos résultats ont été enregistrés pour une charge de 50% et 40%. Au cours de cette campagne, un dysfonctionnement de la caméra (probablement dû à l'air ambiant très chaud) nous a contraint à arrêter les mesures.

La Figure 5.24 montre les courbes de saturation obtenues pour une charge de 40% dans les gaz d'échappement de la turbine à gaz et dans la cellule de calibration du brûleur kérosène.

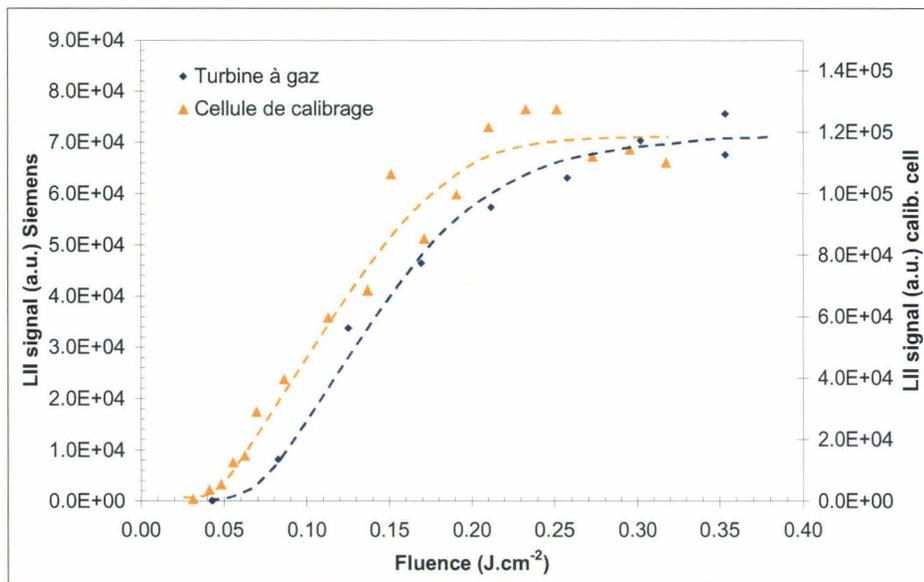


Figure 5.24 : Courbes de saturation normalisées réalisées dans la cellule de calibration du brûleur kérosène et dans la turbine à gaz pour une charge de 40%, pour les mêmes conditions d'excitation.

Les deux courbes ont le même profil mais la courbe obtenue dans la turbine à gaz est décalée vers les plus hautes densités d'énergie. A partir du décalage entre les courbes, nous en avons déduit qu'il est nécessaire d'apporter 27% d'énergie en plus aux particules de suie issues de la turbine à gaz pour atteindre le même niveau de signal que dans la cellule de calibration. Etant donné que les conditions de mesures sont les mêmes (température, distance équipement LII – axe de la turbine), il est probable que ce décalage provienne d'une variation

des propriétés physico-chimiques des particules de suie, car la nature du combustible est différente. La Figure 5.25 montre les spots LII correspondant aux courbes de densité d'énergie réalisées dans la turbine à gaz (à gauche) et dans la cellule de calibrage (à droite). Dans la turbine à gaz, l'élargissement du spot en fonction de la densité d'énergie est bien visible mais le régime de sublimation des particules de suie n'est pas atteint pour des hautes densités d'énergie, ce qui confirme la moins grande capacité des particules de suie à élever leur température.

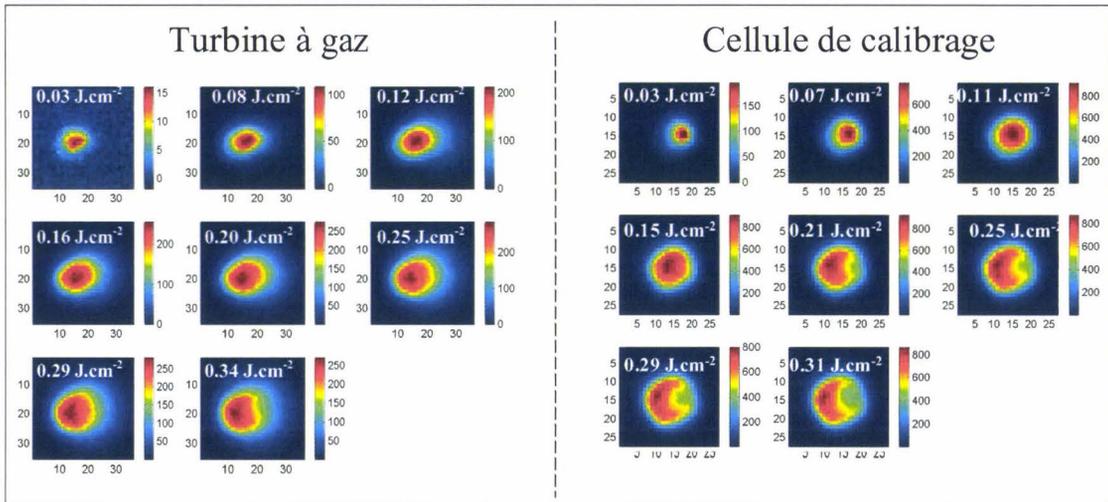


Figure 5.25 : Images LII enregistrées dans la cellule de calibrage (à droite) et dans la turbine à gaz (à gauche) correspondant aux courbes de densité d'énergie.

Nous rappelons qu'une intensité le signal LII de $1,16 \cdot 10^5$, correspondant à une fraction volumique de 44 ppb, mesurée dans la cellule de calibrage juste au démarrage du plateau de la courbe de saturation pour une densité d'énergie de $0,21 \text{ J.cm}^{-2}$. La courbe de saturation obtenue dans la turbine à gaz pour une charge de 40% permet de déterminer le signal LII pour cette même position sur la courbe de densité d'énergie ($0,26 \text{ J.cm}^{-2}$). La fraction volumique de suies est calculée à partir de l'équation déterminée au chapitre 4 :

$$f_v^{Turbine} = f_v^{Calib} \left(\frac{L_{Calib}}{L_{Turbine}} \right) \left(\frac{S_{LII}^{Calib}}{S_{LII}^{Turbine}} \right)^{-1} \left(\frac{E(m)_{Calib}}{E(m)_{Turbine}} \right) \left(\frac{D_{Calib}}{D_{Turbine}} \right) \quad \text{Équation 5.1}$$

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 4, pour des mesures réalisées dans des conditions expérimentales identiques, le décalage des courbes de saturation peut être attribué à une variation des propriétés physico-chimiques et optiques des particules de suie.

Dans l'équation 5.1, cette variation est prise en compte dans le rapport $\frac{E(m)^{Cheminée}}{E(m)^{Turbine}}$, en

supposant que l'énergie supplémentaire à apporter aux particules de suie (soit 27%) soit due à la variation des propriétés optiques. La longueur d'intégration est équivalente au diamètre de la canalisation (1,5 m) et le facteur correctif de l'ouverture du diaphragme est égal à 0,125. Le signal LII mesuré pour une densité de $0,26 \text{ J.cm}^{-2}$ est de $6,4 \cdot 10^4$ dans la turbine. Ainsi, la fraction volumique de suies produite par la combustion d'un combustible liquide (huile) est de 26 ppb pour une charge de 40% et de seulement 0,05 ppb pour une charge de 50%. On constate ainsi que plus la charge est importante, plus la production de particules de suie est faible.

Pour ces conditions de mesure et grâce à l'absorbeur d'énergie avec lequel l'intensité du bruit dû au *beam dump* est négligeable, la limite de détection du système LII a été déterminée à seulement 10 ppt pour une longueur optique de 1,5 m.

5.2.5.3 Conclusion

Cette campagne a permis de tester le système LII dans sa version finale, et dans la même configuration que celle utilisée pour le calibrage du système. Au cours de cette campagne, un dysfonctionnement de la caméra n'a pas permis de réaliser toutes les mesures nécessaires. Cependant nous avons pu déterminer une courbe de saturation en excellent accord avec la courbe réalisée dans la cellule de calibrage. La limite de détection a été déterminée à 10 ppt pour un chemin optique de 1,5 m. Cette sensibilité ne s'est pas avérée suffisante pour détecter les particules de suie en régime de fonctionnement pleine charge. Notons qu'en parallèle, des mesures de CO au cours de cette campagne indiquent une très forte augmentation en deçà de 50% de charge qui semble corrélérer à la production de particules de suie.

5.2.6 Université RWTH, janvier 2007

Cette dernière campagne a été réalisée avec la version finale du système LII. Les conditions de mesure sont les mêmes que celles utilisées au cours du calibrage du système LII (distance sortie du système LII – axe de la turbine, forme du faisceau laser, ...). Elle a permis de déterminer la fraction volumique de suies produit par le moteur ATAR suivant les quatre régimes (*Idle, cruise, take off et thrust*).

5.2.6.1 Installation

La Figure 5.26 présente la configuration utilisée lors de cette campagne. Le faisceau laser traversait les gaz d'échappement 7 cm après le plan de sortie de la tuyère. Le système LII était le même que pendant la dernière campagne à l'université RWTH (avec le télescope pour corriger la divergence du faisceau laser). La sortie du système LII était positionnée à 2,44 m de l'axe de la turbine et à une hauteur quasiment équivalente (axe laser : 162 cm ; axe turbine : 146 cm). Ceci a permis de réaliser un balayage complet des gaz d'échappement. Le diamètre du faisceau laser au niveau de l'axe de la tuyère est de 9,5 mm, ce qui permettait d'atteindre une densité d'énergie de $0,29 \text{ J.cm}^{-2}$.

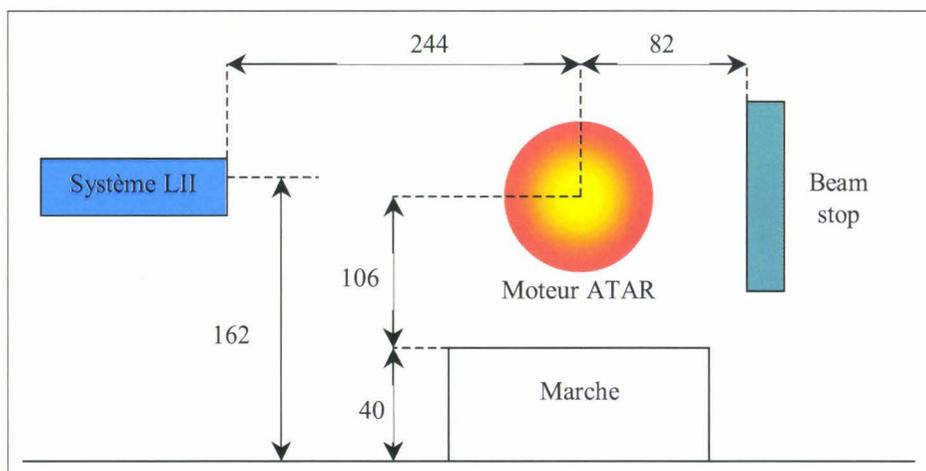


Figure 5.26 : Installation de l'équipement LII sur le banc moteur pour la campagne en janvier 2007.

5.2.6.2 Résultats

Les mesures ont été réalisées pour les quatre différents régimes moteur. L'intensité des signaux enregistrée aux régimes *Idle* et *cruise* sont quasiment équivalents au bruit et ne permettent pas de déterminer une fraction volumique de suies avec grande précision. Nous rappelons que le régime *take off* et *thrust* sont les mêmes, seule l'ouverture de la tuyère change. Nous avons ainsi enregistré le signal LII au régime *take off* pour différentes positions de la tuyère : ouverte, semi-fermée et fermée.

Au vu des précédents résultats montrant l'intensité maximale du signal LII au niveau de l'axe de la turbine, les courbes de saturation et les fractions volumiques ont été déterminées suivant cet axe. La Figure 5.27 montre les courbes de saturation normalisées

obtenues dans les gaz d'échappement de la turbine ATAR au régime *thrust* et dans la cellule de calibrage du brûleur kérosène.

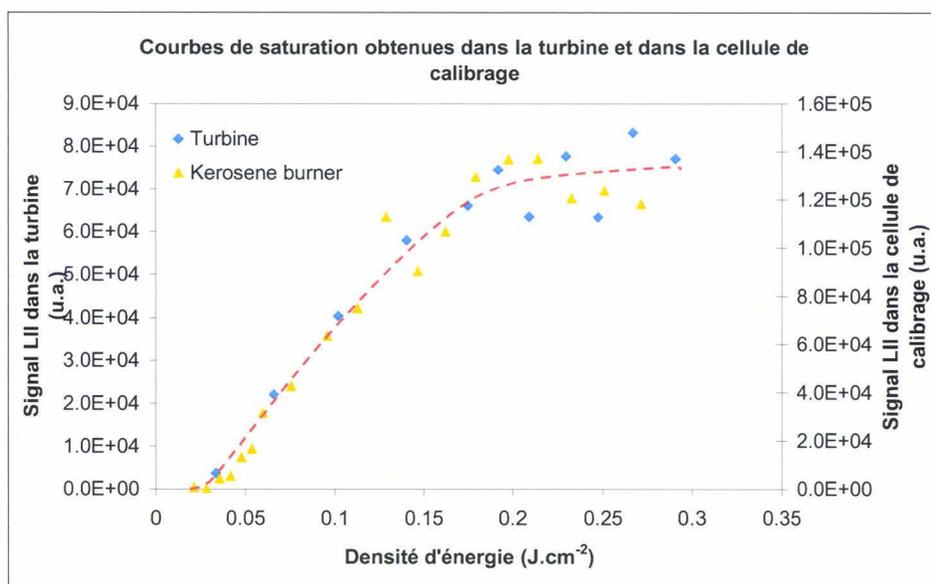


Figure 5.27 : Courbes de saturations obtenues dans les gaz d'échappement de la turbine ATAR et dans la cellule de calibrage du brûleur kérosène.

Nous pouvons noter une très bonne concordance des deux courbes. Les conditions expérimentales sont les mêmes que lors du calibrage du système LII (distance laser – axe de la turbine, forme du faisceau laser, délai caméra, temps d'exposition, température des particules de suie) à l'exception de l'ouverture du diaphragme de l'objectif ($f/4$) et de la fraction volumique. Cette très bonne concordance semble indiquer que les particules de suie produites par le brûleur kérosène et par les turbines aéronautiques ont des propriétés physico-chimiques équivalentes et des températures initiales des particules de suie similaires.

La Figure 5.28 représente les profils verticaux des signaux LII obtenus pour une densité d'énergie de $0,29 J.cm^{-2}$ pour différentes positions de la tuyère : ouverte, semi-fermée et fermée. La fermeture de la tuyère a deux conséquences : d'une part, la section de sortie est plus petite ce qui a pour conséquence de concentrer les gaz d'échappement et, d'autre part, d'augmenter le débit de kérosène en conservant le même débit d'air ce qui permet d'avoir une combustion plus riche.

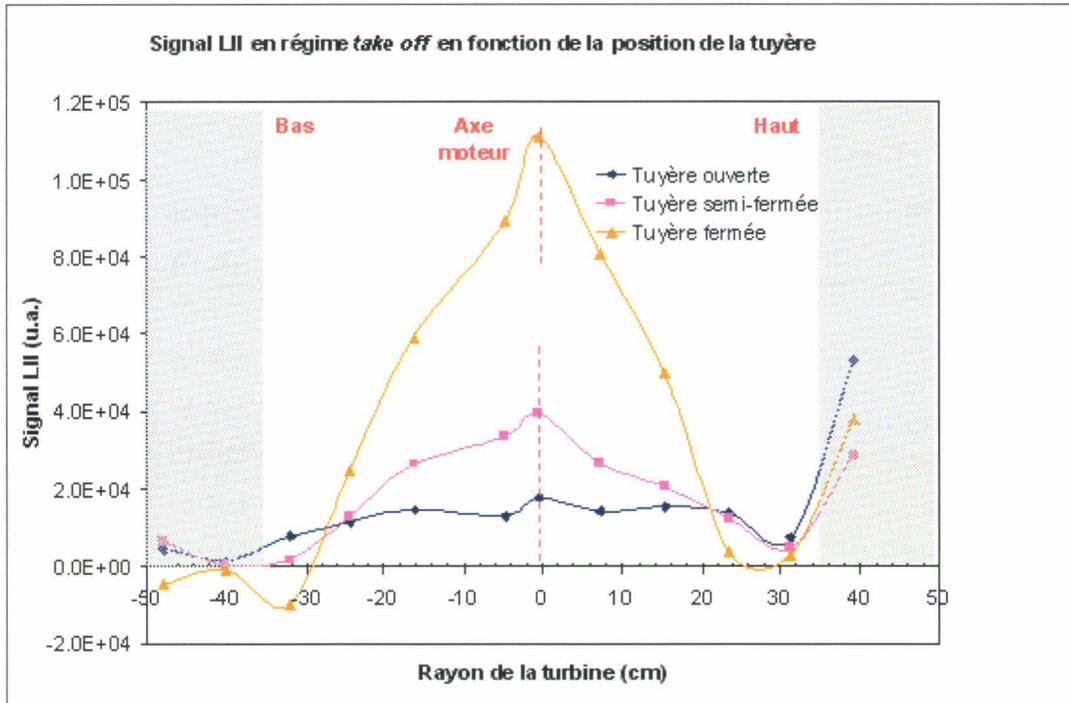


Figure 5.28 : Profils verticaux des signaux LII en régime *take off* pour différentes positions de la tuyère.

Comme nous pouvions nous y attendre, le signal LII augmente au fur et à mesure que la tuyère se ferme. En revanche les profils LII sont différents car la fermeture de la tuyère réduit la section de passage suivant l'axe vertical. La largeur des profils LII pris arbitrairement à 1/e correspond à la longueur de passage suivant l'axe vertical. Ainsi, pour la tuyère ouverte, semi-fermée et fermée, les largeurs mesurées sont respectivement 53 cm, 36 cm et 31 cm pour des hauteurs de tuyère suivant l'axe vertical de 70 cm, 55 cm et 40 cm respectivement (Figure 5.29).

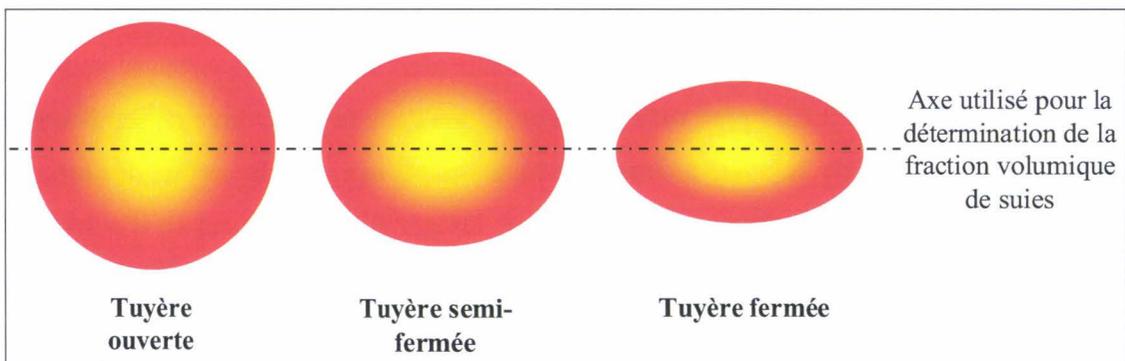


Figure 5.29 : Forme de la section de sortie de la tuyère suivant la position de la tuyère : ouverte, semi-fermée ou fermée. L'axe horizontal correspond au passage du faisceau laser.

A partir de ces signaux et de l'équation 5.1, il est ainsi possible de calculer la fraction volumique de suies moyenne pour chaque position de la tuyère le long de l'axe dessiné Figure 5.29. Dans cette équation, la longueur d'intégration dans la turbine est de 70 cm quelle que soit la position de la tuyère car le signal est intégré suivant l'axe horizontal (la fermeture de la tuyère n'agit que suivant l'axe vertical). Les courbes de saturation se superposant, le rapport des fonctions d'absorption dans la turbine ATAR et dans la cellule de calibration est égal à 1 et le rapport des ouvertures du diaphragme est égal à 0,25 pour chaque régime. Malgré le faible rapport signal sur bruit mesuré aux régimes *Idle* et *cruise*, nous avons déterminé la fraction volumique de suies également pour ces régimes. La Figure 5.30 résume les spots enregistrés ainsi que les fractions volumiques de suies calculées.

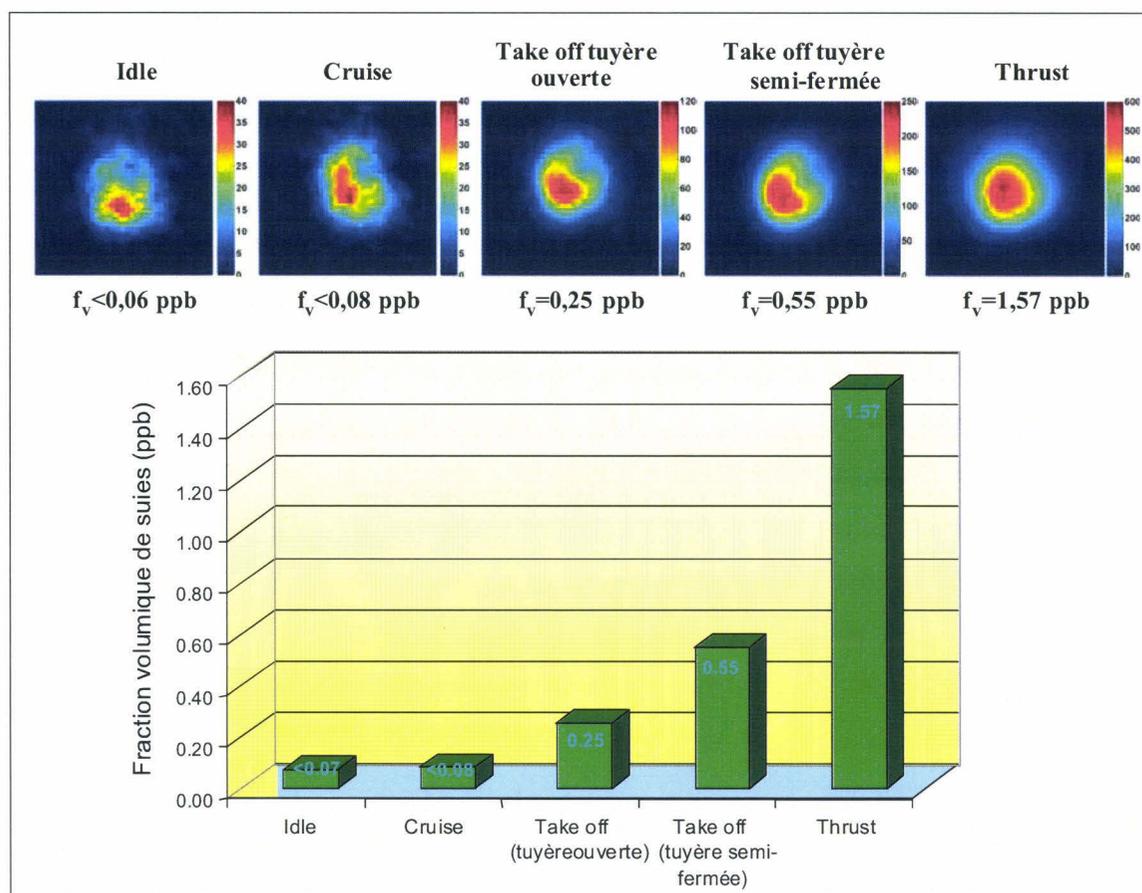


Figure 5.30 : Images LII enregistrées pour chaque régime au niveau de l'axe de la turbine et fractions volumiques calculées pour une longueur d'intégration de 70 cm.

Pour les régimes *Idle* et *cruise*, la fraction volumique est inférieure à 0,1 ppb. Pour le régime *take off*, la fraction volumique est de 0,25 ppb tuyère ouverte, 0,55 ppb tuyère semi-ouverte et 1,56 ppb tuyère fermée. La limite de détection a été estimée à 40 ppt pour un chemin optique de 0,7 m. Ce seuil est limité par le bruit enregistré par la caméra provenant de

la réflexion du laser sur le *beam dump*. Nous pensons pouvoir diminuer ce seuil en utilisant un *beam dump* plus performant, comme celui utilisé lors de la campagne réalisée sur la turbine à gaz, où le faisceau laser était piégé.

5.2.6.3 Conclusion

Les mesures ont été réalisées avec le système LII dans sa version finale et tous les systèmes contrôlés à distance ont été testés avec succès (laser, système d'atténuation du laser, caméra, moteur de la caméra, prisme).

La courbe de saturation obtenue dans les gaz d'échappement de la turbine au régime *thrust* est similaire à celle obtenue dans la cellule de calibrage ce qui démontre la validité de la procédure de calibrage réalisée. Par la suite, nous pourrions utiliser le décalage des courbes de saturation pour évaluer la variation de la fonction d'absorption ($E(m)$) par rapport à celle utilisée pour le calibrage du système (pour des conditions de mesure identiques).

5.2.7 Conclusion des campagnes de mesures

La succession des campagnes de mesures a permis de converger vers un dispositif LII final dont la limite de détection a été estimée à environ 30 ppt par mètre sur la turbine ATAR et 15 ppt par mètre sur la turbine à gaz Siemens. Cette différence est liée au *beam dump* utilisé, qui dans le dernier cas a permis une meilleure absorption du faisceau laser et a contribué à la diminution de l'intensité du signal "bruit". Cependant, pour une charge supérieure à 50% pour la turbine à gaz Siemens et pour les plus faibles puissances pour la turbine ATAR (*Idle* et *cruise*), il est apparu que les niveaux des signaux LII étaient proches de la limite de détection. Dans le cas de la turbine ATAR, il a été nécessaire de travailler à des puissances élevées pour accéder au profil radial des particules de suie en sortie de turbine. De même, il a été nécessaire de travailler en faible charge dans la turbine à gaz.

En revanche, bien que les mesures n'aient pas été quantifiées au moment de leurs réalisations, nous pouvons attester que la turbine d'hélicoptère Rolls-Royce émettait bien plus de particules de suie que les deux précédents systèmes (turbine Siemens et turbine ATAR) du fait de la meilleure qualité et de la plus forte intensité des signaux LII enregistrés. Ceci peut être dû à la distance entre la chambre de combustion et la zone de mesure. Effectivement, cette distance est de plusieurs mètres dans la turbine ATAR et dans la turbine à gaz ce qui

conduit à un temps de séjour assez long dans la turbine et dans ce cas à une dégradation possible des particules de suie.

Sur le plan du calibrage du système LII, la validité de la procédure est attestée vis à vis des mesures réalisées sur les bancs moteurs :

1. La forme des spots LII et leur évolution avec l'énergie laser est tout à fait conforme à celle obtenue dans la cellule de calibrage,
2. Les courbes de saturation obtenues dans les turbines montrent un comportement tout à fait similaire à celles obtenues dans la cellule de calibrage. Pour la turbine ATAR, dont les particules de suie sont issues de la combustion du kérosène Jet A1, les courbes se superposent parfaitement. Pour la turbine à gaz Siemens, dont les particules de suie sont issues de la combustion d'huile, nous observons un décalage entre les courbes que nous avons attribué à une variation des propriétés physico-chimiques, optiques et morphologiques des particules de suie.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail de thèse entrepris dans le cadre du projet européen AEROTEST avait pour but de développer un dispositif de mesure de particules de suie à l'émission de turbines aéronautiques. Le principe de mesure retenu est l'Incandescence Induite par Laser avec la particularité d'une collection du rayonnement émis par les particules de suie dans la direction opposée au sens de propagation du faisceau laser. Cette configuration rétro-LII avait été utilisée dans deux projets européens antérieurs (AEROJET I et II). Elle présente l'avantage d'être compacte, facilement transportable et bien adaptée à la mesure à l'émission de turbines puisque le dispositif, robuste, peut être placé à plusieurs mètres du moteur. Le signal collecté résulte de l'interaction du laser avec les particules de suie contenues dans le panache de la turbine. Il s'agit donc d'un signal intégré spatialement le long du trajet du laser.

L'objectif de mon travail de thèse était de rendre le dispositif rétro-LII "quantitatif" en mettant en œuvre une procédure de calibrage adaptée qui permet de faire le lien entre le signal LII collecté par le détecteur et la fraction volumique de suie dans la turbine. Ce calibrage devait prendre en compte différents paramètres tels que la configuration de la turbine, son diamètre, sa position par rapport au laser, la température des gaz, l'énergie laser et sa distribution spatiale ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des particules de suie.

Dans un premier temps, les performances du dispositif initial, mis à disposition par le projet AEROTEST, ont été évaluées. Le dispositif s'appuyait sur une focalisation du faisceau laser dans la turbine et prévoyait que la zone d'interaction du laser et des particules de suie était limitée géométriquement autour du point de focalisation. A partir du déplacement d'un brûleur de laboratoire de type Wohlfard-Parker, nous avons montré que le volume de mesure était très étendu et que son ampleur était très dépendante de la densité d'énergie laser et de sa distribution spatiale. Le spot LII, recueilli dans la configuration rétro, donne une image précise de la distribution spatiale des photons d'incandescence au sein de la section du laser qui irradie les particules de suie. A forte énergie, la sublimation des particules de suie se traduit par l'absence de signal dans la zone la plus énergétique de la section laser ; de plus l'échauffement des particules de suie contenues dans les ailes du faisceau favorise un élargissement conséquent de la section "utile" d'incandescence, phénomène appelé effets de bord. Une étude fondamentale a été menée sur la dépendance énergétique et spatiale de la sublimation et des effets de bord [Delhay, 2005] et [Bladh, 2006].

Lorsque le panache de particules de suie est chauffé par un laser focalisé, la contribution de la sublimation et des effets de bord varie fortement le long de la zone d'interaction entre le laser et les particules de suie. Cette étude a donc conduit à une remise en cause du dispositif initial focalisé et nous avons préconisé l'utilisation d'un laser plus énergétique en propagation libre. A défaut d'une mesure locale de particules de suie au sein du panache, la mesure spatialement intégrée le long de la traversée du panache, avec une distribution spatiale de l'énergie laser relativement constante dans sa propagation, devait nous permettre d'atteindre notre objectif de mesure quantitative. Ce choix associé à la vérification de la linéarité du dispositif de collection au moyen d'un corps noir calibré furent les points de départ indispensables qui devaient précéder la procédure de calibrage proprement dite.

La procédure de calibrage a reposé sur des mesures comparatives de signaux rétro-LII et de fractions volumiques mesurées par extinction dans un système spécialement conçu et mis au point au cours de la thèse. Il s'agit d'un brûleur produisant une flamme de type swirl, dans lequel le kérosène a servi de combustible, et d'une cellule de calibrage disposée sur la cheminée d'évacuation du brûleur. La caractérisation de l'écoulement dans cette cellule a montré que le profil radial de température et de fraction volumique était reproductible et très homogène sur une distance radiale parfaitement définie (10,4 cm). La température est voisine de celle rencontrée à l'émission de turbines (500 K-1000 K). La cellule de calibrage, traversée par des particules de suie "kérosène", est donc un outil idéal pour le calibrage du dispositif rétro-LII.

Les mesures d'extinction ont été réalisées à la même longueur d'onde que l'excitation LII (1064 nm) et une très bonne relation de proportionnalité entre les signaux LII et la fraction volumique a été observée sur la gamme de fonctionnement du brûleur. Un point de fonctionnement a été sélectionné pour faire le lien entre le signal LII et la fraction volumique pour des conditions expérimentales données. Dans ce calibrage, le dispositif LII était placé à 2,50 m de la cellule, c'est à dire à la distance usuelle utilisée sur les bancs des turbines aéronautiques. Nous avons choisi d'échauffer les particules de suie avec une densité d'énergie laser correspondant au début du plateau de la courbe de saturation LII, afin de s'assurer que les particules atteignent une température proche de la température de sublimation quelles que soient les conditions expérimentales et en particulier les propriétés physico-chimiques des particules de suie. La dépendance de la courbe de saturation avec la température initiale des particules de suie a d'ailleurs été mise en évidence en comparant les résultats obtenus dans la flamme autour de 1900 K et dans la cellule autour de 750 K. Enfin une limite de détection de

0,5 ppt par mètre a été établie dans la cellule de calibrage. Notons que [Smallwood, 2006] atteignent une sensibilité inférieure à 1 ppt avec le système Artium à l'échappement de moteurs automobiles. Cependant, ce système est disposé à proximité directe de la source de particules de suie et il n'est donc pas adapté pour les turbines aéronautiques.

Le dispositif a évolué pendant le déroulement de la thèse. Il a été testé lors des campagnes de mesure. Six campagnes ont été réalisées, cinq sur des turbines aéronautiques et une sur une turbine à gaz. La turbine de référence du projet AEROTEST est une turbine ATAR qui s'est avérée peu "productive" de particules de suie, ce qui a rendu la phase de mise au point difficile. Néanmoins la limite de détection sur banc aéronautique s'est améliorée au fil des campagnes pour finalement converger vers 30 ppt par mètre sur le banc ATAR. Avec un absorbeur de faisceau laser mieux adapté, nous avons pu atteindre 15 ppt par mètre dans la turbine à gaz SIEMENS. Dans les dernières campagnes de mesure, des profils verticaux de signaux LII ont été obtenus pour différentes vitesses de la turbine et la fraction volumique moyennée sur le diamètre de la turbine a été déterminée. Les courbes de saturation ont pu être réalisées pour la première fois à l'émission d'une turbine. La très bonne concordance des courbes "sur site" avec celle obtenue en laboratoire dans la cellule de calibrage ainsi que la très bonne similarité des spots LII attestent de la bonne opérationnalité de la procédure de calibrage. Nous avons également montré que l'atteinte du plateau de saturation dans la turbine à gaz SIEMENS nécessitait environ 30% d'énergie laser en plus que dans la cellule de calibrage ou dans le banc de la turbine ATAR, ce qui pourrait traduire une différence des propriétés physico-chimiques des particules de suie entre les différents sites, différence implicitement prise en compte dans la procédure de calibrage.

Pour conclure, la version aboutie du dispositif rétro-LII, modifié au cours de la thèse, est opérationnelle et permet de réaliser des mesures quantitatives de particules de suie à l'émission de turbines aéronautiques, conformément aux objectifs initiaux de la thèse. Cependant la limite de détection actuelle est encore insuffisante pour permettre un usage optimal du dispositif dans des conditions de bas régime du moteur. Une meilleure sensibilité reste envisageable en diminuant le bruit, en utilisant des détecteurs plus sensibles et en augmentant l'angle solide de collection, tout en maintenant la configuration de la version finale du dispositif à laquelle nous avons abouti en fin de thèse.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

[A²C³, 2000]

Aviation, aerosols, contrails and cirrus clouds (A²C³).
Report on the european workshop A²C³ (2000).

[Anderson, 1999], B.E. Anderson, W.R. Cofer III and D.S. McDougal.
Air force F-16 aircraft engine aerosol emissions under cruise altitude conditions.
NASA/TM-1999-209102 (1999).

[Appel, 1996], J. Appel, B. Jungfleisch, M Marquardt, R. Suntz, H. Bockhorn.
Assessment of soot volume fractions from Laser-Induced Incandescence by comparison with extinction measurements in laminar, premixed, flat flames.
26th symposium on combustion, pp. 2387-2395 (1996).

[Axelsson, 2001a], B. Axelsson, R. Collin and P.E. Bengtsson.
Laser-induced incandescence for soot particle size and volume fraction measurements using on-line extinction calibration.
Applied Phys. B 72, 367-372 (2001).

[Axelsson, 2001b], B. Axelsson, P.O. Witze.
Qualitative laser-induced incandescence measurements of particulate emissions during transient operation of a TDI diesel engine.
SAE paper 2001-01-3574 (2001).

B

[Bachalo, 2002], W.D. Bachalo, S.V. Sankar, G.J. Smallwood, D.R. Snelling.
Development of the laser-induced incandescence method for the reliable characterization of particulate emissions.
11th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon (2002).

[Black, 1999], J.D. Black.
Laser-induced incandescence measurements of particles in aero-engine exhausts.
SPIE, Vol. 3821, pp. 209-215 (1999).

[Bladh, 2006], H. Bladh, P.-E. Bengtsson, J. Delhay, Y. Bouvier, E. Therssen, P. Desgroux.
Experimental and theoretical comparison of spatially resolved laser-induced incandescence (LII) signals of soot in backward and right-angle configuration.
Appl. Phys. B 83, 423-433 (2006).

[Bockhorn, 1994], H. Bockhorn

Soot formation in combustion : mechanisms and models.

Berlin : Springer series in chemical physics, 59 (1994).

[Boiarciuc, 2006], A. Boiarciuc.

Développement de la technique d'incandescence induite par laser pour caractériser des particules de suie dans un moteur diesel.

Thèse de doctorat à l'Université d'Orléans (2006).

[Bougie, 2006], B. Bougie, L.C. Ganippa, N.J. Dam, J.J. Ter Meulen.

On particulate characterization in a heavy-duty diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence.

Applied Physics B 83, 477-485 (2006).

[Bougie, 2007], B. Bougie, L.C. Ganippa, A.P. Van Vliet, W.L. Meerts, N.J. Dam, J.J. Ter Meulen.

Soot particle size characterization in a heavy-duty diesel engine for different engine loads by laser-induced incandescence.

Proc. Combust. Inst., 31:685-691 (2007).

[Burtscher, 2005], H. Burtscher.

Physical characterization of particulate emissions from diesel engines : a review.

J. Aerosol Sci. 36, pp. 896-932 (2005).

C

[Choi, 1995], M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins and T. Kashiwagi.

Comparison of the soot volume fraction using gravimetric and light extinction techniques.

Comb. & Flame 102, pp 161-169 (1995).

[Cignoli, 2005], S. De Iuliis, F. Cignoli, G. Zizak.

Two-color laser -induced incandescence (2C-LII) technique for absolute soot volume fraction measurements in flames.

Appl. Opt. 44, No. 34, pp. 3805-3805 (2005).

[Coppale, 1994], A. Coppale, D. Joyeux.

Temperature and soot volume fraction in turbulent diffusion flames : measurements of mean and fluctuating values.

Comb. & Flame 96, 275-285 (1994).

D

[Dakhel, 2005], P.M. Dakhel, S.P. Lukachko, I.A. Waitz, R.C. Miake-Lye, R.C. Brown.

Post-combustion evolution of soot properties in an aircraft engine.

ASME Turbo Expo 2005 : Power for Land, Sea and Air, GT2005-69113 (2005).

[Delhay, 2005], J. Delhay, Y. Bouvier, E. Therssen, J.D. Black, P. Desgroux.

2D imaging of laser wing effects and of soot sublimation in laser-induced incandescence measurements.

Appl. Phys. B 81, 181-186 (2005).

[Delhay, 2006], D. Delhay, E. Ruiz, D. Ferry, B. Demirdjian, J. Suzanne, O. Penanhoat, J. Gouge.

Physico-chemical characterization of soot emitted by a commercial aircraft engine : morphology, size, structure, and elemental composition.

Proceedings of the TAC-Conference, Oxford, UK (2006)

[Douce, 2001], F. Douce.

Etude de la formation des particules de suie à partir de constituants représentatif de gazole.

Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans (2001).

[Dreher, 2002], W.F. Dreher, A. Harscher, C. Burkhardt, W. Nisch, W. Sebbesse, S. Wessels.
TEM- analysis of diesel engine particle emission to get a correlation of the geometric parameters with the SMPS mobility diameter.

6th international ETH-conference on nanoparticle measurement, Zürich (2002).

E

[Eckbreth, 1977], A.C. Eckbreth.

Effects of laser-modulated particulate incandescence on Raman scattering diagnostics.

Journal of applied physics 48, pp 4473-4479 (1977)

F

[Frenklach, 1984], M. Frenklach, D.W. Clary, W.C. Gardiner, S.E. Stein.

Detailed kinetic modeling of soot formation in shock-tube pyrolysis of acetylene.

Proceedings of the Combustion Institute, 20, 1559-1566 (1984).

H

[Heimgartner, 2001], C. Heimgartner, S. Chraml, S. Will, A. Leipertz, A. Kaste, N. D'Alfonso.

Laser-induced incandescence soot analyser (L²SA) for soot mass concentration and primary particle size measurement in engine exhaust gases.

5th International symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines, Nagoya (2001).

[**Hofman, 2005**], M. Hofman, H. Kronemayer, B.F. Koch, H. Jander and C. Schulz.
Laser-induced incandescence and multi-line NO-LIF thermometry for soot diagnostics at high pressure.
Proceedings of the European Combustion Meeting, Louvain la neuve (2005)

I

[**ICAO, 2004**].
Environmental protection.
Annex 16, Volume II : Aircraft Engine Emission, 2nd edition (2004).

J

[**Jaw, 2005**], L.C. Jaw.
Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step.
50th ASME international gas turbine & aeroengine technical congress (2005).

[**Jenkins, 2002**], T.P. Jenkins, J.L. Bartholomew, P.A. DeBarber, P. Yang, J.M. Seitzmann, R.P. Howard.
A laser-induced incandescence system for measuring soot flux in aircraft engine exhaust.
AIAA 2002-3736 (2002).

K

[**Kelly, 2002**], N.A. Kelly and C. Morgan.
An evaluation of the tapered element oscillating microbalance method for measuring diesel particulate emissions.
J Air Waste Manag Assoc. , 52(12):1362-77 (2002).

[**Kim, 2004**], C.H. Kim, A.M. El-Leathy, F. Xu, G.M. Faeth.
Soot surface growth and oxidation in laminar diffusion flame at pressures of 0.1-10 atm.
Combustion & Flame 136: 191 (2004).

[**Kock, 2003**], B. Kock, R. Starke and P. Roth.
In-cylinder sizing of diesel particles by time resolved laser induced incandescence (TR-LII).
Proceeding of the combustion institute, 29, 1775-1782 part 2 (2003).

[Krüger, 2005], V. Krüger, C. Wahl, R. Hedef, W. Stricker and M. Aigner.
Comparison of Laser-Induced Incandescence method with Scanning Mobility Particle Sizer technique : the influence of the probe sampling and laser heating on soot particle size distribution.
Measurement Science and Technology, 16:1477-1486 (2005).

[Kugele, 2005], A. Kugele, F. Jelinek, R Gaffal.
Aircraft Particulate matter emission. Estimation through all phases of flight.
Eurocontrol EEC/SEE/2005/0014 (2005).

L

[Lapuerta et al, 2005], M. Lapuerta, F.J. Martos et M.D. Cardenas.
Determination of light extinction efficiency of diesel soot from smoke opacity measurements.
Measurement Science and Technology 16, 2048-2055 (2005).

[Legros, 2006], G. Legros, P. Joulain, J.P. Vantelon, A. Fuentes.
Soot volume fraction measurements in a three-dimensional laminar diffusion flame established in microgravity.
Combust. Sci. And Tech., 178: 813-835 (2006).

[Leipertz, 2002], A. Leipertz, F. Ossler and M. Aldén.
Polycyclic aromatic hydrocarbons and soot diagnostics by optical techniques.
In 'Applied combustion diagnostics', pp 359-383, Edited by K. Kohse-Höinghaus and J.B. Jeffries (2002).

M

[Maricq, 2004], M.M. Maricq, N. Xu.
The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust.
Aerosol science 35, pp. 1251-1274 (2004).

[Megaridis, 1987], C.M. Megaridis.
Thermophoretic sampling and soot aerosol dynamics of an ethene diffusion flame.
Thèse de doctorat à l'université de Brown (USA) (1987).

[Melton, 1984], L.A. Melton.
Soot diagnostics based on laser heating.
Appl. Opt. 23, No. 13, pp. 2201-2209 (1984).

[Michelsen, 2003], H.A. Michelsen.
Understanding and predicting the temporal response of laser-induced incandescence from carbonaceous particles.

Journal of Chemical Physics, Vol 18, N° 15, pp. 7012-7045 (2003).

[**Moosmüller, 2001**], H. Moosmüller, W.P. Arnott, C.F. Rogers, J.L. Bowen, J.A. Gillies, and W.R. Pierson, J.F. Collins, T.D. Durbin, and J.M. Norbeck.

Time resolved characterization of diesel particulate emissions. 1. Instruments for particle mass measurements.

Environ. Sci. Technol., 35, 781-787 (2001).

[**Moreau, 2002**], C. Schoemaeker Moreau.

Diagnosics laser dans une flamme de diffusion : imagerie quantitative de nanoparticules de suies et d'espèces majoritaire et minoritaires.

Thèse de doctorat à l'Université de Lille I (2002).

N

[**Ni, 1995**], T. Ni, J.A. Pinson, S. Gupta, R.J. Santoro.

Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence.

Appl. Opt. 34, pp. 7083-7091 (1995).

O

[**Oberdörster, 2001**], G. Oberdörster.

Pulmonary effects on inhaled ultrafine particles.

Int. Arch. Occup. Environ. Health 74 : 1-8 (2001).

[**O'Keefe, 1988**], A. O'Keefe.

Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources.

Rev. Sci. Inst., 59, 2544-2551 (1988).

[**Ouf, 2006**], F.X. Ouf.

Caractérisation des aérosol émis lors d'un incendie.

Thèse de doctorat à l'Université de Rouen (2006).

P

[**Park, 2003**], K. Park, F. Cao, D.B. Kittelson and P.H. McMurry.

Relationship between particle mass and mobility for diesel exhaust particles.

Environ. Sci. Technol. 37, 577-58 (2003).

[**Petzold, 1999**], A. Petzold, J. Ström, F.P. Schröder and B. Kärcher.

Carbonaceous aerosol in jet engine exhaust : emission characteristics and implications for heterogeneous chemical reactions.

Atmospheric Environment 33, 2689-2698 (1999).

[Popovitcheva, 2000], O.B. Popovitcheva, N.M. Persiantseva, M.E. Trukhin, G.B. Rulev, N.K. Shonija, Y.Y. Buriko, A.M. Starik, B. Demirdjian, D. Ferry and J. Suzanne.

Experimental characterization of aircraft combustor soot : microstructure, surface area, porosity and water absorption.

Phys. Chem. Chem. Phys 2, pp. 4421-4426 (2000).

R

[Richter, 2000], H. Richter, J.B. Howard.

Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways.

Progress in Energy and Combustion Science 26, pp 565-608 (2000).

S

[SAE AIR5892, 2004]

Nonvolatile exhaust particle measurement techniques.

SAE Aerospace AIR5892 (2004).

[Santoro, 2002], R.J. Santoro and C.R. Shaddix

Laser-Induced Incandescence.

In 'Applied combustion diagnostics', pp 359-383, Edited by K. Kohse-Höinghaus and J.B. Jeffries (2002).

[Schäfer, 2000], K. Schäfer, J. Heland, D.H. Lister, C.W. Wilson, R.J. Howes, R.S. Falk, E. Lindermeir, M. Birk, G. Wagner, P. Haschberger, M. Bernard, O. Legras, P. Wiesen, R. Kurtenbach, K.J. Brockmann, V. Kriesche, M. Hilton, G. Bishop, R. Clarke, J. Workman, M. Caola, R. Geatches, R. Burrows, J.D. Black, P. Herve and J. Vally.

Nonintrusive optical measurements of aircraft engine exhaust emissions and comparison with standard intrusive techniques.

Appl. Opt. 39, No. 3, pp. 441-455 (2000).

[Schraml, 2000], S. Schraml, C. Heimgartner, C. Fettes, A. Leipertz.

Investigation of in-cylinder soot formation and oxydation by means of two-dimensional laser-induced incandescence (LII).

10th international symposium on application of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon (2000).

[Schulz, 2006] Schulz C, Kock BF, Hofmann M, Michelsen H, Will S, Bougie B, Suntz R, Smallwood G.

Laser-induced incandescence: recent trends and current questions.

Applied Physics B, Volume 83, Issue 3, p.333 - 354 (2006)

[Schumann, 2002], U. Schumann , F. Arnold, R. Busen, J. Curtius, B. Kärcher, A. Kiendler, A. Petzold, H. Schlager, F. Schröder, and K.-H. Wohlfrom.

Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes : the experiments SULFUR I-VII.

Journal of geophysical research, Vol. 107 (2002).

[Schumann, 2005], U. Schumann et al.

Formation, properties and climatic effects of contrails.

Comptes rendus physique 6 4-5, 549-565 (2005).

[Shaddix, 1996], C.R. Shaddix and K.C. Smyth.

Laser-induced incandescence measurements of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flame.

Comb. & Flame 107, pp 418-452 (1996).

[Smallwood, 2006], G.J. Smallwood, D.R. Snelling, R.A. Sawchuk, D.Dclavel and D Gareau.

Design optimization for high sensitivity two-color LII.

2nd International discussion meeting and workshop, Laser-Induced incandescence : interpretation, modeling, application, Bad Herrenalb, Germany (2006).

[Snelling, 2000], D.R. Snelling, G.J. Smallwood, O.L Gülder, W.D. Bachalo and S. Sankar.

Soot volume fraction characterization using the laser-induced incandescence detection method.

10th International Symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon (2000).

[Snelling, 2003], D.R. Snelling, F. Liu, G.J. Smallwood, O.L Gülder.

Determination of the soot absorption function and thermal accommodation coefficient using low-fluence LII in a laminar coflow ethylene diffusion flame.

Comb. & flame 136, pp. 180-190 (2003).

[Snelling, 2004], D.R. Snelling, F. Liu, G.J. Smallwood and O.L. Gülder.

Determination of the soot absorption function and thermal accommodation coefficient using low-fluence LII in a laminar coflow ethylene diffusion flame.

Comb. & Flame 136, pp. 180-190 (2004).

[Snelling, 2005], D. R. Snelling, G. J. Smallwood, F. Liu, O. L. Gülder and W. D. Bachalo.

A calibration-independent laser-induced incandescence technique for soot measurement by detecting absolute light intensity.

Appl. Opt. 44, No. 31, pp. 6773-6785 (2005).

[Sunderland, 1995], P.B. Sunderland, Ü.Ö. Köylü, and G.M. Faeth.

Soot Formation in Weakly-Buoyant Acetylene-Fueled Laminar Jet Diffusion Flames Burning in Air. Combustion and Flame 100:310-322 (1995).

T

[**Tait,1993**], N.P. Tait and D.A. Greenhalgh.

2D soot field measurements by laser-induced incandescence.

Proceedings of the optical methods and data processing in heat transfer and fluid flow conference (Inst. Of Mech. Engin. London), 185-193 (1992).

[**Tian, 2005**], K. Tian, K.A. Thomson, F. Liu, D.R. Snelling, G.J. Smallwood, D. Wang.

Determination of the morphology of soot aggregates using the relative optical density method for the analysis of TEM images.

Comb. & Flame 144, pp. 782-791 (2005).

U

[**United Nations, 1998**], United Nations.

Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change.

United Nations (1998).

V

[**Van Gulijk, 2003**], C. Van Gulijk, J.C.M. Marijnissen, M. Makkee, J.A. Moulijn.

Oil-soaked sintered impactors for the ELPI in diesel particulate measurements.

Aerosol Science 34, pp. 635-640 (2003).

[**Vander Wal, 1996**], R.L. Vander Wal, Z Zhou et M.Y. Choi.

Laser-Induced Incandescence calibration via gravimetric sampling.

Proceedings Combustion Fundamentals and Applications, Combustion Institute/Central and Western States, Mexican National Section, and American Flame Research Committee (1995).

[**Vander Wal, 1998**], R.L. Vander Wal and K.A. Jensen.

Laser induced incandescence : excitation intensity.

Appl. Opt. 37, No 9, pp. 1607-1616 (1998).

[**Vander Wal, 1999a**], R.L. Vander Wal.

Calibration and comparison of laser-induced incandescence with cavity ring-down.

27th symposium on combustion, pp. 59-67 (1999).

[**Vander Wal, 1999b**], R.L. Vander Wal, T.M. Ticich.

Cavity Ring Down and Laser Induced-Incandescence measurement of soot.

Appl. Opt. 38, No. 9, pp. 1444-1451 (1999).

W

[Wainner, 1999], R.T. Wainner.

An analytical and quantitative analysis of the laser-induced incandescence of soot.

Thèse de doctorat à l'Université de Georgia (1999).

[Wen, 2003], Z. Wen, S. Yun, M.J. Thomson, M.F. Lightstone.

Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames.

Combustion & flame 135, 323-340 (2003).

[Witze, 2001], P.O. Witze.

Diagnostics for the measurement of particulate-matter emissions from reciprocating engines.

5th international symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines, Nogoya, (2001).

[Witze, 2003], P.O. Witze, G.Payne, W.D. Bachalo, G.J. Smallwood.

Influence of measurement location on transient laser-induced incandescence measurements of particulate matter in raw diesel exhaust.

Annual report of the international energy agency program of research in energy conservation and emissions reduction in combustion, sub-task 3.4S (2003).

X

[Xu, 2003], F. Xu, A.M. El-Leathy, C.H. Kim, G.M. Feath.

Soot surface oxidation in hydrocarbon/air diffusion flames at atmospheric pressure.

Combustion & flame 132, 43-57 (2003).

Y

[Yang, 2005], B. Yang, B. Hu and U.O. Koylu.

Mean soot volume fractions in turbulent hydrocarbon flames : a comparison of sampling and laser measurements.

Combustion Science and Technology, 177 : 1603:1626 (2005).

Z

[Zhao, 1998], H. Zhao and N. Ladommatos.

Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines.

Prog. Energy Combustion Science 24, pp. 221-255 (1998).

[Zhao, 2003], B. Zhao, Z. Yang, J. Wang, M. V. Johnston and H. Wang.

Analysis of soot nanoparticles in a laminar premixed ethylene flame by Scanning Mobility Particle Sizer.

Aerosol Science and Technology 37, pp 611-620 (2003).

[Zhou, 1998], Z.Q. Zhou, T.U. Ahmed, M.Y. Choi.

Measurement of dimensionless soot extinction constant using a gravimetric sampling technique.

Experimental Thermal and Fluid Science 18, pp. 27-32 (1998).

[Zhu, 2000], J. Zhu, M.Y. Choi, G.W. Mulholland, L.A. Gritzo.

Measurement of soot optical properties in the near-infrared spectrum.

International journal of heat and mass transfer 4, pp. 3299-3303 (2000).

[Zhu, 2004], J. Zhu, A. Irrera, M.Y. Choi, G.W. Mulholland, J.S. Antila, L.A. Gritzo.

Measurement of light extinction constant of JP-8 soot in the visible and near-infrared spectrum.

International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 3643-3648 (2004).

[Zizak, 2000], G. Zizak.

Laser Induced Incandescence (LII) of soot.

ICS training course on laser diagnostics of combustion processes, University of Cairo (2000).

A : FONCTIONNEMENT D'UNE CAMERA CCD INTENSIFIEE

Pour décrire le fonctionnement d'une caméra CCD intensifiée (Intensified Coupled Charge Device), nous nous sommes basés sur le fonctionnement de la caméra Dicam Pro de 12 bits, mais cette description est valable quel que soit le type de caméra ICCD. Les caméras CCD intensifiées ont l'avantage de pouvoir exposer leur capteur pendant un laps de temps très court à partir d'un signal de déclenchement électrique ou lumineux (dans notre étude, la caméra est déclenchée par un signal électrique provenant de la Q-switch du laser). Leur fonctionnement repose sur deux éléments essentiels : l'intensificateur et le capteur CCD. Le signal est ensuite transféré vers un ordinateur via une fibre optique vers une carte d'acquisition (Figure A.1).

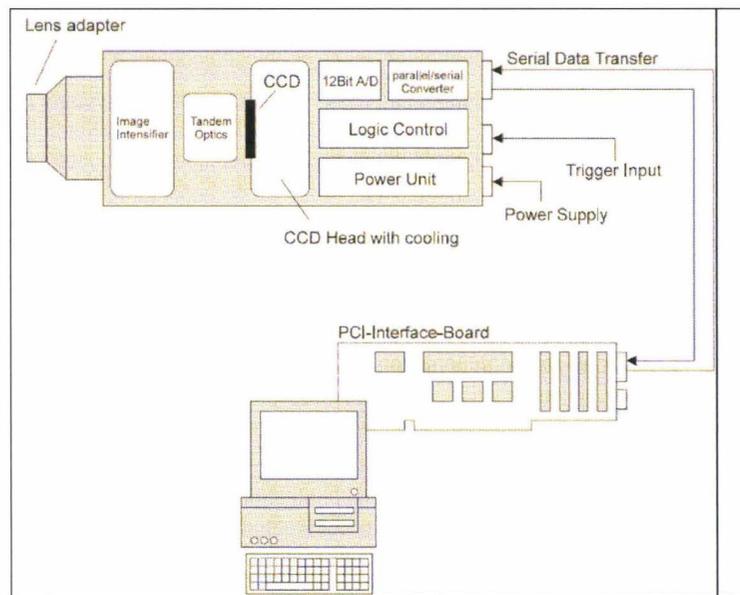


Figure A.1 : fonctionnement d'une caméra CCD intensifiée.

A.1 L'intensificateur

L'intensificateur est composé d'une photocathode, d'un amplificateur d'électrons et d'un écran phosphore. Les photons émis par un objet sont collectés par la photocathode (S20), qui transforme ces photons en électrons. Ces derniers sont dirigés vers l'amplificateur, communément appelé MCP (Micro Channel Plate). Fabriqué en verre plombé de 10^6 à 10^7 micro canaux d'un diamètre de $6 \mu\text{m}$ et de 0.5 mm de long, chaque canal fonctionne comme un photomultiplicateur où les dynodes sont remplacées par des semi-conducteurs.

L'intensification des électrons sera fonction de la haute tension appliquée au MCP ($0 - 10^4$ V), proportionnel au gain de la caméra. Les électrons sont ensuite accélérés vers un écran phosphore pour transformer à nouveau les électrons en photoélectrons. Le choix du phosphore est un paramètre important car de là va dépendre l'efficacité quantique de la caméra (phosphore P46).

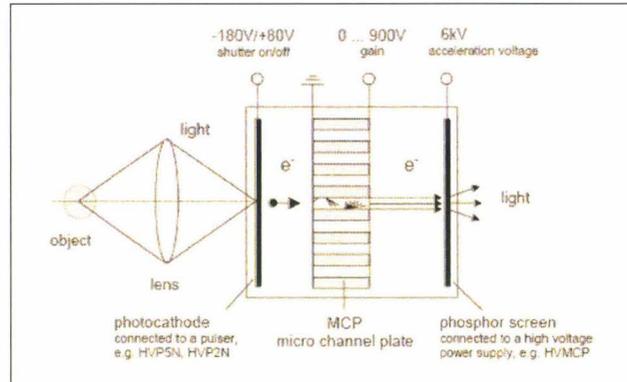


Figure A.2 : schéma de fonctionnement de l'intensificateur composé de la photocathode , du MCP et de l'écran phosphore.

A.2 Le capteur CCD

Le capteur CCD est constitué d'une matrice de capacités MOS, plus connu sous le nom de pixel. Il s'agit de la superposition d'une électrode (grille métallique M), d'une couche d'oxyde de semi-conducteur O, et d'un semi-conducteur S, relié à la masse. Lorsqu'un photon arrive sur l'un de ces sites photosensibles, il est absorbé par le silicium. Le potentiel de la grille étant positif, il se forme une paire électron – trou c'est à dire qu'un atome du réseau libère un électron et laisse place à une charge virtuelle positive : un 'trou'. Les charges ainsi libérées s'accumulent au voisinage de la couche isolante de l'oxyde. Cette zone chargée négativement est appelée zone de déplétion. L'image est ainsi enregistrée sous forme de charges électriques contenus dans les photosites.

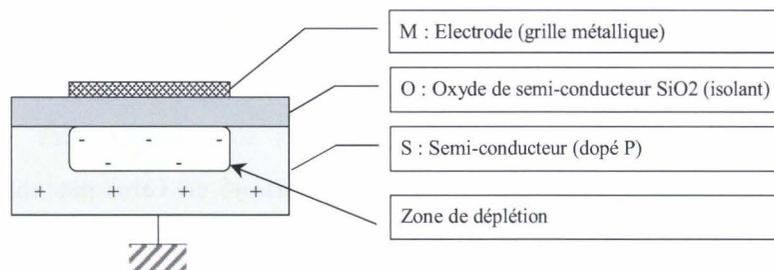


Figure A.3 : constitution d'une capacité MOS ou pixel.

Pour lire l'image, il suffit de collecter les valeurs de charges négatives contenus dans chacun des photosites. Pour cela, la matrice CCD est couplée à une électronique, qui génère des signaux de lectures, appelés horloge. A chaque impulsion de la première horloge, les charges électriques d'une ligne se déplacent vers la ligne d'en dessous. Les charges contenues dans la dernière ligne sont transférées dans une ligne particulière appelée registre. Le deuxième type d'horloge permet de transférer les charges électriques contenues dans le registre d'un photosite à l'autre. Les charges situées dans le dernier photosite sont alors évacuées vers la broche de sortie du CCD pour être convertie en valeur numérique.

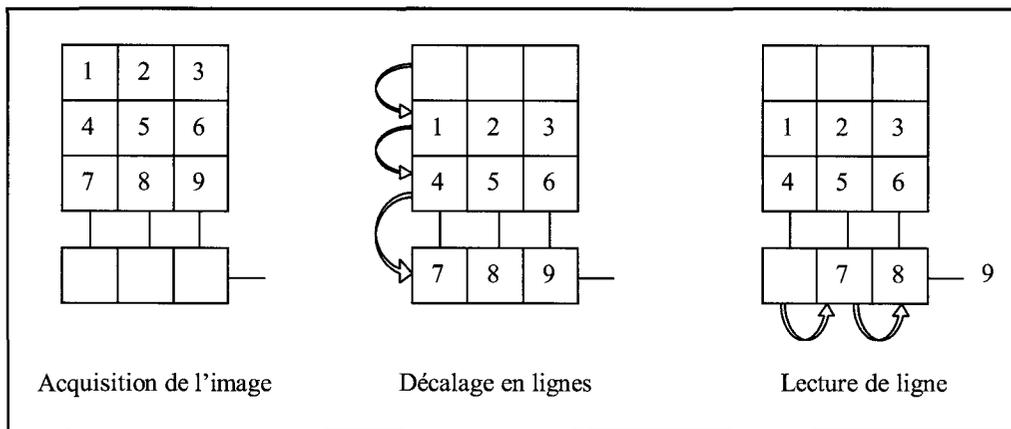


Figure A.4 : lecture du capteur CCD.

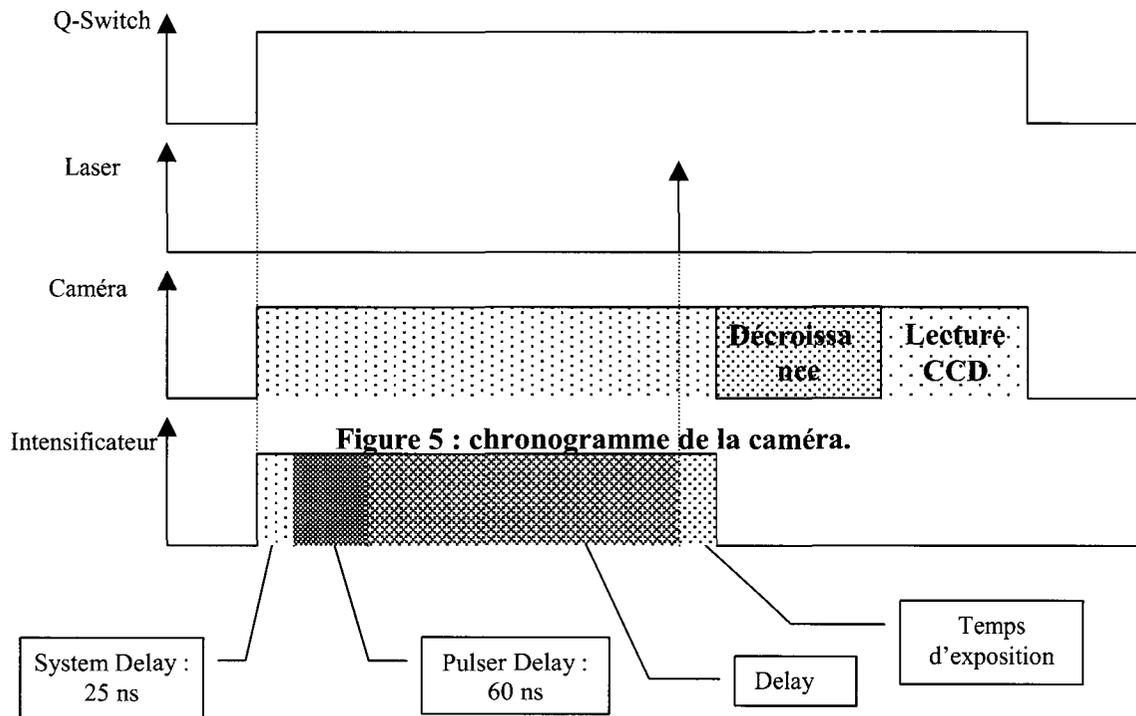
Pour éviter tout signal parasite, la caméra est refroidie en permanence à l'aide d'une double jonction thermoélectrique Peltier. Le capteur CCD est ainsi refroidi à environ -11°C , ce qui limite le bruit d'obscurité (charges électriques produites par la matrice lorsqu'elle n'est pas éclairée, proportionnelles à la température).

Le logiciel de la caméra a été adapté par Auxitrol de façon à n'avoir accès qu'aux paramètres de fonctionnement de la caméra. Ainsi les seules fonctions réglables du système de détection sont le type de synchronisation, les caractéristiques du phosphore, le temps d'acquisition, le délai électronique, le nombre d'images et la région du CCD sélectionnée (ROI : Region Of Interest).

A.3 Chronogramme de la caméra

L'ouverture de la caméra est déclenchée par une impulsion électrique provenant de la Q-Switch de la baie laser. La synchronisation de la caméra et du phénomène d'incandescence est réalisée grâce à deux paramètres contrôlant l'intensificateur, ajustable à partir du logiciel :

le délai et le temps d'exposition. Suivant la durée de ces deux paramètres, des délais internes à la caméra sont également à prendre en compte dans le chronogramme de l'intensificateur. Pendant tout ce temps cumulé, le CCD de la caméra est ouvert.



B. Etude expérimentale des effets de bords et de la sublimation par couplage rétro LII et LII angle droit

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, l'évolution du signal LII avec la densité d'énergie dépend de la forme du faisceau laser [Bladh, 2004]. Ainsi, le signal LII émis par les particules de suie, sous l'interaction avec un rayonnement laser gaussien, atteint une intensité constante appelée région plateau, à partir d'une certaine densité d'énergie, qui est fonction des propriétés des particules de suie (Figure B.1).

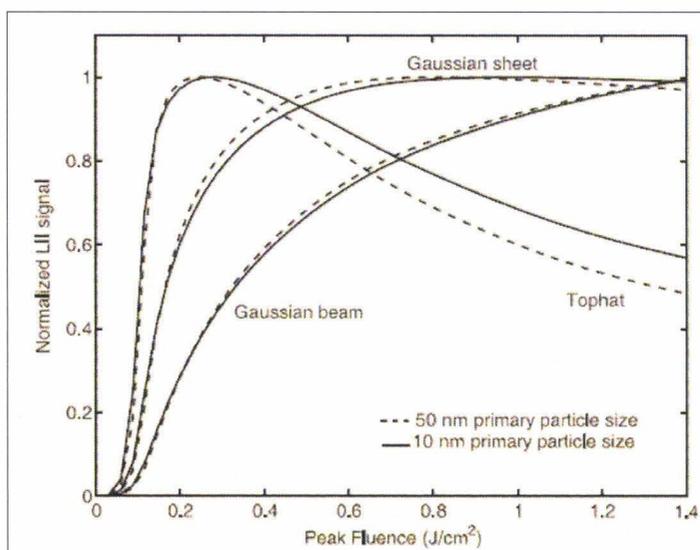


Figure B.1 : Modélisation des courbes de densité d'énergie en fonction de la distribution spatiale de l'énergie laser [Bladh, 2004].

Dans cette région plateau, la sublimation des particules de suie est active ce qui provoque une perte d'intensité du signal compensée du fait de l'apparition des effets de bord. La configuration rétro est parfaitement adaptée à la mise en évidence de ce phénomène qui se traduit par l'élargissement du spot d'incandescence (effets de bord). Dans le but d'étudier en détail le phénomène des effets de bord et de la sublimation des particules de suie, une étude expérimentale a été mise en place. Les mesures ont été réalisées dans une flamme laminaire de méthane et simultanément en configuration rétro et angle droit pour comparer et valider le système LII rétro. Elle a été réalisée en collaboration avec Y. Bouvier au cours de sa thèse [Bouvier, 2006], au laboratoire du CERLA (Centre d'Etudes et de Recherches Laser et Applications).

B.1 Conditions expérimentales

B.1.1 Dispositif expérimental

La Figure B.2 montre le dispositif expérimental utilisé. Un brûleur McKenna équipé d'un injecteur central permet de produire une flamme de diffusion laminaire de méthane. Les mesures ont été réalisées 35 mm au-dessus du brûleur dans une zone de la flamme où la distribution spatiale des particules de suie est axisymétrique. Une flamme de pré-mélange méthane/air permet de stabiliser la flamme sur le brûleur et une garde d'air protège la flamme des perturbations de l'air ambiant. Un collecteur en quartz situé 50 mm au-dessus du brûleur améliore également la stabilité de la flamme.

Un laser Nd³⁺/YAG Brilliant émettant une radiation à 1064 nm est utilisé pour exciter les particules de suie. Le faisceau laser passe à travers un diaphragme de 1 mm de diamètre pour sélectionner uniquement la partie centrale du faisceau laser. L'énergie après le diaphragme évolue de 0.01 mJ à 8 mJ. Un analyseur de faisceau (Gentec EO WinCamD) permet de contrôler la distribution spatiale de l'énergie au sein du faisceau laser. Les résultats indiquent une forme gaussienne du faisceau quelle que soit l'énergie laser.

Le signal LII provenant de la flamme a été enregistré suivant les deux configurations décrites au chapitre 3 : à angle droit et en rétro-LII. Le signal rétro-LII a été enregistré avec la caméra Dicam Pro équipé d'un objectif UV Cerco de focale 94 mm. Ainsi, un pixel représentait un carré de 87,5 μm de côté dans la flamme. Le signal LII détecté à angle droit a été enregistré avec une caméra Princeton en utilisant un doublet de lentilles ($f_6 = 400$ mm et $f_7 = 200$ mm) pour focaliser l'image d'incandescence sur la photocathode de la caméra. Pour cette caméra, 1 pixel représentait un carré de 44 μm de côté dans la flamme. Un photomultiplicateur Philips XP2020Q a également été utilisé pour enregistrer le signal temporel du signal LII. Le signal était filtré en utilisant un filtre RG 630 dont la bande passante correspond à une plage comprise entre 630 nm et 900 nm.

Le photomultiplicateur est synchronisé sur le pulse laser grâce à une photodiode récupérant une réflexion du faisceau laser, tandis que les caméras sont déclenchées simultanément par l'intermédiaire du signal QSwitch-out du laser (QS-out). Une description très détaillée de cette installation est disponible dans la thèse de Y. Bouvier [Bouvier, 2006] et dans l'article de [Bladh, 2005].

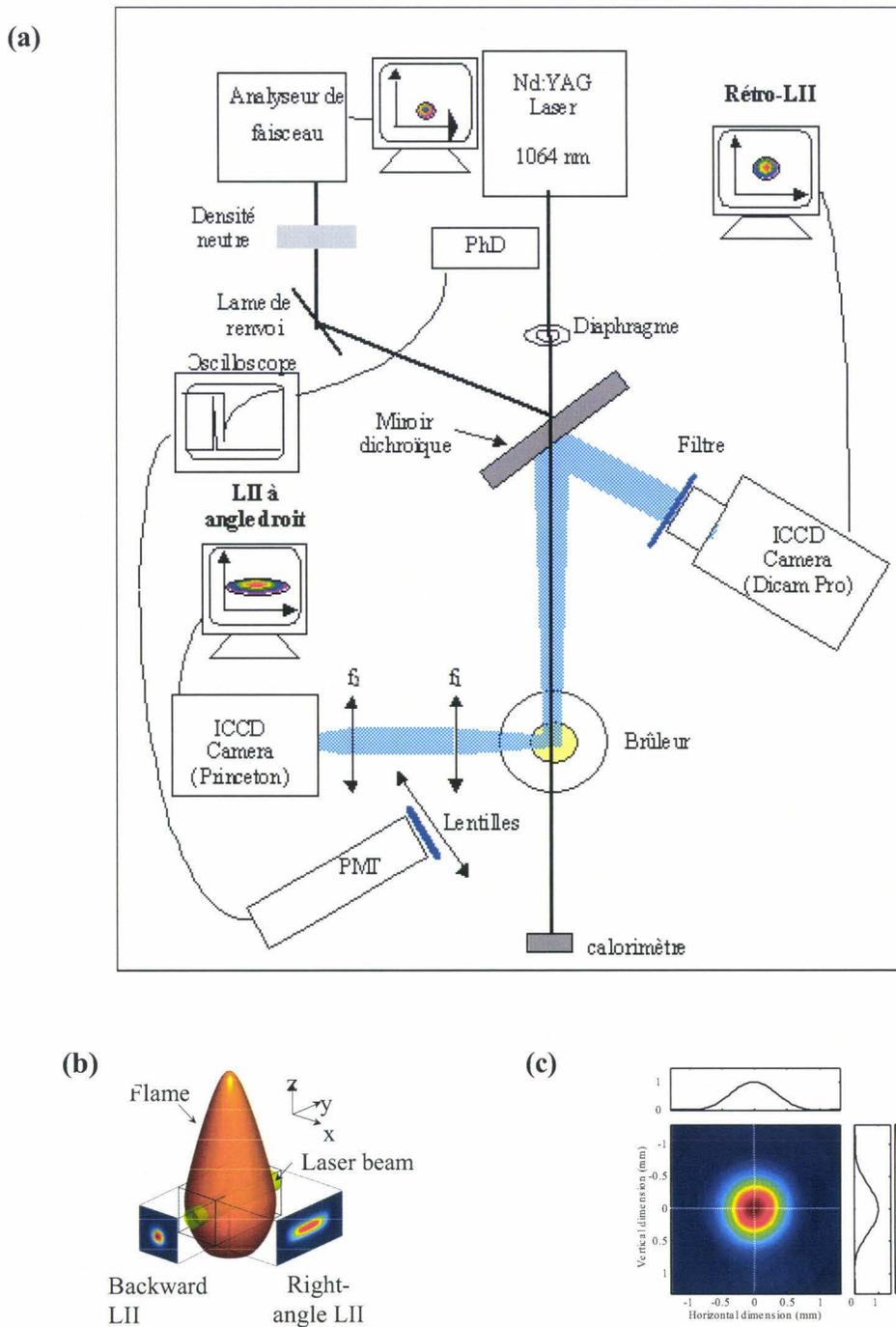


Figure B.2 : (a) Dispositif expérimental utilisé pour la comparaison de l'Incandescence Induite par Laser à angle droit et en rétro. (b) Types d'images enregistrées à angle droit et en rétro. (c) Profil spatial du faisceau laser.

Afin que les deux caméras collectent le signal d'incandescence au même instant par rapport à l'impulsion laser, l'ouverture des portes des détecteurs CCD a été synchronisée en enregistrant le signal Rayleigh à 532 nm pour différents délais du signal de déclenchement (QS-out) fourni par le laser. L'étude a été menée avec une porte de 20 ns avec les deux

caméras, l'ouverture de la porte de la caméra Dicam Pro ne pouvant être inférieure à cette valeur. L'évolution du signal Rayleigh reconstitué avec chaque caméra par rapport à la position du signal QSwitch-out montre un léger décalage de 2 ns. La Figure B.3 montre les signaux Rayleigh enregistrés par les deux caméras. La décroissance du signal d'incandescence induite par laser mesurée au PM est également affichée pour une énergie de 1 mJ/pulse. L'origine des temps correspond au début du pulse laser.

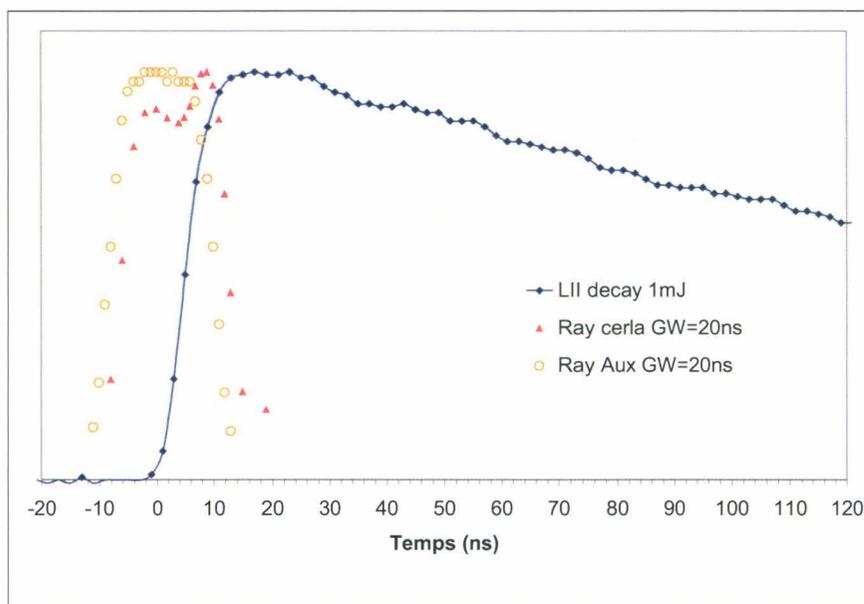


Figure B.3 : Synchronisation de l'ouverture des portes des caméras avec le signal Rayleigh et décroissance du signal LII mesurée au PM pour une énergie de 1 mJ/pulse.

Les mesures ont été réalisées dans une flamme de diffusion méthane/air stabilisée sur un brûleur Mc Kenna, dans laquelle la distribution spatiale des particules de suie a préalablement été déterminée en utilisant une méthode standard LII à angle droit.

Les signaux ne sont pas réellement représentatifs de la largeur du pulse laser (i.e. 6 ns) car l'ouverture temporelle de la caméra induit un élargissement du signal. Cette position permet de recalibrer les décroissances temporelles issues du PM par rapport au pulse laser. A noter que cette position dépend de l'énergie laser utilisée.

Différents délais ont été étudiés avec des durées d'ouvertures de caméra de 20 ns :

- ✓ La première ouverture se situe à la racine du pulse laser ;
- ✓ La deuxième ouverture se situe 20 ns après le début du pulse laser ;
- ✓ La troisième ouverture se situe 40 ns après le début du pulse laser ;

- ✓ La dernière ouverture se situe 90 ns après le début du pulse laser.

B.1.2 Sublimations et effets de bords

La porte de la caméra a été décalée temporellement pour étudier l'influence du délai de détection sur le signal LII. Dans tous les cas, le temps d'ouverture des caméras est de 20 ns. La Figure B.4 montre des images enregistrées par les caméras en rétro (a) et à angle droit (b) avec un délai synchronisé 20 ns après le début du pulse laser et pour différentes densités d'énergie. Chaque image est une moyenne de 20 tirs laser. Compte tenu des grossissements, la résolution spatiale de la caméra Princeton est de 44 μm par pixel et celle de la caméra Dicom Pro est de 87 μm par pixel. Les images enregistrées en rétro LII et à angle droit montrent bien l'élargissement du signal d'incandescence, puis l'apparition d'un trou au centre relatif à la sublimation des particules de suie. Comme nous l'avons déjà présenté, le signal LII mesuré en rétro est une mesure intégrée le long de l'axe du faisceau laser. Le signal est donc une représentation de la fraction volumique au sein du volume de mesure en fonction de la densité d'énergie. A angle droit, le signal représente le profil spatial des particules de suie au sein de la flamme. Dans cette étude, la fraction volumique des suies est supposée constante suivant l'axe vertical de la flamme.

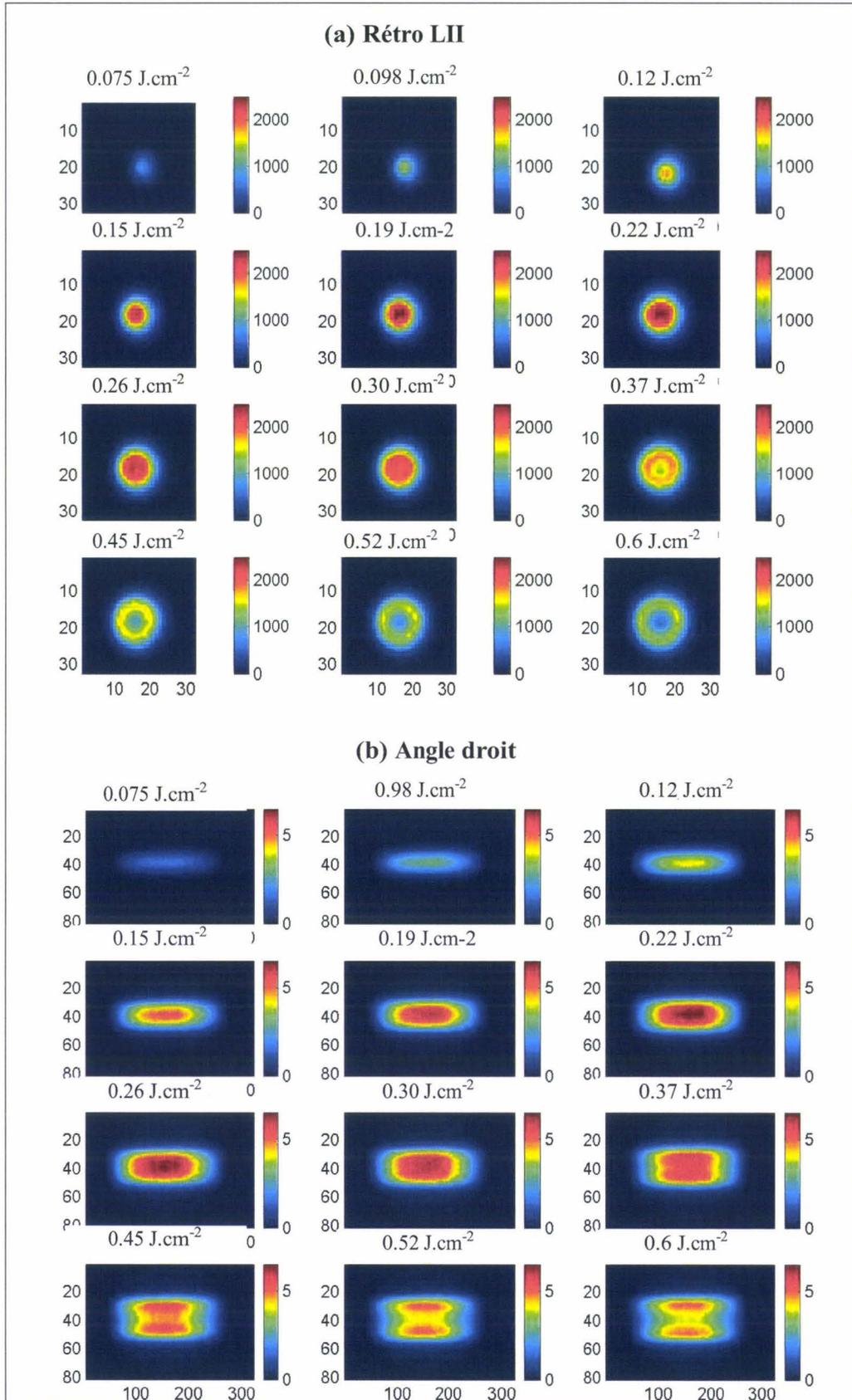


Figure B.4 : Images LII obtenues 20 ns après le début du pulse laser. (a) Rétro LII ; (b) Angle droit.

En analysant l'évolution du signal en fonction de la densité d'énergie, deux phénomènes apparaissent :

1. Les effets de bord : le profil du laser étant gaussien, l'augmentation locale de la densité d'énergie dans les ailes du faisceau laser devient suffisante pour chauffer les particules de suie ;
2. La sublimation : la densité d'énergie locale au centre du faisceau laser est suffisante pour que les particules de suie atteignent leur température de sublimation ($T_{\text{sub}} = 3915 \text{ K}$ pour le graphite à pression atmosphérique). Ceci engendre une perte de masse, qui se traduit par une perte de signal. En revanche, cette énergie n'est pas suffisante dans les ailes ce qui explique pourquoi le signal est plus élevé dans les ailes qu'au centre du spot d'incandescence.

Il apparaît cependant que la sublimation est plus importante en configuration rétro. Ceci provient du fait que le signal LII est intégré le long de l'axe laser et la collection du signal n'est donc pas perturbée par l'émission propre de la flamme ni par une partie du signal LII, contrairement à la configuration angle droit.

La Figure B.5 compare les profils obtenus en configuration rétro et angle droit pour un délai de 20 ns après le pulse laser. Cette représentation montre des profils similaires à faible densité d'énergie, mais un élargissement plus rapide à haute densité d'énergie pour la configuration à angle droit. Ceci est dû à l'utilisation d'un couple de lentille pour imager le signal LII sur le CCD de la caméra. En revanche, la visualisation en rétro est beaucoup plus représentative de la largeur réelle car elle utilise un objectif qui prend en compte la profondeur de champs.

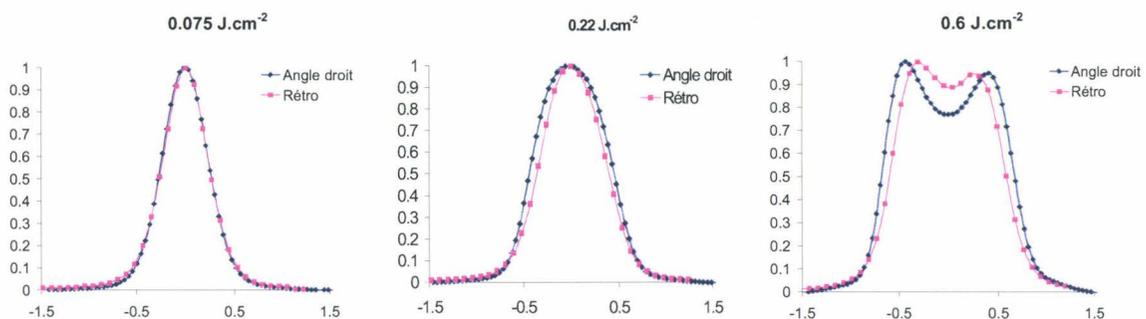


Figure B.5 : profil des signaux LII suivant l'axe verticale de la flamme pour différentes densités d'énergie.

Les Figure B.6 et Figure B.7 présentent les profils mesurés suivant l'axe vertical de la flamme des spots d'incandescences obtenus en configuration rétro LII pour quelques énergies. Les profils correspondent aux signaux enregistrés au moment du pulse laser (Figure B.6) et 40 ns après le pulse laser (Figure B.7).

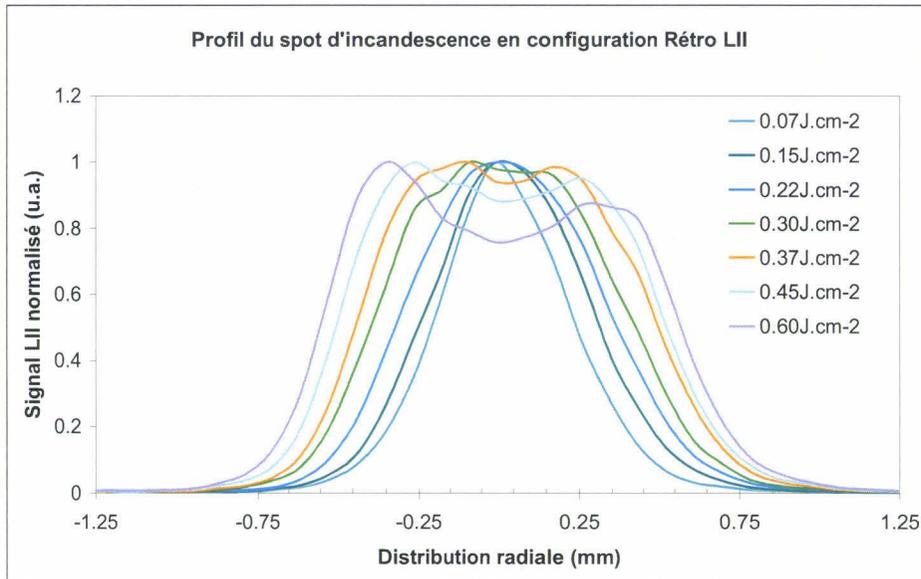


Figure B.6 : Profils radiaux des spots LII obtenus en configuration rétro LII pour un délai correspondant au moment du pulse laser

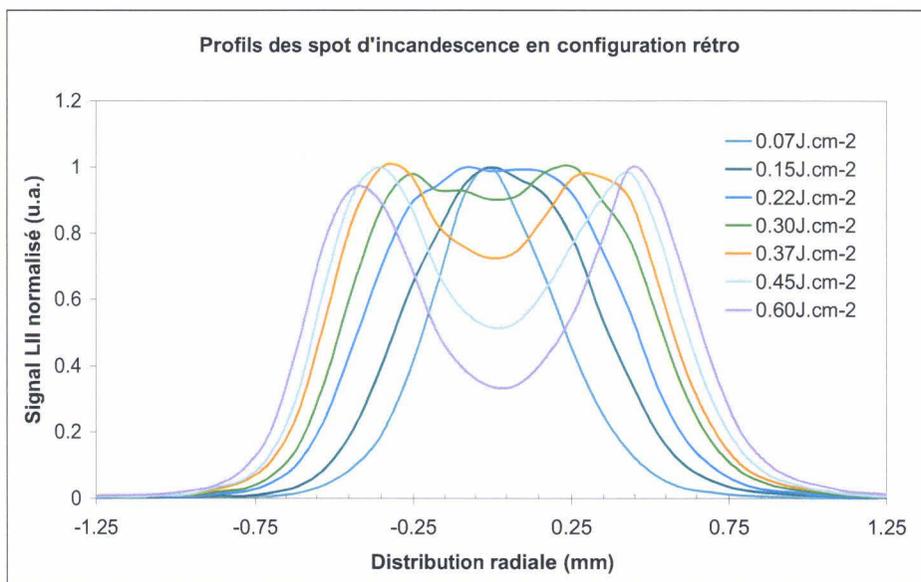


Figure B.7 : Profils radiaux des spots d'incandescence obtenus en configuration rétro LII pour un délai de 40 ns après le pulse laser.

Il apparaît clairement que la sublimation et les effets de bords sont plus importants 40 ns après le pulse laser. La sublimation apparaît pour une densité de 0.30 J.cm^{-2} pour un

délagi correspondant au moment du pulse laser et 0.22 J.cm^{-2} pour un délagi de 40 ns après le pulse laser ; l'élargissement du spot LII correspond en moyenne à une augmentation de 10% du diamètre (à $1/e^2$). Ceci semble indiquer qu'il existe un laps de temps avant que les particules de suie atteignent leur température pic et que les effets (sublimation et effets de bord) se mettent en place.

B.1.2.1 Courbes de densité d'énergie

Pour définir l'évolution du signal LII en fonction de la densité d'énergie, une zone du CCD correspondant au phénomène que nous voulons étudier est sélectionnée. Le signal correspondant est la somme de l'intensité de tous les pixels de cette zone. Ainsi pour chaque délagi, nous avons étudié l'évolution locale du signal au centre du spot LII et le signal total. La Figure B.8 montre l'évolution locale du signal LII en configuration rétro au centre du spot. La zone sélectionnée correspond à un carré de côté 9 pixels, soit une région de 0.79 mm. L'évolution du signal en fonction du délagi montre un maximum pour un délagi de 20 ns après le début du pulse laser, ce qui correspond à une détection en prompt, c'est à dire au maximum de la température des particules de suie. Le signal décroît ensuite dû à la sublimation des particules de suie. On note également que le pic d'intensité est atteint plus rapidement pour un délagi long.

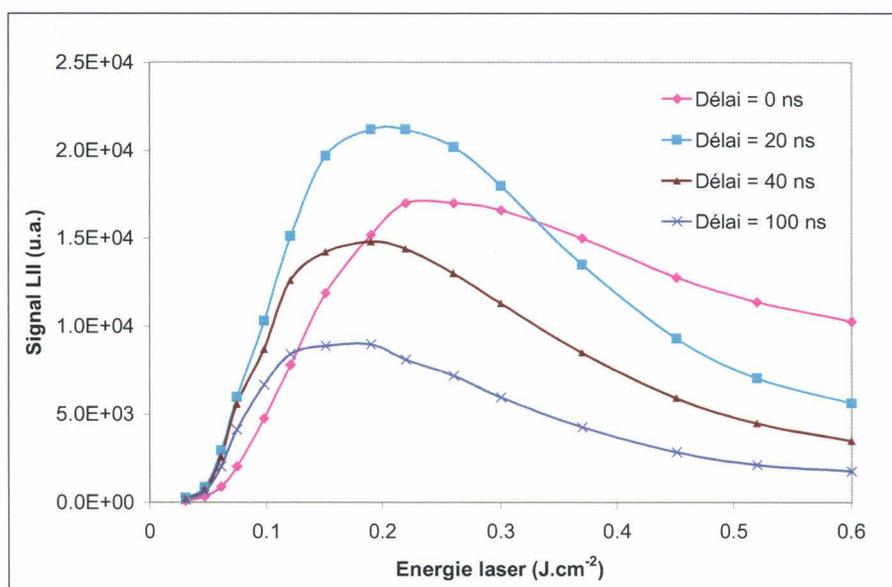


Figure B.8 : Courbes de densité d'énergie locales en rétro LII pour différent délagi de détection. La zone de mesure correspond à un carré de 9 pixels de côté au centre du spot d'incandescence.

La Figure B.9 montre l'évolution des signaux LII en fonction de la densité d'énergie pour les deux configurations testées. Les zones CCD sélectionnées sont grandes ce qui permet

de suivre l'évolution du signal LII total. Les signaux sont normalisés pour chaque courbe. Chaque courbe présente une partie croissante puis une zone où l'intensité est constante appelé plateau. Cette zone plateau apparaît pour des densités d'énergie différentes : plus le délai est grand plus l'apparition de cette zone plateau est à une densité d'énergie faible. Les résultats montrent une parfaite correspondance des signaux en fonction des délais ce qui indique que le nombre de photons collectés par chaque caméra est identique.

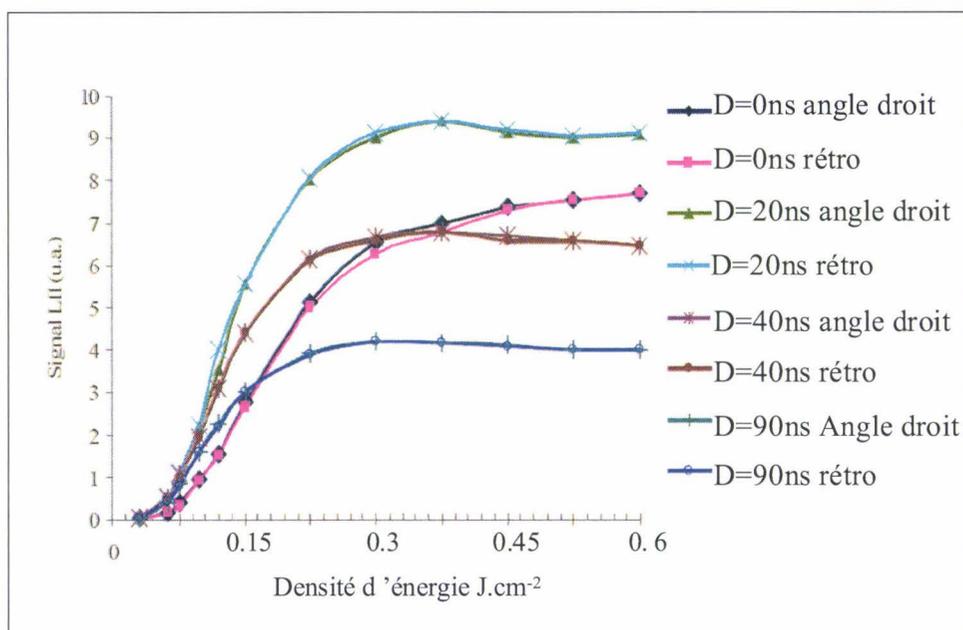


Figure B.9 : Comparaison des courbes obtenues suivant les deux configurations pour les différents délais de détection.

Ainsi, les deux phénomènes, effets de bords et sublimation, sont deux phénomènes qui se compensent lorsqu'un faisceau laser gaussien est utilisé pour chauffer les particules de suie. Pour les signaux enregistrés avec un délai nul, le signal continue à augmenter car le phénomène de sublimation met un certain temps avant d'être effectif. Pour les autres régimes, le phénomène est établi.

B.2 Modélisation (réalisée par l'Université de Lund, Suède)

La modélisation du phénomène LII est complexe car le phénomène physique est décrit par quatre ou cinq termes dont l'expression peut varier selon les hypothèses et les théories considérées. Le modèle est basé sur le modèle de Melton [Melton,1984], et traite les transferts de masse et de chaleur entre les particules de suie et le milieu environnant pendant l'exposition à un pulse laser. Le modèle prend en compte l'absorption de l'énergie laser, la

conduction, la sublimation et les pertes radiatives. En connaissant les paramètres tels que l'énergie laser, la longueur d'onde d'excitation et le comportement temporel du faisceau laser, le modèle calcule la réponse temporelle du signal d'incandescence émit par les particules de suie chauffées. Une extension du modèle a été réalisée pour se rapprocher au mieux des résultats expérimentaux. Différents termes de conduction de la littérature ont été inclus au modèle et peuvent être choisis indépendamment des autres paramètres.

La Figure B.10 montre les images enregistrées par les caméras à angle droit et en rétro pour différentes énergies. Quelle que soit l'énergie laser, les phénomènes d'élargissement du signal et la sublimation sont bien modélisés en configuration rétro.

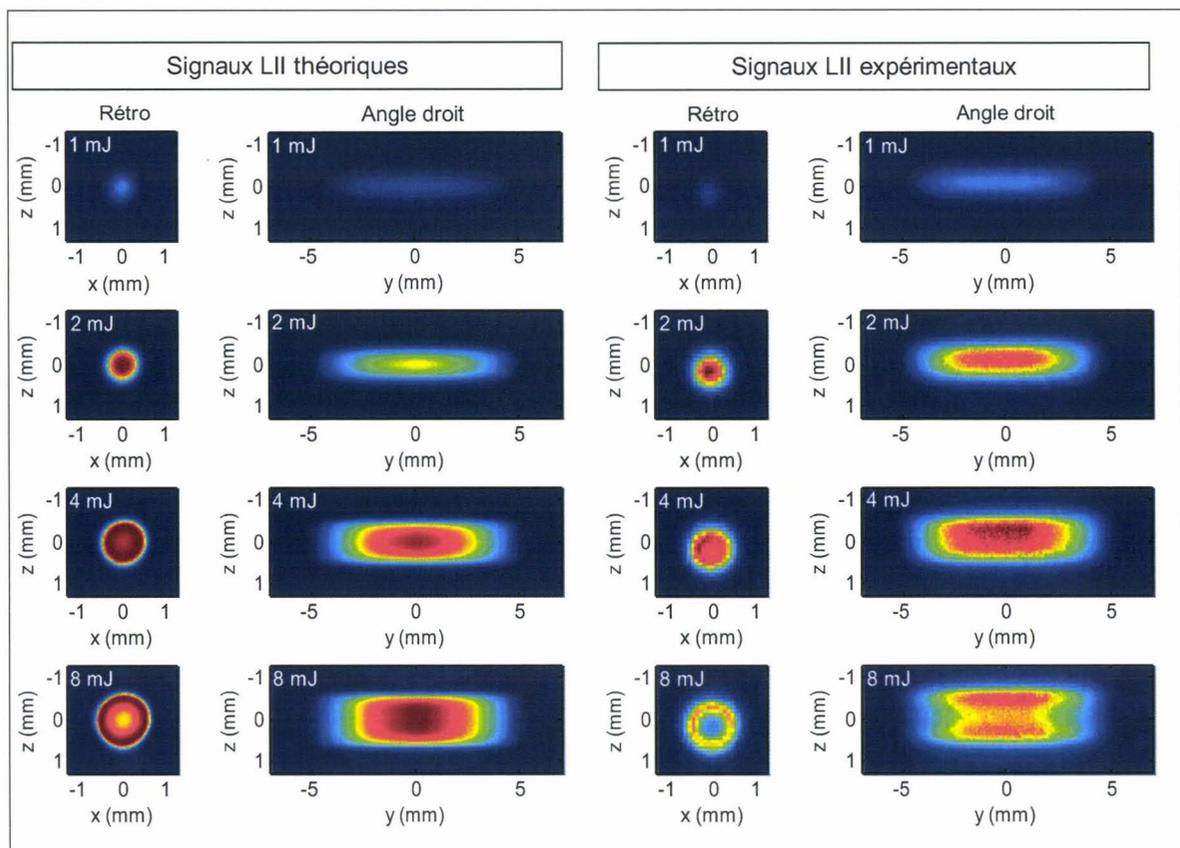


Figure B.10 : Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques.

En revanche à angle droit, la sublimation n'est pas visible mais l'élargissement est bien représentée.

B.3 Conclusion

La configuration rétro, qui permet une mesure intégrée le long de l'axe laser mais sans notion de résolution spatiale, a été comparée à la configuration angle droit, qui elle permet de déterminer la répartition spatiale des particules de suie dans la flamme. Cette comparaison permet de bien mettre en évidence deux phénomènes : les effets de bord et la sublimation. La comparaison des courbes de densité d'énergie montre une très bonne concordance des signaux quel que soit le délai d'enregistrement après le pulse laser. Par ailleurs, les profils suivant l'axe vertical de la flamme permettent d'observer les effets d'élargissement qui sont similaires à basse énergie mais divergent à haute énergie. Cependant la configuration rétro rend mieux compte de cette élargissement. La sublimation est nettement visible sur les images obtenues à haute densité d'énergie, car elles se traduisent par l'apparition d'un trou au centre du signal, synonyme d'une perte de masse. De plus, pour de hautes densités d'énergie, effets de bord et sublimation sont deux phénomènes qui se compensent.

Cette étude a été un point de départ pour la modélisation du phénomène d'incandescence induite par laser par l'Université de Lund, dans le cadre du projet AEROTEST.

Résumé :

Les particules de suie issues de l'industrie et des transports ont un impact important sur l'environnement et la santé publique. Ce travail de thèse, entrepris dans le cadre du projet européen AEROTEST, vise à quantifier les émissions des particules de suie à l'émission des turbines aéronautiques en calibrant un instrument de mesure basé sur la technique d'Incandescence Induite par Laser (LII). La particularité du dispositif est qu'il collecte le rayonnement émis par les particules de suie dans la direction opposée (rétro-LII) au sens de propagation du faisceau laser. Le dispositif est donc compact, facilement transportable et peut être positionné à plusieurs mètres de la turbine.

Afin de vérifier la proportionnalité entre le signal d'incandescence et la fraction volumique de suies, un brûleur produisant une flamme de type swirl (utilisant comme combustible du kérosène Jet A1) et une cheminée d'évacuation, équipée d'une cellule de calibrage, ont été développés au laboratoire. Le brûleur ainsi équipé permet de tester le dispositif rétro-LII dans des conditions proches de celles rencontrées à l'émission des turbines aéronautiques. Le calibrage a été effectué par extinction laser dans la cellule de calibrage. Plusieurs campagnes de mesures ont été réalisées sur des bancs d'essais de turbines aéronautiques et d'une turbine à gaz. Des profils radiaux de fraction volumique ont été obtenus dans le panache d'une turbine pour différents régimes de fonctionnement. La limite de détection a été établie à quelques dizaines de ppt par mètre en fonction du site aéronautique et de ses contraintes.

Mots clés : particules de suie, incandescence induite par laser, extinction, turbines aéronautiques, kérosène Jet A1.

Abstract :

Pollutant emissions such as soot particles from transport industry have a great impact on environment and public health. The European project AEROTEST aims to quantify the soot particle emissions at the exhaust gas of aeronautic turbines by calibrating a system based of the laser-induced incandescence (LII) technique. This device is well adapted to aeronautic measurements because measurements could be performed at several metres from the turbine due to the LII signal collected in the opposite direction to that of the laser beam. Moreover this device is compact and transportable. In order to calibrate the system in similar conditions to those met in the exhaust gas of aeronautic turbines, a swirl burner (using kerosene Jet A1) and a chimney, equipped of a calibration cell, have been developed at the laboratory. The calibration procedure was performed by comparing the backward LII signal to soot volume fraction obtained by extinction. These measurements were performed in the calibration cell where the temperature, similar with the temperature of exhaust gas of turbines, and the spatial distribution of soot particles are homogeneous. Several campaigns have been performed in test beds of aeronautics turbines and of a gas turbine. Radial profiles of soot volume fraction have been obtained in a turbine at different engine speeds. The detection limit has been established to be around some ten of ppt per meter depending on the test bed and its associated constraints.

Key words : soot particles, laser-induced incandescence, extinction, aeronautic turbines, kerosene Jet A1.

