

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

INSTITUT PLURIDISCIPLINAIRE DE RECHERCHE EN INGENIERIE DES
SYSTEMES, MECANIKES ET ENERGETIQUE, Equipe Energétique,
Explosion, Structures

THÈSE présentée par :
Laure MELANI

soutenue le : **15 décembre 2010**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**
Discipline : Mécanique et Energétique

**Accélération d'une Flamme Hydrogène-Air en
Milieu Obstrué et/ou Confiné**

THÈSE dirigée par :

Mme Isabelle SOCHET

Professeur, ENSI de Bourges

RAPPORTEURS :

Ernesto SALZANO

Researcher of CNR, Naples, Italie

Pascal BAUER

Professeur, Université de Poitiers

JURY :

Philippe GILLARD

Professeur, IUT de Bourges – Président du Jury

Ernesto SALZANO

Researcher of CNR, Naples, Italie

Xavier ROCOURT

Maître de Conférences, ENSI de Bourges

Isabelle SOCHET

Professeur, ENSI de Bourges

Simon JALLAIS

Ingénieur Expert, Air Liquide R&D

REMERCIEMENTS

Cette thèse CIFRE a été effectuée à l'Institut PRISME dans l'équipe RES (Risques Explosions Structures) de Bourges, rattaché à l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Bourges en collaboration avec Air Liquide. Je souhaite remercier le Professeur Philippe Gillard, responsable de l'équipe RES pour m'avoir accueillie au sein de son service, ainsi que Monsieur Joël Allain, directeur de l'ENSIB, pour avoir mis à disposition de la recherche les moyens nécessaires afin de mener à bien cette étude.

Je souhaite aussi remercier Air Liquide R&D qui a financé cette thèse CIFRE. Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur Simon Jallais, pour son aide et son implication dans ce projet. Mes remerciements vont aussi aux membres de l'ancien groupe GPE et du nouveau groupe SMP du CRCD pour leur accueil notamment durant la phase critique de rédaction de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi vers Madame le Professeur Isabelle Sochet, Directrice de thèse. Après m'avoir proposé le sujet de cette thèse, elle a su me conseiller, me guider et m'apporter son soutien dans les moments difficiles durant ces trois années de thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde et respectueuse gratitude.

Je voudrais aussi remercier Monsieur Xavier Rocourt, co-encadrant de cette thèse, pour son soutien et son aide lors du montage du dispositif expérimental.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs Ludovic Lamoot et Emmanuel Mennesson pour leur apport durant le montage du dispositif expérimental.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Siham, Benjamin, Sébastien, Luc, Mickael, Virginie, Gaëtan, Marie, Céline, Denis et Carine pour leur soutien et les bons moments passés ensemble.

Pour terminer, je remercie Messieurs Ernesto Salzano et Pascal Bauer d'avoir bien voulu être rapporteurs sur ce travail ainsi que tous les membres du Jury.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	19
-------------------	----

Chapitre 1. ACCELERATION D'UNE FLAMME HYDROGENE-AIR ..	
.....	25

1.1 La propagation des flammes dans un tube fermé et obstrué	29
1.1.1 Le rôle des obstacles	29
1.1.2 Les différents processus de propagation de la flamme	35
1.1.3 Les critères d'obtention d'une Transition Déflagration Détonation	36
1.1.3.1 Critères géométriques	36
1.1.3.2 Critère lié au combustible	38
1.2 La propagation de flamme en tube semi-ouvert.....	40
1.3 La propagation de flamme en milieu libre et obstrué.....	45
1.3.1 Contexte sécuritaire de l'étude des explosions hydrogène-air	45
1.3.1.1 Surpressions produites par des explosions de mélange hydrogène-air	45
1.3.1.2 Vitesses de flamme obtenues lors d'explosions de mélange hydrogène-air.....	50
1.4 La propagation de flamme en milieu semi-confiné	56
1.4.1 Le processus d'explosion avec présence d'évent.....	56
1.4.2 Les modèles de calcul de la pression dans des cas d'événements et la littérature	58
1.5 Synthèse.....	63

Chapitre 2.	DISPOSITIF EXPERIMENTAL	65
2.1	Descriptif général du montage expérimental	68
2.2	Descriptif du montage expérimental sans ossature	70
2.2.1	<i>La charge hémisphérique.....</i>	<i>70</i>
2.2.2	<i>Le squelette carré</i>	<i>70</i>
2.3	Descriptif du montage expérimental avec ossature	72
2.3.1	<i>Montage sans confinement</i>	<i>72</i>
2.3.2	<i>Montage avec confinement</i>	<i>74</i>
2.4	Descriptif des configurations obstruées utilisées.....	77
2.5	Description de l'instrumentation relative aux expériences	81
2.5.1	<i>Préparation du mélange gazeux</i>	<i>81</i>
2.5.2	<i>Propriétés des mélanges utilisés.....</i>	<i>83</i>
2.5.3	<i>Amorçage.....</i>	<i>83</i>
2.5.4	<i>Acquisition des signaux de pression et de la vitesse</i>	<i>84</i>
Chapitre 3.	PROPAGATION DE FLAMME EN MILIEU OBSTRUE	87
3.1	Processus de dépouillement des résultats	90
3.1.1	<i>L'onde de pression.....</i>	<i>90</i>
3.1.2	<i>La vitesse de flamme</i>	<i>91</i>
3.1.3	<i>Rappel des principales caractéristiques des éléments utilisés lors des expériences.....</i>	<i>96</i>
3.2	Expériences basées sur les hémisphères aqueux	98
3.2.1	<i>Sans obstacle.....</i>	<i>98</i>
3.2.2	<i>Avec obstacles à la limite de la charge hémisphérique (7 cm de rayon).</i>	<i>103</i>
3.3	Expériences sans ossature et sans obstacle	109

3.4	Expériences avec obstacles de type grillage et sans ossature	112
3.5	Expériences avec obstacles de type plaque et sans ossature	119
3.5.1	<i>Grilles de type G4</i>	120
3.5.2	<i>Grilles de type G5</i>	124
3.6	Discussion sur les résultats obtenus avec obstacles et sans ossature	129
3.6.1	<i>Comparaison des différentes obstructions</i>	129
3.6.2	<i>Comparaison des vitesses expérimentales avec les formules de vitesse de flamme de la littérature</i>	131
3.6.3	<i>Apport de la caméra</i>	141
3.7	Ce qu'il faut retenir	142

Chapitre 4. PROPAGATION DE FLAMME EN MILIEU CONFINE ET OBSTRUE 145

4.1	Effets du confinement sans obstruction	148
4.1.1	<i>Evolution de la surpression</i>	148
4.1.2	<i>Evolution de la vitesse de flamme</i>	151
4.1.3	<i>Comparaison des valeurs de la surpression maximale aux modèles de la littérature</i>	157
4.2	Effets de confinement avec obstruction	162
4.2.1	<i>Evolution de la pression</i>	162
4.2.2	<i>Evolution de la vitesse de flamme</i>	165
4.3	Ce qu'il faut retenir	171

CONCLUSION 173

ANNEXES.....	179
BIBLIOGRAPHIE.....	213

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Schématisation du comportement du front de flamme et des chocs interagissant avec un obstacle dans le tube (Sorin (2005)).	30
Figure 1.2 : Exemple de propagation de flamme au travers d'une succession d'obstacles (extrait de Sorin (2005)).	30
Figure 1.3 : Génération de turbulence dans un tunnel créée par des obstacles répétés.	31
Figure 1.4 : Boucle de rétroaction positive du mécanisme d'accélération de flamme.	32
Figure 1.5 : Dispositif expérimental de tube circulaire utilisé dans l'étude de Salzano et al. (2005).	33
Figure 1.6 : Dispositif expérimental de tube de section carrée utilisé dans l'étude de Salzano et al. (2005).	33
Figure 1.7 : Etat de la température (a), de la vitesse (b) et de la vorticité (c) dans l'écoulement du mélange gazeux généré par l'accélération de flamme.	34
Figure 1.8 : Schéma d'un tube rempli d'obstacles.	36
Figure 1.9 : Schéma d'une flamme se propageant dans un tube rempli d'obstacles (Veser et al. (2002)).	37
Figure 1.10 : Dispositif expérimental d'Alekseev et al. (2001).	41
Figure 1.11 : Tube semi-ouvert du dispositif de Grune et al. (2010) : a) vue de profil du tube, b) épaisseur de la partie supérieure de 0,24 m, et c) épaisseur de la partie supérieure de 0,12 m.	42
Figure 1.12 : Dispositif expérimental complet de Grune et al. (2010).	43
Figure 1.13 : Dispositif expérimental de Groethe et al. (2007).	47
Figure 1.14 : Dispositif expérimental de Shirvill et al. (2007).	48
Figure 1.15 : Dispositif expérimental de Royle et al. (2007).	48
Figure 1.16 : Dispositif expérimental de Grune et al. (2003).	49

Figure 1.17 : Schéma du processus d'explosion en présence d'évent.	57
Figure 1.18 : Développement de l'explosion externe.	57
Figure 1.19 : Comparaison des résultats expérimentaux et des résultats par les deux modèles sélectionnés.	62
Figure 2.1 : Vue globale du dispositif expérimental.	68
Figure 2.2 : Détail de la chaîne d'acquisition des mesures.	69
Figure 2.3 : Montage expérimental sans ossature.	71
Figure 2.4 : a) Cadres servant à la mise en place du film PVC, b) Détail des côtes et des cadres.	73
Figure 2.5 : Description de la boîte de confinement initial du mélange gazeux inflammable.	74
Figure 2.6 : Exemple de structure obstruée dans le cas des grilles de type G2, espacées de 13 mm et alignées :a) vue de face, et b) vue de profil (structure valable pour les grilles de types G1, G2 et G3).	77
Figure 2.7 : Positionnement des différents type de grilles : a) G4 alignées, b) G4 croisées, c) G5 alignées, d) G5 croisées et exemple de structures obstruées obtenues à partir des grilles de type G5, alignées et espacées de 4 mm (e) vue de face et f) vue de profil).	78
Figure 2.8 : Schéma des branchements des débitmètres massiques.	82
Figure 2.9 : Schéma des branchements des débitmètres massiques pour le montage avec charge hémisphérique.	82
Figure 2.10 : Schéma du dispositif d'acquisition des capteurs de pression, des photodiodes et de la caméra pour les confinements carrés.	85
Figure 2.11 : Schéma du dispositif d'acquisition des capteurs de pression, des photodiodes et de la caméra pour le confinement charge hémisphérique.	86
Figure 3.1 : Principales caractéristiques étudiées sur nos signaux (exemple pour le cas d'un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène et les grilles G4 croisées et espacées de 4 mm).	89

Figure 3.2 : Disposition des capteurs de pression le long de l'axe radial, les électrodes étant l'origine de l'axe.	90
Figure 3.3 : Référence pour convertir les pixels en centimètres.	92
Figure 3.4 : Position des points servant de référence pour le calcul de la vitesse....	92
Figure 3.5 : Détermination des coordonnées du point 3.	93
Figure 3.6 : Diagramme de marche pour le cas sans obstacle et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.....	94
Figure 3.7 : Disposition des photodiodes pour la mesure de la vitesse de flamme. .	95
Figure 3.8 : Exemple d'enregistrement de signal des photodiodes dans le cas sans obstacle et mélange à 40 % d'hydrogène.....	96
Figure 3.9 : Visualisation de l'évolution du rayon de flamme pour un rayon initial de charge hémisphérique de 8,5 cm (mélange hydrogène-air stœchiométrique) (vitesse d'acquisition de la caméra 6688 images/s et résolution de 600 x 800 p).....	99
Figure 3.10 : Evolution du rayon de flamme suivant trois axes pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et différents rayons de charge hémisphérique (3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm).	100
Figure 3.11 : Evolution du rayon de flamme suivant la diagonale pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et différents rayons de charge hémisphérique (3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm).	101
Figure 3.12 : Positionnement de la charge hémisphérique par rapport aux obstacles.	103
Figure 3.13 : Visualisation de l'évolution du rayon de flamme pour un rayon initial de charge hémisphérique de 7 cm et les grilles G2 (mélange hydrogène-air stœchiométrique) (vitesse d'acquisition de la caméra 6688 images/s et résolution de 600 x 800 p).....	104
Figure 3.14 : Evolution du rayon de flamme pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et une charge hémisphérique de 7cm de rayon en présence d'obstacles.....	106

Figure 3.15 : Evolution du rayon de flamme horizontal pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et une charge hémisphérique de rayon 7 cm en présence d'obstacles.....	107
Figure 3.16 : Rappel du dispositif expérimental sans ossature.....	109
Figure 3.17 : Evolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les différents mélanges hydrogène-air employés (sans obstacle).....	110
Figure 3.18 : Diagramme de marche de la flamme pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène, sans obstacle et sans ossature.....	111
Figure 3.19 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour différents types de grilles (mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène).	113
Figure 3.20 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour différents types de grilles (mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène).	113
Figure 3.21 : Influence des obstacles sur l'évolution du rayon de flamme (a) et sur la vitesse moyenne (b) pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène (caméra et photodiodes).....	115
Figure 3.22 : Influence des obstacles sur l'évolution du rayon de flamme (a) et sur l'évolution de la vitesse moyenne (b) pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.....	116
Figure 3.23 : Rappel des différentes positions pour les grilles G4 : a) alignée, et b) croisée.....	119
Figure 3.24 : Rappel des différentes positions pour les grilles G5 : a) alignée, et b) croisée.....	120
Figure 3.25 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G4 et un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	121

Figure 3.26 : Evolution de la surpression adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G4 et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.....	121
Figure 3.27 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G5 et un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	125
Figure 3.28 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles de type G5 et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.....	126
Figure 3.29 : Détermination de la taille caractéristique des obstacles (y) pour les grilles de type G4 et G5.....	132
Figure 3.30 : Evolution du front de flamme pour un mélange H_2 /air à 40 % d' H_2 , les grilles G5 (croisées et $D = 4$ mm) (résolution 600 x 800 images et vitesse 6688 images/s).....	141
Figure 4.1 : Rappel du dispositif expérimental avec ossature.....	147
Figure 4.2 : Exemple d'enregistrement de signaux de surpression par le capteur 1 pour les cas d'un confinement PSLA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	149
Figure 4.3 : Influence du degré de confinement sur l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour un mélange stœchiométrique.....	150
Figure 4.4 : Evolution du front de flamme pour une explosion centrée dans la boîte pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène (résolution de 600 x 800 pixels) sans confinement.	152
Figure 4.5 : Evolution de la vitesse moyenne dans le cas d'un confinement PS (a) et dans le cas d'un confinement PA (b) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	153
Figure 4.6 : Evolution du rayon de flamme dans le cas d'un confinement PS (a) et dans le cas d'un confinement PA (b) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	154

Figure 4.7 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles de Molkov et al. (2010) et du NFPA 68 (1998) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	160
Figure 4.8 : Exemple d'enregistrement de signaux de surpression par le capteur 1 pour les cas d'un confinement PSLA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	162
Figure 4.9 : Influence du degré de confinement et de la présence d'un type donné d'obstacles (grilles de mailles rondes de 4 mm de diamètre, alignées et espacées de 4 mm) sur l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.	163
Figure 4.10 : Evolution de la vitesse moyenne sans confinement (a), dans le cas du confinement PS (b), et dans le cas du confinement PA (c) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	167
Figure A1.1 : Profil de l'onde de pression produite par une déflagration de célérité D constante en fonction du temps à une distance R fixée.	181
Figure A1.2 : Profil de la variation de pression induite par l'explosion d'une charge sphérique non confinée, amorcée au centre de la charge, en fonction de la distance R à un instant t donné, pour une déflagration de célérité D constante.	183

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application de la relation de Dorofeev (2007) et des vitesses de flamme obtenues.....	55
Tableau 1.2 : Récapitulatif des caractéristiques utiles pour les effets d'événements et pression maximale obtenue.....	59
Tableau 2.1 : Description des différents types de confinement étudiés :a) Plaques Sommet Latérales Arrière (PSLA), b) Plaques Sommet Latérales (PSL), c) Plaques Latérales Arrière (PLA), d) Plaques Latérales (PL), e) Plaque Arrière (PA), et f) Plaque Sommet (PS).....	76
Tableau 2.2 : Récapitulatif des différentes configurations obstruées.....	79
Tableau 2.3 : Débit des gaz pour les différents mélanges envisagés.....	81
Tableau 2.4 : Récapitulatif des données en fonction de la richesse du mélange considérée.....	83
Tableau 3.1 : Récapitulatif des caractéristiques principales des mélanges gazeux hydrogène-air utilisés.	96
Tableau 3.2 : Récapitulatif des différentes caractéristiques des structures d'obstacles utilisées dans la suite de l'étude.....	97
Tableau 3.3 : Récapitulatif des différentes vitesses moyennes pour un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.....	102
Tableau 3.4 : Rappel des différentes configurations obstruées utilisées.....	103
Tableau 3.5 : Récapitulatif des rayons de flamme maximaux atteints en fonction des configurations réalisées pour un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.....	107
Tableau 3.6 : Récapitulatif des vitesses de flamme moyennes, déterminées à partir de la caméra, en fonction des configurations réalisées.....	108
Tableau 3.7 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale mesurées à 12 cm de la source d'amorçage pour les différents mélanges hydrogène-air employés. ...	110
Tableau 3.8 : Récapitulatif des configurations d'obstacles testées.....	112

Tableau 3.9 : Bilan des valeurs de surpression maximale obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les différents types de grilles et les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	114
Tableau 3.10 : Récapitulatif des différentes vitesses de flamme moyenne obtenues par la caméra et par les photodiodes pour le mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	117
Tableau 3.11 : Récapitulatif des différentes vitesses de flamme maximales obtenues par la dérivée du rayon de flamme pour le mélange hydrogène-air à 30%et 40% d'hydrogène.....	118
Tableau 3.12 : Rappel des différentes configurations utilisées dans les expériences.	119
Tableau 3.13 : Surpressions maximales obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les grilles de types G4 et un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	122
Tableau 3.14 : Bilan des vitesses de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes pour les grilles G4 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.	123
Tableau 3.15 : Récapitulatif des vitesses de flamme obtenues avec la caméra (résolution de 600 x 800 images et vitesse de 6688 images/s) pour les grilles G4 pour un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	124
Tableau 3.16 : Surpressions maximales obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les grilles de types G5 et un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	126
Tableau 3.17 : Bilan des vitesses de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes pour les grilles G5 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.	127
Tableau 3.18 : Récapitulatif des vitesses de flamme obtenues avec la caméra (résolution de 600 x 800 images et vitesse de 6688 images/s) pour les grilles G5 pour un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.....	128
Tableau 3.19 : Bilan des différentes valeurs maximales de surpression obtenues quelque soit les grilles et le mélange hydrogène-air utilisés.....	130

Tableau 3.20 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application des relations de la littérature pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.	133
Tableau 3.21 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application des relations de la littérature pour un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.	134
Tableau 3.22 : Bilan des vitesses de flamme maximales obtenues par les formules de la littérature et par la caméra pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	135
Tableau 3.23 : Bilan des vitesses de flamme maximales obtenues par les formules de la littérature et par la caméra pour un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.....	136
Tableau 3.24 : Bilan des valeurs de vitesse de flamme expérimentale et des différentes valeurs de vitesse de flamme obtenues avec et sans modification du paramètre a^2b dans la relation de Dorofeev (2007).	138
Tableau 3.25 : Bilan des valeurs de vitesse de flamme expérimentale et des différentes valeurs de vitesse de flamme obtenues avec et sans modification du paramètre k dans la relation de Grune et al.(2003).	139
Tableau 3.26 : Bilan des surpressions maximales et des vitesses de flamme maximales obtenues avec la caméra et avec la relation de Dorofeev (2007) via la pression pour les grilles G1, G2 et G3 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.	140
Tableau 4.1 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage en fonction du confinement pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	150
Tableau 4.2 : Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme moyenne obtenues par la photodiode et par la caméra pour le confinement PS et PA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	155
Tableau 4.3 : Données nécessaires à l'application des relations de Molkov et al. (2010) et du NFPA 68 (1998) pour le cas sans obstacle et mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	159
Tableau 4.4 : Récapitulatif des différentes valeurs de pression obtenues expérimentalement et avec les différents modèles.....	160

Tableau 4.5 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage en fonction du confinement pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	164
Tableau 4.6 : Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme moyenne obtenues par la photodiode et par la caméra pour le cas sans confinement, du confinement PS et du confinement PA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	169
Tableau 4.7: Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme maximale et de valeurs de surpression maximale pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.....	170

INTRODUCTION

Après de nombreuses décennies d'utilisation intensive et sans restriction des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), le domaine de l'énergie fait aujourd'hui face à trois défis majeurs à l'aube du 21^{ème} siècle :

- o répondre à la demande en énergie sans cesse croissante d'utilisateurs toujours plus nombreux et gourmands, et ce à des coûts abordables et durables,
- o permettre une sécurité d'approvisionnement de ces énergies, à court et long terme,
- o enfin, et surtout, réaliser la production, le transport et la consommation de ces énergies dans des conditions n'altérant pas l'environnement, en particulier en contrôlant les émissions de polluants à l'atmosphère.

Il semble clair aujourd'hui que le système énergétique actuel, basé sur une hégémonie des énergies fossiles dans le bouquet énergétique (81 % de la consommation d'énergie primaire mondiale en 2004), ne permettra pas de répondre à ces défis énergétiques du 21^{ème} siècle. En effet, certains événements ont conduit durant les dernières années les acteurs de l'énergie à une prise de conscience brutale de mutation de ce système énergétique :

- o la forte croissance de la demande énergétique des pays asiatiques depuis 2000 (~ 60 % de la croissance mondiale),
- o la localisation du pic de production de pétrole à un horizon de 15 à 30 ans,
- o la montée brutale des prix des énergies fossile et du pétrole en particulier,

- o la dépendance toujours aussi totale des transports envers le pétrole, et d'un certain nombre de pays grands consommateurs de pétrole et de gaz envers un cercle restreint de producteurs,
- o la confirmation du réchauffement climatique, de ses effets à court et long terme, et de la responsabilité de l'activité humaine dans l'accroissement rapide des émissions de gaz à effet de serre à l'origine du réchauffement.

Partant de ce constat, deux impératifs majeurs s'imposent à court terme pour permettre de repositionner notre système énergétique de manière plus durable :

- o augmenter l'efficacité énergétique à tous les niveaux des filières utilisées, afin de permettre des économies d'énergie significatives,
- o accroître la diversité du bouquet énergétique, en substituant davantage les énergies fossiles par des énergies renouvelables et en ayant recours à d'autres vecteurs énergétiques que l'électricité et les carburants pétroliers.

L'hydrogène énergie, en tant que vecteur énergétique et en associant avec la pile à combustible qui permet de le convertir en énergie électrique, présente aujourd'hui de sérieux atouts pour s'inscrire au cœur de la réponse à ces défis du 21^{ème} siècle, à savoir :

- o il peut être produit à partir de l'ensemble des énergies primaires, qu'elles soient fossiles, nucléaires ou renouvelables,
- o il n'émet aucun polluant sur son lieu d'utilisation, l'eau étant le seul rejet de la pile à combustible,
- o il a l'avantage de pouvoir être stocké, à la différence de l'électricité,
- o il permet des rendements énergétiques élevés, grâce à l'utilisation de la pile à combustible pour le convertir en énergie électrique,

- o il peut d'ores et déjà être produit à des coûts compétitifs par rapport aux énergies qu'il pourrait substituer, grâce aux grandes installations industrielles en exploitation.

Grâce à l'ensemble de ses atouts, l'hydrogène énergie fournit aujourd'hui la promesse de prendre à terme une place significative dans le bouquet énergétique, en particulier dans le domaine des transports. Il constitue à ce jour l'une des rares solutions énergétiques permettant de cumuler un impact économique et environnemental favorable, tout en apportant l'ensemble des fonctionnalités recherchées par les utilisateurs. Cependant, sa faible densité rend son stockage et sa compression difficile. C'est pourquoi, le méthane est à l'heure actuelle préféré à l'hydrogène dans les moteurs fusées, des difficultés apparaissant avec l'hydrogène au niveau notamment des turbopompes.

Avant d'intégrer le marché de masse de l'automobile, l'hydrogène en tant que vecteur énergétique devra faire ses preuves dans des marchés de niches émergents et nécessitant de plus faibles puissances. Sur ce type de marché, l'hydrogène va pouvoir être employé associé à des piles à combustible dans un contexte de fiabilité électrique, comme par exemple en tant que relais du système électrique principal lors d'une coupure d'électricité (générateurs de secours). Il va aussi pouvoir être utilisé pour la production d'électricité sur des sites isolés en tant que source d'énergie principale. Enfin, l'hydrogène va pouvoir être employé comme « carburant » pour des applications de mobilité innovantes, comme par exemple sur des chariots élévateurs à hydrogène. Ces marchés nécessitent donc l'installation de sources d'hydrogène compactes qui sont relativement confinées et obstruées. De plus, de nombreux démonstrateurs ont été réalisés aussi bien en Europe (véhicule du projet HyChain) que dans le monde (utilisation de diverses technologies alimentées à l'hydrogène sur le site de l'aéroport de Vancouver au Canada, 2009). Ces projets ont pour objectifs de familiariser le grand public ainsi que de le rassurer sur l'utilisation de l'hydrogène dans une carrière énergétique.

Les deux risques à prendre en compte concernant une fuite de gaz sont l'incendie si la fuite de gaz s'enflamme rapidement et l'explosion si un délai important sépare la

libération accidentelle du gaz et son amorçage. Dans cette étude, seul le cas de l'explosion sera abordé. Depuis que l'hydrogène est pressenti pour devenir un nouveau vecteur énergétique, des tests à grande échelle dans le but de palier au manque de données concernant la sécurité de l'hydrogène ont été effectués (SRI, FM Global aux USA, FZK en Allemagne par exemple). Néanmoins, les essais exploitables concernant la déflagration d'hydrogène en champ libre, obstrué et/ou confiné restent peu nombreux. Dans un environnement obstrué, la flamme va s'accélérer en raison de la présence d'obstacles. Etant donné que la vitesse de flamme et la surpression sont liées, les valeurs de surpression vont augmenter avec la vitesse de flamme. Les futures applications concernant l'hydrogène étant en milieu relativement obstrué, il est par conséquent important de pouvoir quantifier et évaluer les effets d'une explosion en termes de pression maximale et de vitesse de flamme aussi bien dans un environnement non obstrué (environnement de référence) que dans un environnement obstrué pour le cas de mélange hydrogène-air. De plus, ces applications de l'hydrogène sont relativement confinées. Peu de modèles concernant les explosions en milieu confiné dans le cas d'un mélange hydrogène-air sont disponibles à ce jour. Les modèles proposés pour le calcul de la pression maximale interne sont encore dans une phase de calage vis-à-vis des données de la littérature. Enfin, si le cas le plus critique, c'est-à-dire confiné et obstrué, est pris en compte, les données et modèles disponibles sont encore moins nombreux dans le cas d'un mélange hydrogène-air.

C'est pourquoi ce travail est ciblé sur une démarche expérimentale menée dans des conditions accidentelles assez similaires à celles des applications émergentes de l'hydrogène, c'est-à-dire :

- o un environnement obstrué,
- o un environnement confiné,
- o un environnement confiné et obstrué.

Même si les expériences effectuées durant cette étude ont été réalisées à l'échelle du laboratoire, elles constituent une base de données pour la littérature et de comparaison pour les modèles existants.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres.

Le chapitre 1 établit un état de l'art sur l'accélération des flammes hydrogène-air en environnement obstrué et/ou confiné. Ce chapitre permet de poser les lignes conductrices qui ont donné naissance à cette étude et à la définition des dispositifs expérimentaux utilisés.

Puis, une description détaillée du dispositif expérimental (banc de déflagration) est effectuée au chapitre 2. Elle comprend une description globale du dispositif expérimental avec les règles de sécurité suivies lors du démarrage du dispositif expérimental et à suivre lors d'un essai. Puis, les différentes configurations réalisées et employées lors de cette étude sont présentées. Enfin, une description des mélanges hydrogène-air employés lors des essais et de la chaîne d'acquisition des mesures de pression et de vitesse de flamme est établie.

Les chapitres 3 et 4 regroupent l'étude de l'accélération de la flamme en milieu obstrué et/ou confiné. Le chapitre 3 présente les résultats obtenus pour un milieu obstrué et non confiné. Deux types de résultats ont été analysés : i) la surpression maximale de l'onde de pression obtenue suite à l'amorçage du mélange gazeux, et ii) la vitesse de flamme. Une comparaison entre une configuration non obstruée et obstruée a été menée pour analyser le rôle des obstacles. Le chapitre 4 suit le même processus, mais pour un milieu confiné. Tous les résultats obtenus ont été comparés à des modèles de la littérature (vitesse de flamme pour la configuration non confinée et surpression maximale interne pour la configuration confinée).

Enfin, une conclusion récapitulant les principaux résultats obtenus lors de cette étude et ouvrant sur des perspectives intéressantes à développer est proposée.

CHAPITRE 1. ACCELERATION D'UNE FLAMME
HYDROGENE-AIR

L'explosion d'un nuage gazeux n'est possible que si ce dernier rencontre une source d'amorçage. Dès lors, l'inflammation du prémélange gazeux entraîne la formation d'une zone de réaction exothermique, appelée onde de combustion ou flamme. Dans cette zone les réactifs sont transformés en produits brûlés et l'énergie chimique est transformée en chaleur. Selon la cinétique de cette transformation, deux régimes de propagation de flammes sont possibles :

- o La déflagration : dans ce cas la vitesse de propagation de la flamme est subsonique. Le Groupement Français de Combustion donne la définition suivante de la déflagration : « *Mode de propagation autonome subsonique de la réaction dans un milieu combustible (idéalement prémélangé) grâce à son couplage avec les mécanismes de transport de chaleur et de matière. Le mode de déflagration est caractérisé par une diminution de la pression et de la masse volumique en même temps qu'une accélération des gaz traversant la zone de réaction* ».
- o La détonation : la vitesse de propagation des flammes est alors supersonique. Le Groupement Français de Combustion donne la définition suivante de la détonation : « *Propagation plus ou moins autonome d'une zone de combustion couplée à un complexe d'ondes de choc qui la précède, se faisant avec une vitesse supérieure à la célérité du son par rapport au milieu réactif. Le mode de détonation est caractérisé par une augmentation de la pression et de la masse volumique en même temps qu'une décélération des gaz par rapport à la zone réactionnelle qu'ils traversent. Dans ce mode, la vitesse de propagation de la zone de réaction doit être supersonique par rapport au gaz frais* ».

Dans cette étude nous traiterons du mode de déflagration qui est plus souvent observé suite à une fuite dans un milieu industriel, ainsi que la possible transition du régime de déflagration au régime de détonation produit par des obstacles. Pour ce faire, nous poserons les bases de la propagation de la flamme dans les tubes obstrués, ce qui permettra d'aborder le sujet de la transition déflagration détonation. Puis, nous aborderons le sujet des explosions de gaz non confinées et en milieu pouvant être obstrué. Enfin, nous traiterons le sujet des explosions semi-confinées avec présence d'évent, qui constitue un moyen de protection des structures contre les effets des explosions.

1.1 La propagation des flammes dans un tube fermé et obstrué

Dans ce paragraphe, nous allons traiter de la propagation de flamme dans des tubes en vue de l'obtention d'une Transition Déflagration Détonation (TDD). Les travaux de Lee et al. (1980) et plus récemment Shepherd et al. (1992) ont permis de diviser le phénomène de TDD en deux étapes distinctes : i) la création des conditions initiales favorables à l'accélération forte d'une flamme (accélération de flamme, production de vortex, formation de jets et mise en mouvement des gaz frais), et ii) la formation de l'onde de détonation elle-même et sa propagation. Une étude récente de Ciccarelli et al. (2008) dresse un état de l'art complet des phénomènes d'accélération de flamme et de TDD dans des tubes.

Un des éléments importants et jouant un rôle essentiel dans le processus d'accélération de la flamme est constitué par les obstacles. Leur rôle dans le processus d'accélération de la flamme est exposé dans le paragraphe suivant.

1.1.1 Le rôle des obstacles

L'introduction d'obstacles répétitifs dans un tube permet de réduire de façon significative les longueurs de transition déflagration détonation pour un mélange réactif donné. Les obstacles jouent sur les deux mécanismes d'accélération de la flamme : la génération et le renforcement de la turbulence et des ondes de choc (voir figures 1.1 et 1.2). En effet, les obstacles sont une manière d'extraire de l'énergie cinétique de l'écoulement pour la production de large turbulence. L'écoulement turbulent est alors à l'origine de l'augmentation de la vitesse de flamme. Si la vitesse de flamme atteint des vitesses supersoniques (de l'ordre du km/s), il pourra se produire une transition vers la détonation.

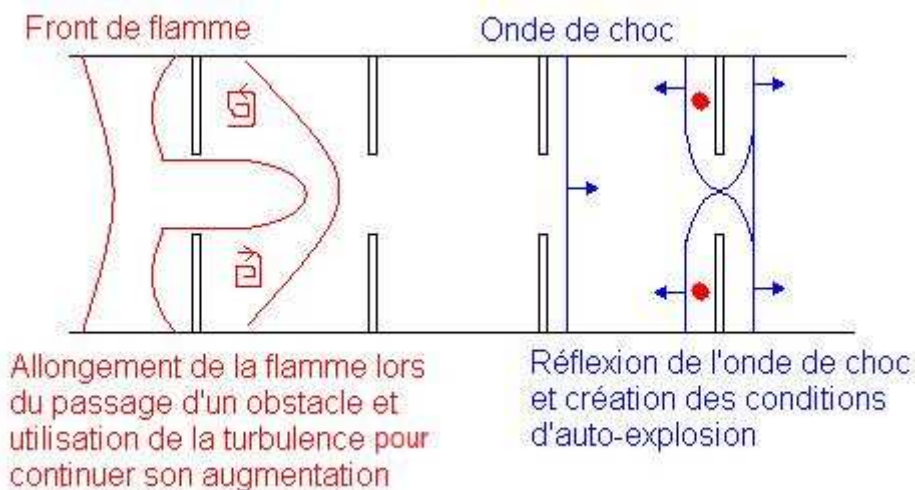


Figure 1.1 : Schématisation du comportement du front de flamme et des chocs interagissant avec un obstacle dans le tube (Sorin (2005)).

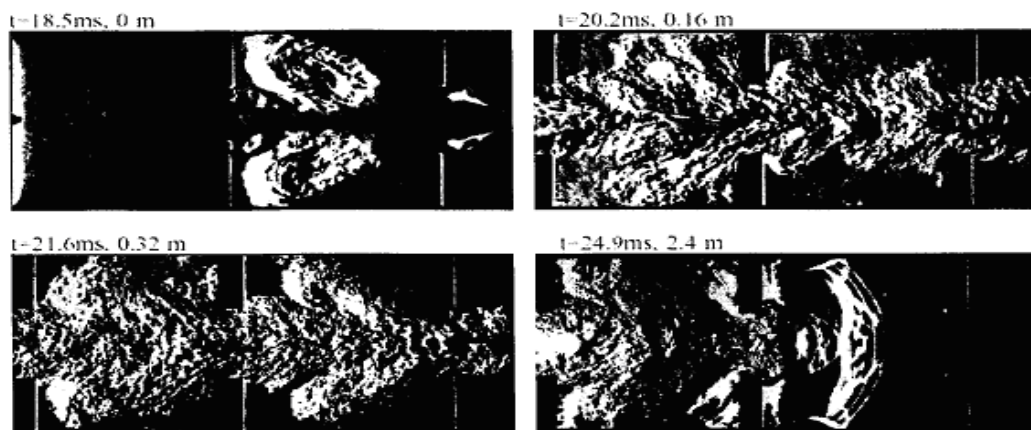


Figure 1.2 : Exemple de propagation de flamme au travers d'une succession d'obstacles (extrait de Sorin (2005)).

Dans un tube totalement confinée avec des obstacles, la flamme peut accélérer de plusieurs centaines de mètres par seconde durant une explosion de gaz. Les mécanismes impliquant l'augmentation du taux de combustion dans les déflagrations turbulentes sont : le plissement du front de flamme par de larges turbulences et le transport turbulent de chaleur et de masse au front de réaction. La turbulence est due à l'interaction du flux avec des structures (paroi du tube, obstacles par exemple) (voir figure 1.3).

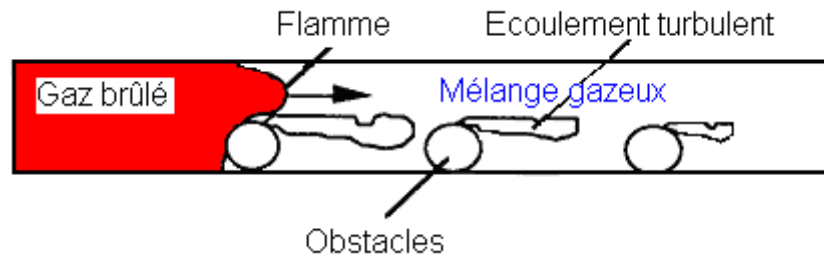


Figure 1.3 : Génération de turbulence dans un tunnel créée par des obstacles répétés.

Tout d'abord, les ondes de compression de faibles amplitudes interagissent avec les obstacles. Se déplaçant à la vitesse du son du milieu, ces ondes se réfléchissent sur les obstacles et reviennent perturber la flamme. Ces perturbations apparaissent avant que la flamme n'interagisse directement avec l'obstacle. De plus, l'obstacle réduit la section du tube, ce qui est quantifié par le rapport de blocage (ABR) qui définit le rapport entre la section obstruée et la section totale du tube (équation 1.1). Cette réduction de section induit des vitesses locales de chasse de l'écoulement en avant de la flamme plus importantes (par conservation du débit) et crée des zones de recirculations de large amplitude, de l'ordre du diamètre libre, derrière les obstacles. Ces deux effets permettent d'étirer la flamme et d'augmenter rapidement sa surface. Une fois l'obstacle passé, la flamme reprend assez vite son aspect régulier. Il est donc nécessaire de placer une succession d'obstacles dans le tube de manière à conserver l'effet d'accélération continu sur la flamme (voir figure 1.4).

$$ABR = 1 - \frac{r_{orifice}^2}{r_{tube}^2} \quad (1.1)$$

Où : $r_{orifice}$ - rayon de la partie vide de l'obstacle – m

r_{tube} - rayon du tube contenant l'obstacle – m

L'accélération de la flamme dans le début de sa propagation dépend donc des processus d'augmentation de la surface de flamme comme l'augmentation de la turbulence du milieu et/ou de la température locale des gaz frais consécutive aux

ondes de pré compression créées par le piston. Chaque accélération de la flamme génère une nouvelle onde de compression. Le train d'onde ainsi créé par la flamme provoque un raidissement du front de flamme puisque les ondes successives se rattrapent et forment une onde de choc dans le milieu mettant les gaz frais en mouvement.

Enfin, lorsque l'onde de choc s'établit dans le milieu, son interaction avec un obstacle permet localement la création de zone de forte pression et température. L'introduction d'obstacles permet donc d'obtenir localement les conditions d'auto explosion du mélange réactif et favorise d'autant plus la création de la détonation. Le mécanisme de l'accélération de flamme par des obstacles répétés constitue donc une forte boucle de rétroaction positive (voir figure 1.4).

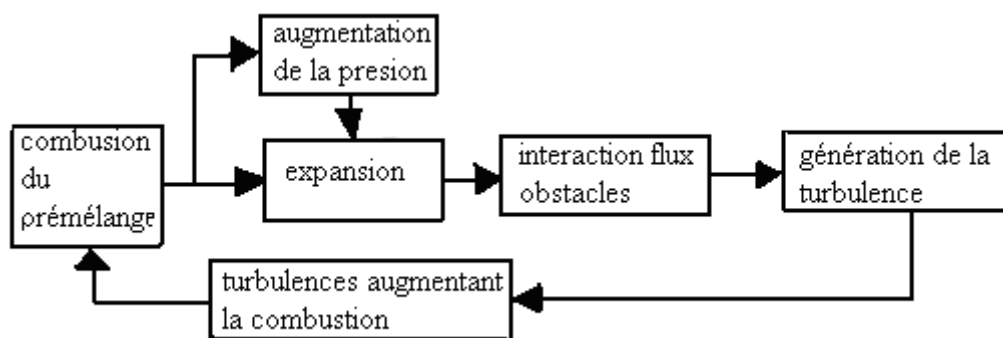


Figure 1.4 : Boucle de rétroaction positive du mécanisme d'accélération de flamme.

De nombreux travaux ont déjà été menés sur la propagation de flamme dans des tubes obstrués. Parmi ces travaux, Salzano et al. (2002) ont entrepris une comparaison entre des résultats de la littérature concernant la propagation de flamme dans des tubes et les résultats obtenus avec un logiciel de simulation CFD AutoReagas dans le but de valider l'utilisation de ce logiciel. Deux dispositifs expérimentaux ont été analysés. Le premier dispositif (Lee et al. (1984), Peraldi et al. (1986)) concerne des tubes de section circulaire (figure 1.5). Les longueurs du tube sont de 11 m et de 18 m, et pour chaque longueur trois diamètres de tube ont été analysés (0,05 m, 0,15 m et 0,3 m). Le tube est rempli d'obstacles circulaires formant des ABR de 0,44, 0,39 et 0,28. Le second dispositif obstrué (Chao et al. (1999))

concerne un tube de section carré (figure 1.6). Le tube fait 7 m de long et possède une section de 0,3 m de côté. Le tube est rempli avec des obstacles cylindriques verticaux de 0,034 m de diamètre et placés en lignes successives de 3 et 2 obstacles espacées de la section du tube. Cet arrangement d'obstacles produit un ABR de 0,41. Différents mélanges combustible-air ont été analysés parmi lesquels un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.

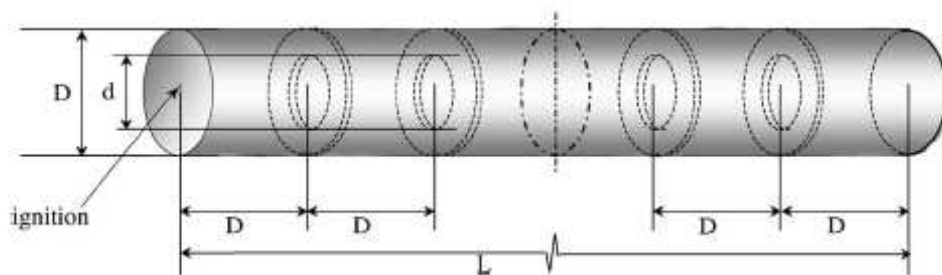


Figure 1.5 : Dispositif expérimental de tube circulaire utilisé dans l'étude de Salzano et al. (2005).

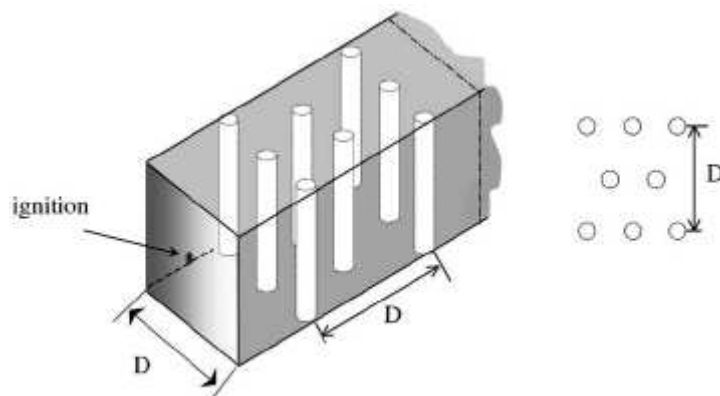


Figure 1.6 : Dispositif expérimental de tube de section carrée utilisé dans l'étude de Salzano et al. (2005).

L'erreur la plus importante est obtenue dans le cas du tube de 11 m de long, de diamètre 0,3 m et d'ABR 0,28, où le logiciel prédit une vitesse de flamme de 979 m/s alors que dans les expériences la vitesse atteinte est de 1900 m/s (soit le régime de Chapman-Jouguet). La comparaison entre le code de calcul et les résultats expérimentaux pour le cas du mélange hydrogène-air à la stœchiométrie a abouti à

une erreur moyenne de 20,6 %. Cette comparaison met donc en évidence les limites d'AutoReagas dans le cas de combustible très réactif comme l'hydrogène.

Récemment, Bychkov et al. (2010) ont réalisé des séries de simulations portant sur les accélérations de flamme dans des tubes obstrués. Ils ont mis en évidence que le phénomène d'accélération de flamme dans des tubes obstrués pouvait avoir d'autres explications que celles avancées par Schelkin (accélération due à l'effet des parois du tube et à la turbulence, les obstacles étant là pour ajouter de la turbulence). En effet, en se basant sur des expériences récemment menées, ils ont pu mettre en évidence que l'accélération du front de flamme la plus importante se passait essentiellement dans la zone libre du tube et n'était pratiquement pas turbulente (pas de combustion dans les poches de gaz créées entre les obstacles). Par contre, quand le front de flamme atteint la vitesse du son, le « jet » central génère des turbulences plus fortes, qui créent une flamme plus ondulée avec une combustion plus turbulente entre deux obstacles (figure 1.7).

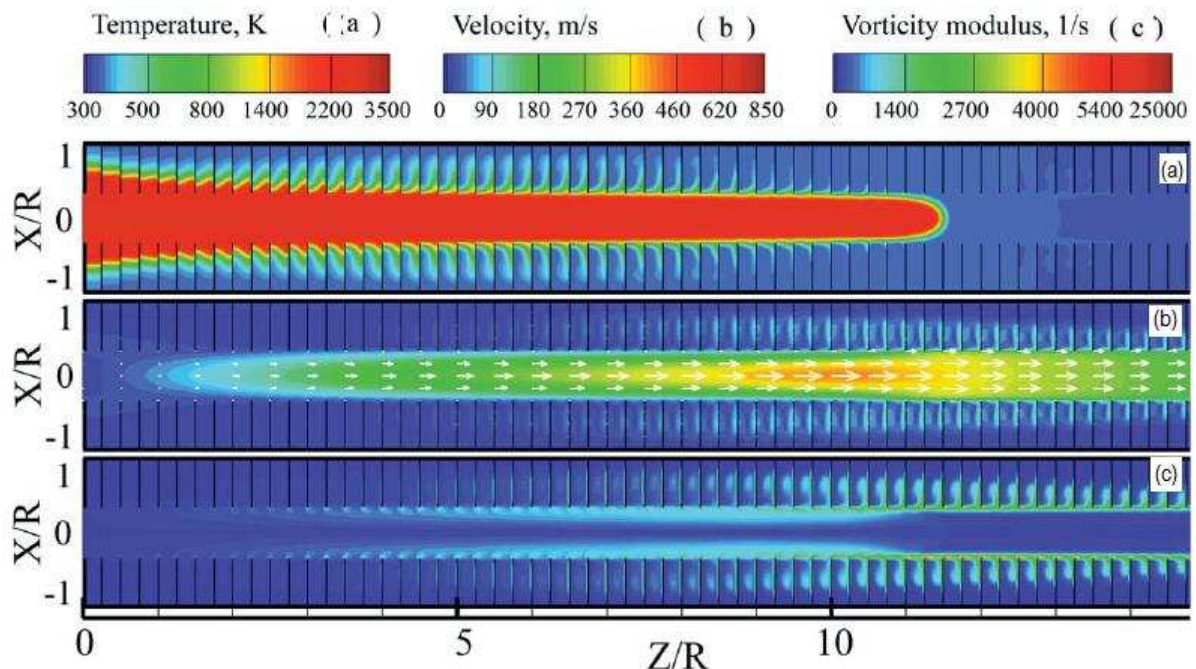


Figure 1.7 : Etat de la température (a), de la vitesse (b) et de la vorticité (c) dans l'écoulement du mélange gazeux généré par l'accélération de flamme.

1.1.2 Les différents processus de propagation de la flamme

Pour la propagation de la flamme dans des tubes contenant des obstacles répétitifs (plaques percées et régulièrement espacées), quatre régimes différents dépendant du rapport blocage (ABR) ont pu être observés (Lee et al. (1984), Teodorczyk et al. (1989 et 1991)) :

- o Le régime de « coincement » : pour un rapport de blocage élevé, la flamme se propage tout d'abord au travers de quelques chambres (délimitées par les plaques perforées) avant de s'éteindre, les pertes thermiques étant supérieures à la production de chaleur. C'est par exemple le cas des travaux de Mallet (2005) qui ont permis, entre autre, de mettre en évidence ce phénomène dans des cas extrêmes (mélanges hydrogène-air-diluant à 10,5 mol% d'hydrogène). L'extinction de la flamme avant la fin de la zone obstruée a été observée avec des grilles successives d'ABR (rapport de blocage) de 0,6. Le régime de coincement peut aussi être recherché pour par exemple arrêter un régime de détonation. Ce type d'étude a notamment été entrepris par Bauer (2005) dans le cas de tube à arrêtoir de flamme pour un mélange méthane-air à différentes concentrations.
- o Le régime « Choking » (flamme choquée) : pour un rapport de blocage plus faible, la flamme se maintient et se propage jusqu'à atteindre une vitesse proche de la vitesse du son dans les gaz brûlés. Le rapport de blocage optimum semble être autour de 0,5 pour aboutir à cette vitesse.
- o Le régime de « Quasi-Détonation » : si le contenu énergétique (enthalpie de réaction) du mélange le permet, l'accélération de la flamme peut conduire à l'apparition d'une onde de détonation dans le tube.
- o Le régime de Détonation de Chapman – Jouguet à proprement parler : l'onde de détonation est considérée comme une discontinuité mince (onde de choc et de combustion couplée) réactive adiabatique se propageant à une célérité D_{CJ} (1500 à 2000 m/s) supersonique par rapport au gaz frais.

1.1.3 Les critères d'obtention d'une Transition Déflagration Détonation

1.1.3.1 Critères géométriques

Le critère d'existence d'une détonation dans le cas des tubes remplis d'obstacles compare la dimension géométrique caractéristique du tube (le diamètre d pour les sections cylindriques ou la plus petite des hauteurs pour les tubes rectangulaires) à la largeur de la cellule de détonation λ (figure 1.8).

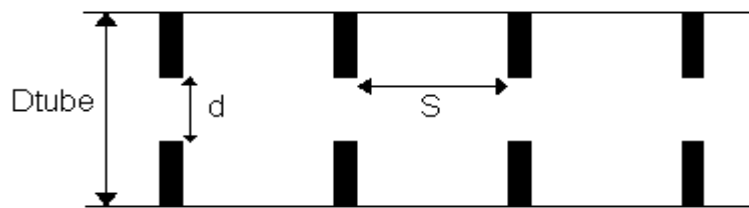


Figure 1.8 : Schéma d'un tube rempli d'obstacles.

Ce critère a été exprimé de deux façons différentes :

- o $d \geq \lambda$ (Peraldi et al. (1986)),
- o $\frac{D_{tube} + S}{2 \times \left(1 - \frac{d}{D_{tube}}\right)} \geq 7 \lambda$ (Dorofeev et al. (2000)).

De plus, comme il a été précisé dans les paragraphes précédents, pour obtenir une TDD, la flamme doit être suffisamment accélérée pour se trouver en régime « Choking ». Un modèle simple de détermination de la distance d'obtention de la flamme choquée (distance de propagation de flamme où la flamme atteint la vitesse du son dans les gaz brûlés) a été proposé par Vesper et al. (2002) se basant sur l'évolution de la forme de la flamme dans un tube rempli d'obstacles et espacés du diamètre du tube (figure 1.9).

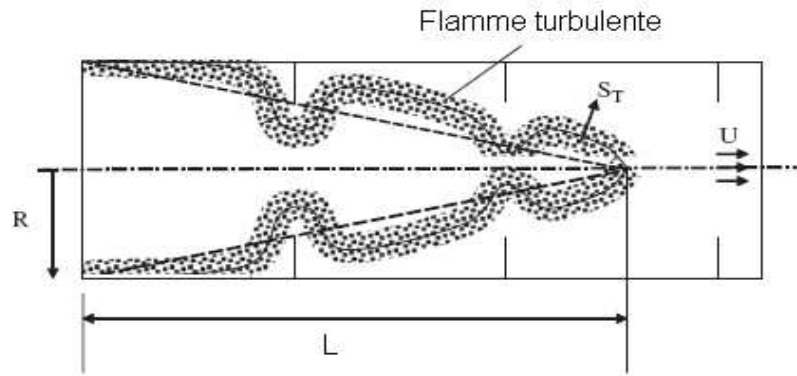


Figure 1.9 : Schéma d'une flamme se propageant dans un tube rempli d'obstacles (Veser et al. (2002)).

Une relation entre la distance d'obtention de la flamme choquée, le rayon du tube (R), le rapport de blocage (ABR), la vitesse de flamme laminaire (S_L), le coefficient d'expansion ($\sigma = \rho_f / \rho_b$) et la vitesse du son dans les gaz brûlés a été établie par Veser et al. (2002) pour des mélanges hydrogène-air de 10 à 20 vol% en hydrogène :

$$\frac{L}{R} \times \frac{10 S_L (\sigma - 1)}{a_{gb}} = a \frac{1 - ABR}{1 + b ABR} \quad (1.2)$$

Où : L – distance d'obtention de flamme choquée – m

R – rayon du tube – m

S_L – vitesse de flamme laminaire – m/s

a_{gb} – vitesse du son dans les gaz brûlés – m/s

ABR – Rapport de Blocage (défini à l'équation (1.1)) – (-)

a et b – constantes (a = 0,2 et b = 1,5 pour des ABR de 0,3 à 0,75) – (-)

σ - rapport d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

Concernant la longueur de TDD (différente de la longueur d'obtention de la flamme choquée), de nombreux travaux ont été menés ces dernières années comme ceux de Sorin (2005) par exemple. Ces derniers ont été réalisés dans un tube fermé et rempli d'obstacles (spires et plaques percées d'un ou plusieurs orifices). Les résultats obtenus montrent que dans le dispositif optimal pour obtenir une TDD se compose de deux préchambres avec un tube de diamètre interne de 26 mm et une spire de longueur variant de 11 cm à 33 cm. La première préchambre est constituée d'une plaque percée d'un trou de diamètre 9 mm ($BR = 0,87$) et la seconde d'une plaque percée de 4 trous de diamètres 5 mm ($BR = 0,85$). Dans le cas du mélange hydrogène-air à la stœchiométrie la longueur de TDD est d'environ 36 cm et la TDD a pu être obtenue avec une longueur de spire minimale de 27 cm. De plus, quelque soit les mélanges utilisés par Sorin (2005), le paramètre adimensionné longueur de TDD sur taille de la cellule de détonation (L_{TDD} / λ) vaut environ 30. Rocourt (2004), dans le cadre de l'étude du Pulsoréacteur à Ondes de Détonation, a entrepris des expériences dans un tube de longueur 2,5 m et de diamètre 49 mm où est placée une spire de Schelkin. Pour le cas du mélange hydrogène-air stœchiométrique, la spire de Schelkin a un diamètre de 33 mm et une longueur de 640 mm ($ABR = 0,55$). La transition se déroule à environ 30 à 40 cm du début du tube et donc de la source d'amorçage. Il est donc important de noter que la transition se déroule dans la spire de Schelkin.

1.1.3.2 Critère lié au combustible

Comme il a été mentionné précédemment (paragraphe 1.1.1), le mécanisme de l'accélération de flamme par des obstacles répétés constitue une boucle de rétroaction positive. De nombreux paramètres aussi bien géométrique (taille des obstacles, forme des obstacles, distance entre obstacles par exemple) que dépendant du mélange lui-même peuvent agir sur cette boucle de rétroaction positive (Dorofeev et al. (1999), Kuznetsov et al. (1999)). Se basant sur ces constatations, Dorofeev et al. (2001) ont proposé une corrélation pour évaluer l'accélération de flamme dans des tubes en fonction de la composition du mélange à une température et pression données. La corrélation ainsi obtenue est la suivante :

$$\sigma^* = 0,9 \times 10^{-5} \times x^3 - 0,0019 \times x^2 + 0,1807 \times x + 0,2314 \quad (1.3)$$

$$\text{Avec : } x = \frac{E_a}{R T_u} \quad (1.4)$$

Où : E_a – énergie d'activation du mélange – J

R – constante universelle des gaz – J / (mol.K)

T_u – température des gaz frais – K

ϕ - richesse du mélange – (-)

Il apparaît donc que pour un $\sigma > \sigma^*$ une forte accélération de flamme est possible dans les conditions favorables, et si $\sigma < \sigma^*$, alors l'accélération de flamme sera faible en dépit de la présence de conditions favorables à l'accélération.

De plus, pour un mélange stœchiométrique hydrogène-air à 300 K, les valeurs obtenues sont de 7413,6 pour E_a / R , 24,7 pour la valeur de x et 3,67 pour la valeur de σ^* . Si le raisonnement inverse est appliqué, il est donc possible d'obtenir la concentration d'hydrogène à partir de laquelle un mélange hydrogène-air est sensible à l'accélération de flamme. Pour le cas de conditions de température et de pression standard (300 K et 1 bar, conditions prises dans l'étude expérimentale présentée dans ce mémoire), la valeur de σ^* définie est de 3,76 soit 11 % d'hydrogène. Il apparaît donc que pour seuls les mélanges hydrogène-air à 11 % d'hydrogène sont sensibles à l'accélération de la flamme.

1.2 La propagation de flamme en tube semi-ouvert

La propagation de flamme en tube semi-ouvert constitue un cas particulier de la propagation de flamme en tube fermé exposé dans le paragraphe précédent. De nombreuses expériences ont déjà été menées dans un tel environnement aussi bien dans des tubes sans obstacle que dans des tubes remplis d'obstacles. Nous allons donc nous intéresser uniquement aux cas des tubes remplis d'obstacles permettant une importante accélération de la flamme et au cas des mélanges hydrogène-air.

Alekseev et al. (2001) ont réalisé des séries d'expériences dans des tubes obstrués de diamètre interne 92 mm ou 46 mm et de longueur totale égale à 63 fois leur diamètre interne. Les tubes ont été remplis d'obstacles de forme annulaire et séparés les uns des autres d'une distance une fois leur diamètre, soit un rapport de blocage de 0,6. L'aire totale de la ventilation est de 0,4 fois l'aire de la surface du tube. Les rapports de confinement ont varié de 0,4 (toutes les ouvertures étant ouvertes) à 0,1 (figure 1.10). Les tubes sont remplis de mélange hydrogène-air contenant de 9 à 70 % d'hydrogène ou d'un mélange stœchiométrique hydrogène-oxygène dilué avec de l'azote.

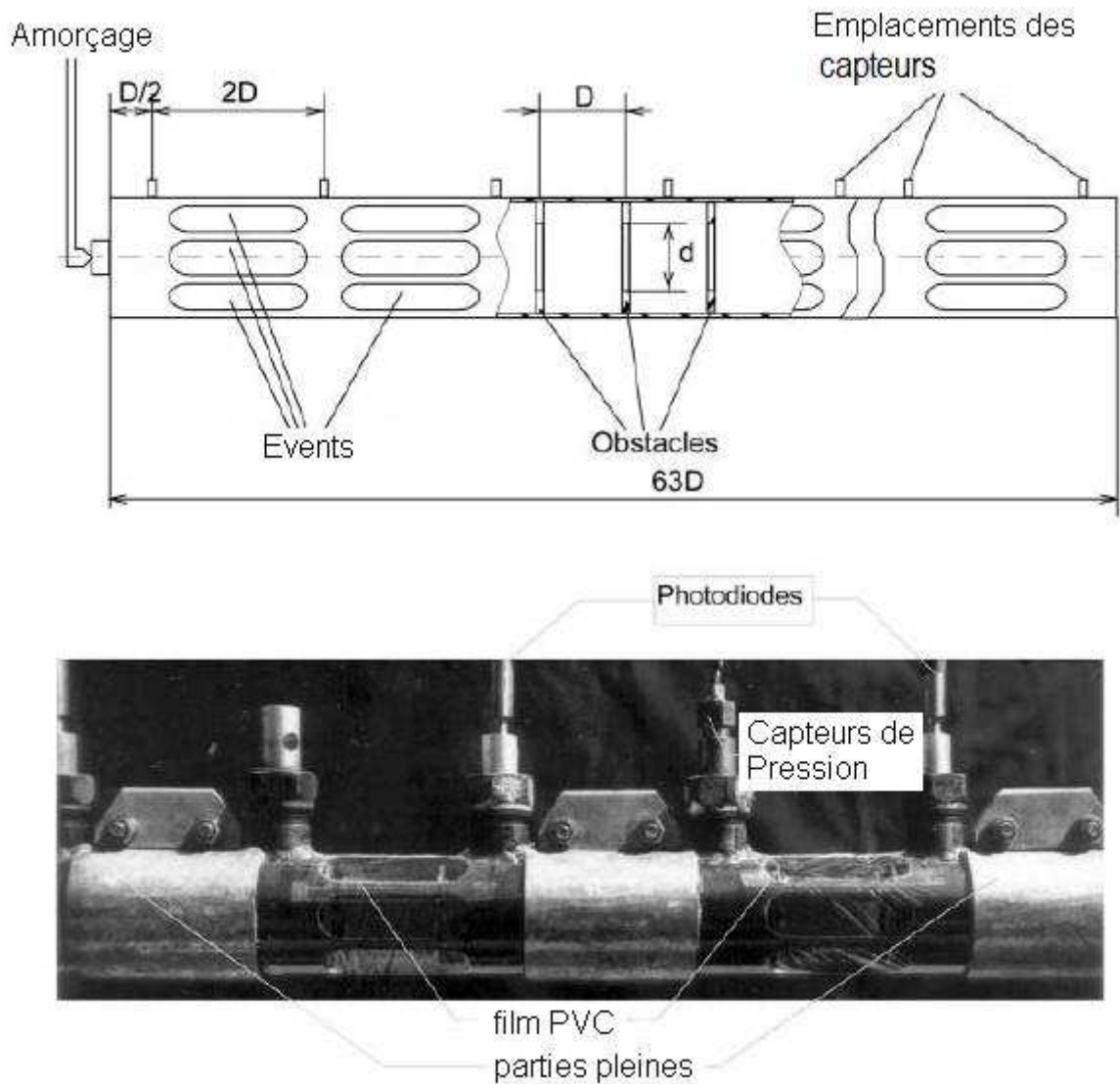


Figure 1.10 : Dispositif expérimental d'Alekseev et al. (2001).

Dans le cas du rapport de confinement de 0,4, il n'y a pas d'accélération significative de la flamme pour des mélanges hydrogène-air. Le régime de quasi-détonation n'est atteint expérimentalement pour le mélange hydrogène-air qu'avec un rapport de confinement de 0,2. Au vu de ces résultats, il est apparu que l'accélération de flamme dépendait aussi de la surface d'événements présents. Les auteurs ont donc pu définir une relation reliant le σ^* déterminé par Dorofeev et al. (2001) dans le cas d'un tube fermé à un $\sigma^*_{\text{évent}}$ dans le cas d'événement transverse présents sur un tube. L'expression ainsi obtenue est la suivante :

$$\sigma_{\text{évent}}^* = \sigma^* \times (1 + 1,24 \times \alpha) \quad (1.5)$$

Où : $\sigma_{\text{évent}}^*$ – coefficient d'expansion critique avec présence d'événements – (-)

σ^* – coefficient d'expansion critique dans un tube clos – (-)

α - surface d'évent par rapport à la surface du tube – (-)

Grune et al. (2010) ont entrepris des séries d'expériences concernant des explosions de mélange hydrogène-air contenant de 11 % à 35 % d'hydrogène dans un tube rectangulaire de diverses largeurs (0,30 m, 0,60 m et 0,90 m) de 2,5 m de long ouvert dans sa partie basse. Le tube est clos à une extrémité (B), ouvert à l'autre (C) et l'épaisseur de la partie supérieure (h) est variable, ce qui permet 3 hauteurs différentes de tube (0,6, 0,12 et 0,24 m). Des poutres de section 1,5 cm x 2 cm sont placées dans le tube de combustion de section carrée. Deux poutres sont espacées de 1,5 cm et deux ensembles de poutres sont séparés de 12 cm. Ces configurations sont disposées de telle sorte que le rapport de blocage soit constant et de 50 %. Ce dispositif est placé dans une enceinte cylindrique de 10 m de long et 3,3 m de diamètre (figures 1.11 et 1.12).

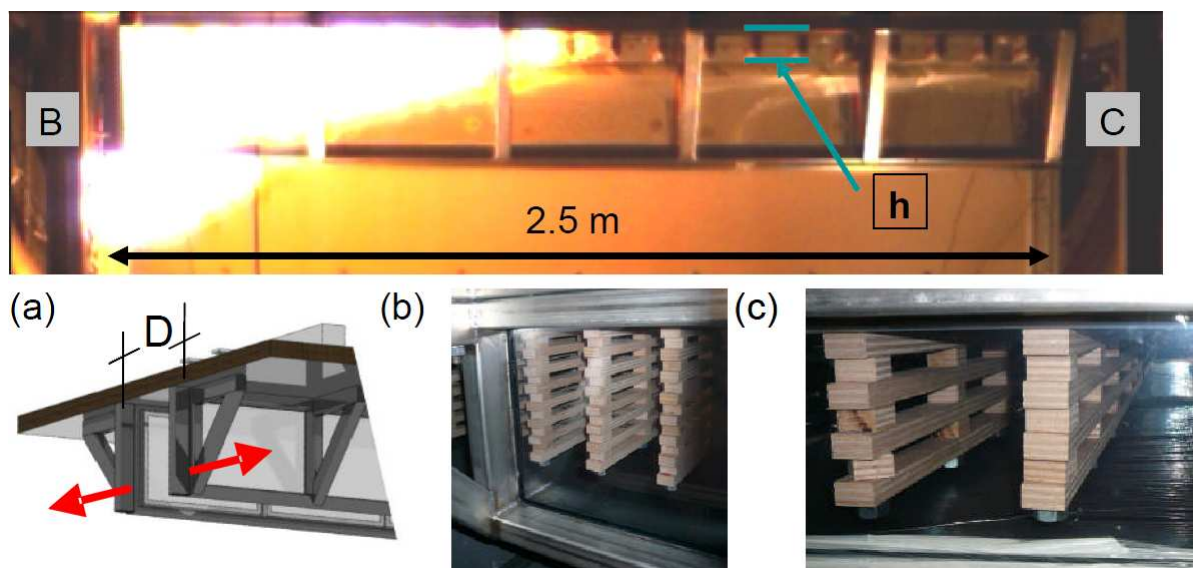


Figure 1.11 : Tube semi-ouvert du dispositif de Grune et al. (2010) : a) vue de profil du tube, b) épaisseur de la partie supérieure de 0,24 m, et c) épaisseur de la partie supérieure de 0,12 m.

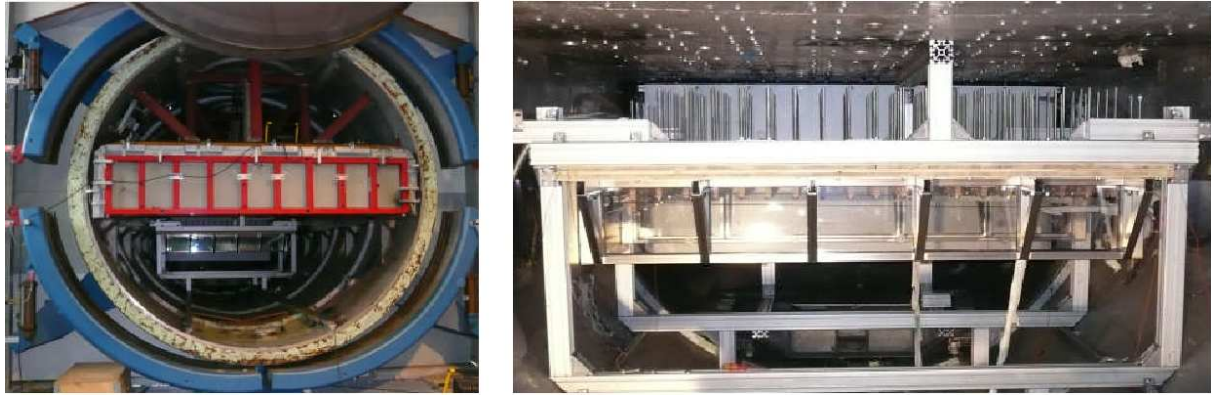


Figure 1.12 : Dispositif expérimental complet de Grune et al. (2010).

En fonction de la disposition des obstacles et de la réactivité du mélange, trois régimes de propagation de flamme à l'intérieur du tube peuvent être observés : i) une propagation lente, ii) une déflagration rapide, et iii) un régime de détonation. Par exemple, pour un mélange à 15 % d'hydrogène, une largeur de tube de 0,3 m et une épaisseur de 0,12 m, la propagation reste lente ; alors que pour la même configuration et un mélange à 35 % d'hydrogène, le régime de propagation devient une détonation. Les auteurs ont ainsi déterminé une expression définissant une valeurs critique du coefficient d'expansion se basant sur l'épaisseur de la partie supérieure h , une constante K dépendant de l'espacement entre obstacles, de l'ABR (rapport de blocage surfacique) et de la taille caractéristique des obstacles, et de la valeur du coefficient d'expansion critique σ_0^* (3,75) définie par Dorofeev et al. (2001). La relation obtenue est la suivante :

$$\sigma^* = \sigma_0^* \times \frac{35}{h_{eff}} \quad (1.6)$$

$$\text{Avec : } h_{eff} = \sqrt{h^{1/3} - \left(\frac{s}{2}\right)^{1,1}} \quad (1.7)$$

Où : σ^* - coefficient d'expansion critique – (-)

σ_0^* - valeur du coefficient d'expansion critique de Dorofeev et al. (2001) – (-)

h – épaisseur de la partie supérieure du dispositif – (-)

s – distance entre obstacles – m

Il apparaît donc de ces essais, que l'accélération de la flamme dans un tube largement ventilé reste assez difficile à obtenir.

1.3 La propagation de flamme en milieu libre et obstrué

Lors de la propagation d'une explosion en champ libre, les instabilités de flamme se produisant dans des écoulements en tube, et liées à l'interaction de la flamme avec les parois du tube, ne sont plus présentes. Les valeurs de pression et de vitesse obtenues vont donc être plus faibles que dans le cas d'un tube. L'augmentation de la vitesse de flamme et de la pression générée par l'onde de pression consécutive à une déflagration va donc dépendre très fortement de l'environnement dans lequel la flamme se propage (présence d'obstacles, de confinement) et de la réactivité du mélange combustible.

Un modèle « acoustique » est appliqué aux flammes, dont les principes de représentation physique ont été proposés par Taylor dès 1946. Cependant, ce modèle n'a fait l'objet de développements significatifs qu'à partir des années 70 (Kuhl et al. (1973), Strehlow et al. (1973, 1976, 1979)) pour aboutir à des outils pratiques à partir des années 80 (Van den Berg (1985), Lannoy et al. (1989), Van Wingerden (1984), Baker et al. (1991), Tang et al. (1999), Pierorazio et al. (2004)). Un modèle analytique du premier ordre a été développé par Leyer et al. (1982) et Deshaies (1981) pour prédire la propagation de l'onde de pression dans un milieu libre et non obstrué (voir annexe 1). Le fondement de ces méthodes n'a pas été remis en cause depuis, mais des améliorations ont été apportées visant, par exemple, à prédire plus précisément la phase terminale de l'onde de pression (Duplantier (1993 et 1996)) ou la prise en compte d'obstacles dans le champ de propagation (Cleaver et al. (1996 et 1997)).

1.3.1 Contexte sécuritaire de l'étude des explosions hydrogène-air

1.3.1.1 Surpressions produites par des explosions de mélange hydrogène-air

o Champ libre et non obstrué

Avec l'essor des programmes concernant l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, les recherches se sont axées dans une optique d'amélioration et d'apport de données fiables concernant les déflagrations et les détonations de mélange hydrogène-air. Parmi ces expériences, Schneider et al. (1983) ont réalisé

une série d'expériences dans un hémisphère de 20 m de diamètre (volume total de 2094 m³) rempli d'un mélange stœchiométrique hydrogène-air. L'amorçage est réalisé par un apport d'énergie de 150 J au niveau du sol et au centre du confinement initial. Les surpressions ont été enregistrées par 11 capteurs de pression, par exemple, la surpression maximale observée à 5 m de la source d'amorçage vaut 10 kPa. Plus récemment, Sato et al. (2006) ont entrepris un ensemble d'essais dans le but d'établir une base de données pour les besoins des évaluations de sécurité relatives à l'hydrogène ainsi que pour la validation de codes numériques. Les expériences réalisées en champ libre ont été effectuées à petite (parallélépipède de 5,2 m³), moyenne (parallélépipède de 37 m³) et grande (dans un dôme de 300 m³) échelle et pour des mélanges hydrogène-air de 15 % à 57 % en hydrogène. Les valeurs de la surpression à petite échelle sont de 5 kPa pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et de 2 kPa pour le mélange hydrogène-air à 20 % d'hydrogène à environ 1 m de la source d'amorçage. Dans le cas des expériences à moyenne échelle, la vitesse de flamme atteint 40 à 45 m/s pour le mélange hydrogène-air stœchiométrique et 30 m/s pour un mélange hydrogène-air à 20 % d'hydrogène. Merilo et al. (2007) ont effectué des expériences dans le même dispositif à petite échelle que Sato et al. (2006). Pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène, la vitesse de flamme obtenue est de 36 m/s et la surpression maximale de 3 kPa pour une distance de 1 m de la source d'amorçage pour les essais de Merilo et al. (2007). Il est à noter que les valeurs obtenues par Merilo et al. (2007) sont inférieures aux valeurs de Sato et al. (2006).

Il apparaît donc que sans la présence d'obstacles, les valeurs de surpression et de vitesse de flamme restent faibles.

o Champ libre et obstrué

Comme il a déjà été mentionné précédemment, l'accélération de flamme dans un milieu libre va fortement dépendre de la configuration du milieu dans lequel elle évolue. Les obstacles vont être un des principaux activateurs de l'accélération de la flamme en champ libre.

Cependant, une revue détaillée de la littérature n'a pas permis de trouver beaucoup de travaux concernant la propagation de flamme hydrogène-air dans un environnement obstrué exploitables et présentant à la fois des résultats en termes de surpression et de vitesse de flamme. Groethe et al. (2007) ont effectué des séries d'expériences dans un dôme d'un volume total de 300 m^3 (rayon de 5,25 m) (figure 1.13). Le dôme peut contenir 18 obstacles de forme cylindriques de hauteur 3 m et de rayon 0,23 m (VBR = 11%, cylindres placés à des distances de 1,9 m et 1,1 m de la source d'amorçage).

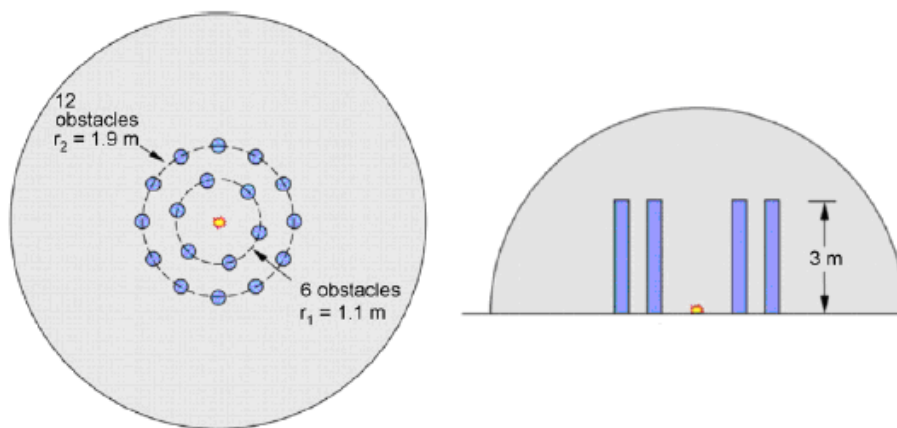


Figure 1.13 : Dispositif expérimental de Groethe et al. (2007).

Le fait d'avoir placé des obstacles n'a pas conduit à une augmentation significative des valeurs de la surpression comparé aux tests entrepris sans obstacle. La surpression la plus élevée vaut 24,31 kPa à 6,16 m. Ce phénomène semble être dû selon les auteurs à une taille des obstacles trop importante ne permettant pas la création d'un écoulement fortement turbulent.

Dans le cadre du projet européen Hyapproval, Shirvill et al. (2007) ont mené des expériences prenant comme environnement une station service à hydrogène avec la présence d'un véhicule. Le véhicule correspond à un obstacle, et l'ensemble constitué par le véhicule et deux distributeurs d'hydrogène correspond à un volume de blocage de 14% (figure 1.14). Le scénario d'accident envisagé se base sur un mélange homogène hydrogène-air à la stœchiométrie amorcé entre les deux distributeurs d'hydrogène. Les résultats obtenus montrent que les surpressions les

plus élevées se situent sous le véhicule (environ 180 kPa) et près du mur de protection (environ 87 kPa).



Figure 1.14 : Dispositif expérimental de Shirvill et al. (2007).

Royle et al. (2007) ont étudié des explosions de mélange hydrogène-air contenu dans une structure rectangulaire entourée d'un fin film plastique et rempli de barreaux métalliques (figure 1.15). Le Rapport de Blocage Volumique (somme du volume de tous les obstacles présents dans le mélange gazeux sur le volume total du mélange) est de 4,40%. La surpression maximale enregistrée est de 457 kPa et se situe dans les angles de la structure. La faible dimension des morceaux de film plastique après explosion indique la transition de la déflagration à la détonation.



Figure 1.15 : Dispositif expérimental de Royle et al. (2007).

Une conclusion importante à noter de cette analyse est que ces quelques travaux ne font pas mention de résultats en termes de vitesse de flamme. Seules les données obtenues en termes de surpression sont mentionnées dans la littérature.

Grune et al. (2003) ont effectué des séries d'expériences concernant l'obtention de l'accélération d'une flamme non confinée à travers une zone obstruée. Le dispositif expérimental se compose d'un cube de côté 0,55 m. Une étincelle électrique est utilisée pour amorcer un mélange stœchiométrique hydrogène-air. Pour créer de l'obstruction, un système de couche d'obstacles (sorte de grillage) est placé à l'intérieur du cube (figure 1.16). Les tailles de maille testées dans les expériences effectuées sont de 40 mm, 13 mm et 6,5 mm ; et les diamètres de grillage sont de 4 mm, 1 mm et 0,65 mm. Les nombres de couches de grillage testés sont de 4, 8, 12, 24 et 48.



Figure 1.16 : Dispositif expérimental de Grune et al. (2003).

Dans le cas où 48 couches de grillages de taille de maille de 6,5 mm sont positionnées dans le dispositif expérimental, la vitesse de flamme atteint 700 m/s en 0,2 m. Une transition déflagration détonation s'est produite, mais à l'extérieur du volume initial du cube. Seules les vitesses de flamme sont mentionnées dans cette étude, car il est mentionné dans la suite, ces expériences ont servies de base à l'établissement de la formule de Grune et al. (2003) sur les vitesses de flamme. Ces

expériences ne seront donc par la suite pas comparées aux modèles de la littérature sur le calcul de la vitesse de flamme.

1.3.1.2 Vitesses de flamme obtenues lors d'explosions de mélange hydrogène-air

o Les différents modèles de calcul de la vitesse de flamme

Le but de notre étude est d'étudier l'explosion d'un mélange hydrogène-air dans un milieu pouvant être notamment obstrué. Il est donc fondamental d'analyser les modèles de vitesses prenant en compte un champ d'obstacles et plus particulièrement pour le cas de l'hydrogène qui est un gaz très réactif. Les deux modèles explicités ci-dessous ont ainsi été sélectionnés.

Dorofeev (2007) a élaboré une expression permettant de calculer la vitesse de flamme pour le cas d'une déflagration d'un mélange hydrogène-air dans des zones obstruées. Cette approche se base sur l'évolution de l'aire de la flamme, la vitesse de combustion laminaire et le rapport des densités entre réactifs et produits. L'hypothèse de départ précise que la géométrie de base de la flamme est de type sphérique se propageant dans une zone obstruée. Les obstacles présents dans cette zone vont servir à créer la turbulence nécessaire à l'augmentation de la surface de flamme et donc de la vitesse de flamme. L'expression établie tient compte de certaines caractéristiques de la zone obstruée comme la taille caractéristique des obstacles présents (par exemple le diamètre pour un cylindre) et la distance entre les obstacles. Le type de géométrie d'obstacles envisagé représente un motif se répétant jusqu'à une certaine distance R . Les différentes étapes permettant d'obtenir cette expression sont données en annexe 2.

$$V_F = a^2 \times b \times \sigma \times (\sigma - 1) \times S_L \times \left(1 + \frac{4}{3} \times \frac{\sigma y}{x} \times \frac{R^\alpha}{(\sigma x)^\alpha} \right)^2 \times \left(\frac{L_T}{\delta} \right)^{1/3} \quad (1.8)$$

Où : a, b et α - constantes - (-)

σ - rapport des densités entre produits et réactifs - (-)

S_L - vitesse de combustion laminaire - m/s

y - taille caractéristique des obstacles - m

x - distance entre obstacle (centre à centre)- m

R - distance de fin de champ d'obstacles - m

L_T - échelle de turbulence - m

δ - épaisseur de flamme (viscosité cinématique / vitesse laminaire de flamme)- m

Dorofeev (2007) considère le paramètre L_T équivalent à R dans tous les cas. Les constantes a, b et α ont pu être déterminées grâce à des données expérimentales concernant la vitesse de flamme observée dans des zones obstruées et non obstruées (Grune et al. (2003), Pierorazio et al. (2004), Groethe et al. (2004), Geisbrecht et al. (1981), Schneider et al. (1983) et Molkov et al. (2005)). Les valeurs de ces constantes sont donc : $a^2b = 0,0085$ et $\alpha = 0,63$. Cette formule est valable uniquement pour des flammes visibles ($V_f < 500$ m/s).

Au vu de la formule donnée par Dorofeev (2007), il apparaît que pour une taille d'obstacles donnée (y), si la distance entre obstacles (x) augmente alors la vitesse de flamme diminue.

La vitesse maximale de flamme ainsi obtenue permet d'obtenir la pression et l'impulsion maximales. La surpression maximale P et l'impulsion maximale I sont calculées en fonction de la distance R de la source d'amorçage en fonction des paramètres réduits de Sach's $\bar{R}$, $\bar{P}$ et $\bar{I}$.

$$\bar{R} = \frac{R \times P_0^{1/3}}{E^{1/3}} \quad \bar{P} = \frac{P}{P_0} \quad \bar{I} = \frac{I \times a_0}{E^{1/3} \times P_0^{1/3}} \quad (1.9, 1.10 \text{ et } 1.11)$$

Où : E - l'énergie de l'explosion - J

P₀ - la pression atmosphérique - Pa

a₀ - la vitesse du son dans le milieu ambiant - m/s

Le système d'équations établi pour le calcul de la surpression et de l'impulsion se base sur les travaux de Dorofeev (1995). La série d'équations 1.14 et 1.15 (Dorofeev et al. 1993) est obtenue via la constatation qu'une détonation gazeuse est du même ordre de grandeur qu'une explosion provoquée par un explosif. La série d'équations 1.16 et 1.17 a été définie pour des déflagrations non confinées, où la vitesse de flamme joue un rôle important dans le processus d'obtention de la surpression. L'évolution de la surpression maximale et de l'impulsion en fonction de la vitesse de flamme a pu être obtenue en appliquant une approximation quasi-acoustique aux résultats disponibles dans la littérature.

$$\bar{P} = \min(\bar{P}_1, \bar{P}_2) \quad \bar{I} = \min(\bar{I}_1, \bar{I}_2) \quad (1.12 \text{ et } 1.13)$$

$$P_1 = \frac{0,34}{\bar{R}^{(4/3)}} + \frac{0,062}{\bar{R}^2} + \frac{0,0033}{\bar{R}^3} \quad I_1 = \frac{0,0353}{\bar{R}^{0,968}} \quad (1.14 \text{ et } 1.15)$$

$$P_2 = \frac{V_f^2}{a_0^2} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{\bar{R}} - \frac{0,14}{\bar{R}^2} \right) \quad (1.16)$$

$$I_2 = \frac{V_f}{a_0} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(1 - 0,4 \frac{V_f}{a_0} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(\frac{0,06}{\bar{R}} + \frac{0,04}{\bar{R}^2} - \frac{0,0025}{\bar{R}^3} \right) \quad (1.17)$$

Les relations données ci-dessus sont applicables dans la plage de données suivantes : $0,33 < \bar{R} < 3,77$.

Une expression différente de la vitesse de flamme basée sur le nombre de couches d'obstacles et leur taille a été formulée par Grune et al. (2003) à partir des expériences décrites dans le précédent paragraphe. Les constations faites à l'issue de ces tests sont :

- o L'augmentation de la vitesse de flamme avec le nombre de grilles,
- o L'augmentation de la vitesse de flamme avec la diminution de la taille de maille.

Grune et al. (2003) ont alors exprimé la vitesse de flamme comme suit :

$$V_F = k \times \sigma \times S_T \times \left(1 + \frac{(n-1) \times n \times (2n-1)}{6} \times \frac{\Delta^2}{(dx/2)^2} \right) \quad (1.18)$$

Où : k - une constante (non définie par les auteurs et définie à 0,05) - (-)

σ - rapport des densités entre produits et réactifs - (-)

S_T - vitesse de combustion turbulente ($10 \times S_L$ – Bradley et al. (1996)) - (m/s)

n - nombre de couches de grillages traversées par la flamme - (-)

Δ - distance entre les couches (bord à bord) - m

dx - taille de maille – m

La constante k est obtenue en traçant une droite moyenne passant par les points expérimentaux donnés par les auteurs.

Contrairement à la l'expression de Dorofeev (2007), pour une taille de maille (dx), si la distance entre obstacles (Δ) augmente alors la vitesse de flamme augmente. La conclusion établie concernant les deux relations sur la vitesse de flamme citées ci-

dessus peut paraître contradictoire en sachant que les expériences de Grune et al. (2003) ont été prises comme référence dans chacun des deux travaux.

o Calcul de la vitesse de flamme pour les expériences de la littérature

Comme il a été montré dans l'analyse des articles de la littérature (Royle et al. (2007), Shirvill et al. (2007) et Groethe et al. (2007)), aucun des travaux sélectionnés en milieu obstrué ne donne d'indications sur les mesures de vitesses de flamme dans les articles parus. Cependant, dans les travaux de Royle et al. (2007), les auteurs obtiennent une détonation dans le cas du mélange hydrogène-air à la stœchiométrie. Les modèles précédemment exposés seront donc appliqués aux expériences de la littérature.

Pour appliquer les relations de Dorofeev (2007) et Grune et al. (2003), il est nécessaire de connaître :

- o le nombre de couches d'obstacles,
- o la taille caractérisant l'obstacle ou la taille de maille,
- o l'espace entre les obstacles (pris de centre à centre).

Ces contraintes font que seule l'expression de Dorofeev (2007), est applicable aux expériences de la littérature de Royle et al. (2007) et Groethe et al. (2007). Le tableau 1.1 récapitule les résultats obtenus avec les caractéristiques prises pour l'application de la formule de Dorofeev.

	y (m)	x (m)	R (m)	a ² b	α	σ	S _L (m/s)	δ (m)	V _F (m/s)
Royle et al. (2007)	0,026	0,125	1,5	0,0085	0,63	6,86	2,14	$\sim 10^{-5}$	529,71
Groethe et al. (2007)	0,46	0,8	2,13	0,0085	0,63	6,86	2,14	$\sim 10^{-5}$	Hors domaine

Tableau 1.1 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application de la relation de Dorofeev (2007) et des vitesses de flamme obtenues.

Dans le cas des expériences de Groethe et al. (2007), la valeur de vitesse de flamme obtenue avec la formule de Dorofeev (2007) est supérieure à 1000 m/s ce qui est hors du domaine de validité de la relation ($V_F < 500$ m/s). Ceci est contradictoire avec les résultats obtenus dans les expériences de Groethe et al. (2007) qui n'aboutissaient pas à d'importantes valeurs de la pression. En revanche dans le cas des expériences de Royle et al. (2007), le modèle paraît donner une bonne approximation en obtenant une vitesse de flamme maximale de 529,71 m/s supérieure à la vitesse du son (409 m/s pour le cas d'un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie).

Il apparaît donc que l'ajout d'obstacles dans un nuage de gaz inflammables entraîne une augmentation de la surpression et de la vitesse de flamme significative, voire une transition déflagration détonation. Cependant les modèles disponibles dans la littérature concernant le calcul de la surpression maximale et de la vitesse de flamme sont peu nombreux et faiblement validés.

1.4 La propagation de flamme en milieu semi-confiné

Dans ce paragraphe nous allons nous intéresser aux cas des explosions confinées et plus particulièrement aux effets d'évent. La littérature concernant les effets d'explosion en présence d'évent pour des gaz denses ou pour la poussière est très riche. L'état de l'art est ici limité au cas d'explosion de mélange hydrogène-air en présence d'évent.

1.4.1 Le processus d'explosion avec présence d'évent

Quand une explosion se produit dans un espace ouvert, le volume de gaz brûlés peut se propager librement dans tout l'espace environnant. Dans le cas d'une explosion en milieu confiné (figure 1.17), le gaz brûlé reste dans l'enceinte de confinement entraînant une compression des gaz non brûlés et le début de l'augmentation de la pression dans l'enceinte (phase A) jusqu'à atteindre la valeur seuil de pression d'ouverture de l'évent P_1 (phase B).

A ce moment (rupture de l'évent), les gaz frais peuvent sortir de l'enceinte de confinement. Si le taux de production des gaz brûlés est supérieur au taux de perte des gaz non brûlés et brûlés passant à travers l'évent, la pression augmente jusqu'à ce que le front de flamme atteigne l'évent (phase C). La ventilation de l'enceinte par le phénomène de sortie des gaz frais due à la rupture de l'évent entraîne un plissement de la flamme et l'apparition de turbulence qui augmente le taux de combustion et donc augmente l'amplitude du second pic de pression P_2 . De plus, l'explosion externe, due à la présence des gaz non brûlés à l'extérieur de l'enceinte peut générer une onde de pression se propageant vers l'intérieur de l'enceinte et contribuant à atteindre la valeur maximum de P_2 .

La diminution de la pression après le second pic correspond à la fin de la combustion à l'intérieur de l'enceinte et l'écoulement des gaz brûlés en dehors de l'enceinte (phase D).

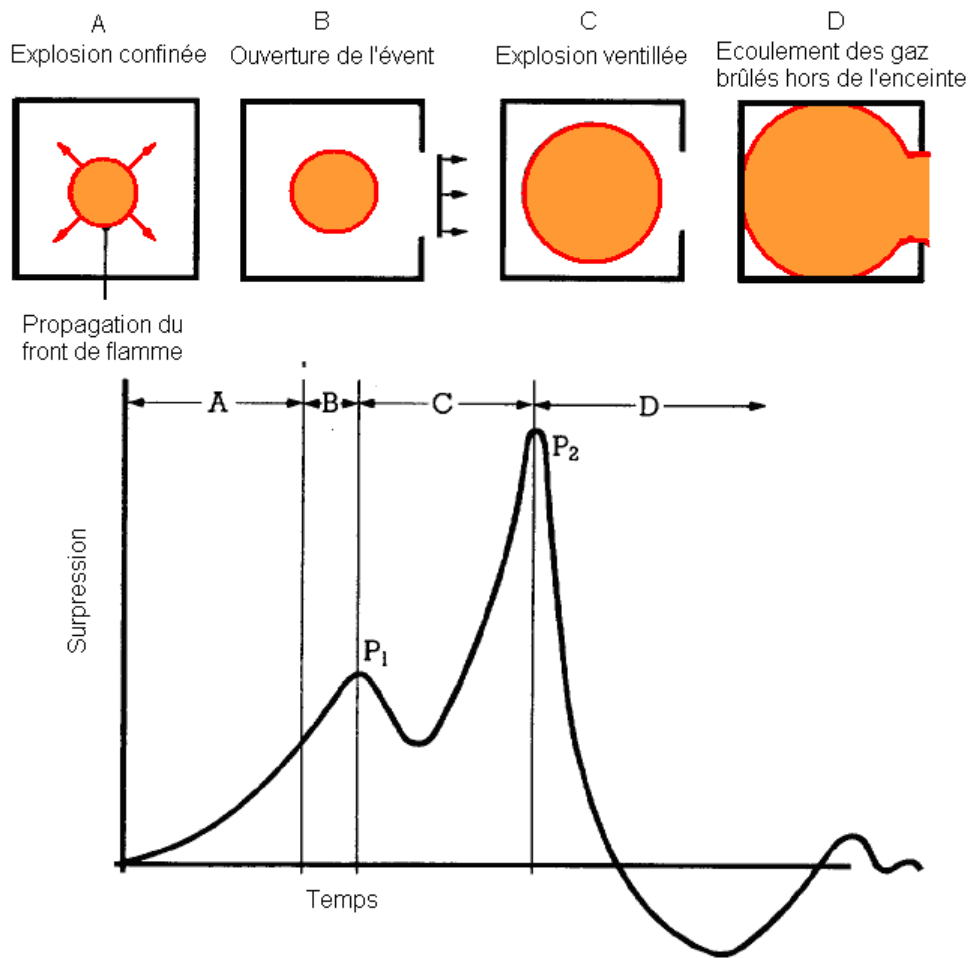


Figure 1.17 : Schéma du processus d'explosion en présence d'évent.

Durant la phase C schématisée sur la figure 1.18, une partie des gaz frais présents dans l'enceinte est poussée à l'extérieur de l'enceinte à travers la surface d'évent. Ces gaz non brûlés forment un nuage turbulent à l'extérieur de l'enceinte qui est ensuite rejoint par la flamme et brûle en générant une explosion externe.

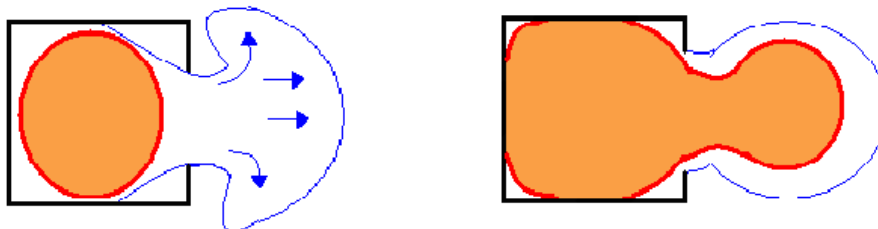


Figure 1.18 : Développement de l'explosion externe.

Comme nous l'avons vu pour le cas des tubes, la présence d'obstacles dans l'enceinte va engendrer plus de turbulence et donc la surpression sera plus grande que dans une enceinte vide. Des expériences récentes ont été menées en vue de prendre en considération la présence d'obstacles dans le processus d'explosion en présence d'évent. L'un des principaux effets de la présence d'obstacles consiste en la diminution voire la surpression du second pic de pression (P2) (Chao et al. (2010), Bauwens et al. (2010)) et l'augmentation de P1.

1.4.2 Les modèles de calcul de la pression dans des cas d'événements et la littérature

De nombreuses expériences ont été menées dans le cas d'explosion en présence d'évent pour les combustibles classiques (CH_4 , C_3H_8). Cependant, peu de ces études concernent des combustibles très réactifs comme l'hydrogène. Le tableau suivant (tableau 1.2) récapitule les expériences menées dans le cas d'explosions avec événements pour le cas de mélange hydrogène-air. Une brève description des expériences est reportée ci-dessous, et les surpressions sont récapitulées avant d'être commentées :

- o Les travaux de Pasman et al. (1974) ont été effectués dans une enceinte sphérique de $0,95 \text{ m}^3$ (allumage central) avec deux surfaces possibles d'événements $0,3 \text{ m}^2$ et $0,2 \text{ m}^2$ ayant respectivement des pressions d'ouverture de 13,5 kPa et de 7,5 kPa.
- o Kumar et al. (1989) ont mené des séries d'expériences dans une enceinte sphérique de diamètre 2,3 m reliée à une canalisation (diamètre 450 mm et longueur 3 m), pouvant accueillir trois surfaces d'événements (0,02, 0,05 et $0,16 \text{ m}^2$). Trois positions pour l'amorçage du mélange ont été testées : au centre de l'enceinte, près de l'évent et vers la fin de la canalisation. Dans le cadre de l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, seules les surpressions inférieures à 1 bar (destruction importante des bâtiments) sont prises en compte.

- o Bauwens et al. (2010) ont réalisé des séries d'expériences en présence d'évent (2,7 ou 4,5 m²) dans une enceinte de 63,7 m³ (4,6 x 4,6 x 3 m). Deux positions d'amorçage sont testées : la première au centre de l'enceinte et la deuxième sur le mur opposé à l'évent.
- o Chao et al. (2010) ont mené des séries d'expériences pour des mélanges méthane-air et hydrogène-air à 18 % dans une enceinte cubique de 63,7 m³ (4,6 x 4,6 x 3 m) avec un événement de surface 5,4 m² positionné sur un mur de l'enceinte. Huit obstacles (0,4 x 0,4 x 3 m) sont insérés dans l'enceinte de confinement de façon à créer deux îlots de quatre obstacles.

Auteurs	Volume de gaz (m ³)	Mélange (% H ₂)	Obstacles	Surface d'évent (m ²)	Surpression maximale (kPa)
Pasman et al. (1974)	0,95	30	Non	0,2	125
				0,3	40
Kumar et al. (1989)	6,85	10	Non	0,05	90
				0,16	30
Bauwens et al. (2010)	63,7	18	Non	2,7	31
				5,43	15
Chao et al. (2010)	63,7	18	Oui	5,4	43

Tableau 1.2 : Récapitulatif des caractéristiques utiles pour les effets d'événements et pression maximale obtenue.

Les modèles de calcul des pressions en présence d'événements pour le cas de mélange hydrogène-air sont relativement peu nombreux et récapitulés en annexe 3. Les deux modèles les plus récents et établis pour des cas de mélange hydrogène-air peuvent néanmoins être cités sans entrer dans les détails : les modèles de Molkov et al. (1997 – 2010) et celui recommandé par la norme américaine NFPA 68 (1998) et repris dans la norme européenne EN 14994 (2007). Les formules associées à ces deux modèles sont mentionnées ci-dessous.

o Bartknecht (1993) (NFPA 68 (1998) et EN 14994 (2007)) :

Domaine de validité : $K_g \leq 550 \text{ bar.m/s}$, $0,1 \leq P_v \leq 0,5$, $P_{red} \leq 0,5$ et $1\text{m}^3 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3$.

$$A_v = \left[\frac{0,1265 \log K_g - 0,0567}{P_{red}^{0,5817}} + \frac{0,1754(P_v - 0,1)}{P_{red}^{0,5722}} \right] V^{2/3} \quad (1.19)$$

$$\text{Avec: } K_g = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} . V^{1/3} \quad (1.20)$$

Où : A_v – aire de l'évent – m^2

V – volume de l'enceinte -

p – pression observée dans une enceinte de 20 L pour un mélange hydrogène-air - bar

P_{red} – surpression interne maximale – kPa

P_v – pression d'ouverture de l'évent – kPa

La valeur de K_g utilisée dans ces comparaisons est de 550 bar.m/s^*

o Molkov et al. (1997 – 2010) :

Les équations ci-dessous peuvent être appliquées lorsque les surfaces d'événements sont connues.

$$Br = \frac{A_v}{V^{2/3}} \times \frac{c_0}{S_0 (E_0 - 1)}$$

$$\frac{\chi}{\gamma} = \left[\frac{(1 + e \times V_{\#}^g) \times (1 + 0,5 \times Br^{0,8})}{1 + \pi_v} \right]^{0,4}$$

$$Br_t = \frac{\sqrt{E_0 / \gamma_u}}{\sqrt[3]{36 \times \Pi}} \times \frac{Br}{\chi / \gamma} \quad (1.21, 1.22 \text{ et } 1.23)$$

Où : Br – nombre de Bradley – (-)

Br_t – nombre de Bradley turbulent – (-)

A_v – surface de l'évent – m^2

V – volume de l'enceinte – m^3

c_0 – vitesse du son dans les gaz frais – m/s

S_0 – vitesse de combustion laminaire – m/s

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

e et g – constante (e = 10 et g = 0,33 selon Molkov (2010)) – (-)

$V_{\neq}^g$ - volume de l'enceinte adimensionné ($V / 1 m^3$) – (-)

γ_u – rapport des chaleurs spécifiques – (-)

χ / γ - nombre DOI – (-)

π_v - pression adimensionnée d'ouverture de l'évent – (-)

Une fois le nombre de Bradley turbulent déterminé, Br_t , la pression maximale est déterminée en appliquant les conditions ci-dessous dépendantes du nombre de Bradley turbulent.

$$\text{Si } \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} < 1 \text{ et } Br_t \geq 2, \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} = 5,6 \times Br_t^{-2,5} \quad (1.22)$$

$$\text{Si } \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} \geq 1 \text{ et } Br_t < 2, \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} = 7,9 - 5,8 \times Br_t^{0,25} \quad (1.23)$$

Où : π_{red} - surpression adimensionnée réduite de l'explosion – (-)

π_v - pression adimensionnée d'ouverture de l'évent – (-)

Br_t – nombre de Bradley turbulent – (-)

Une comparaison de la surpression obtenue par ces deux modèles et les résultats de la surpression obtenue dans la littérature (tableau 1.2) pour le cas sans obstacle a été effectuée (figure 1.19). Il ressort qu'aucun des deux modèles n'est en adéquation avec les résultats de la littérature. La moyenne de déviation entre les modèles et les résultats expérimentaux est de 170 % pour le modèle de la norme NFPA 68 et 306 % pour le modèle de Molkov et al. (2010). Ces deux modèles surestiment donc fortement les résultats expérimentaux concernant la pression interne. Ils induisent donc une surestimation de la surpression d'évent nécessaire.

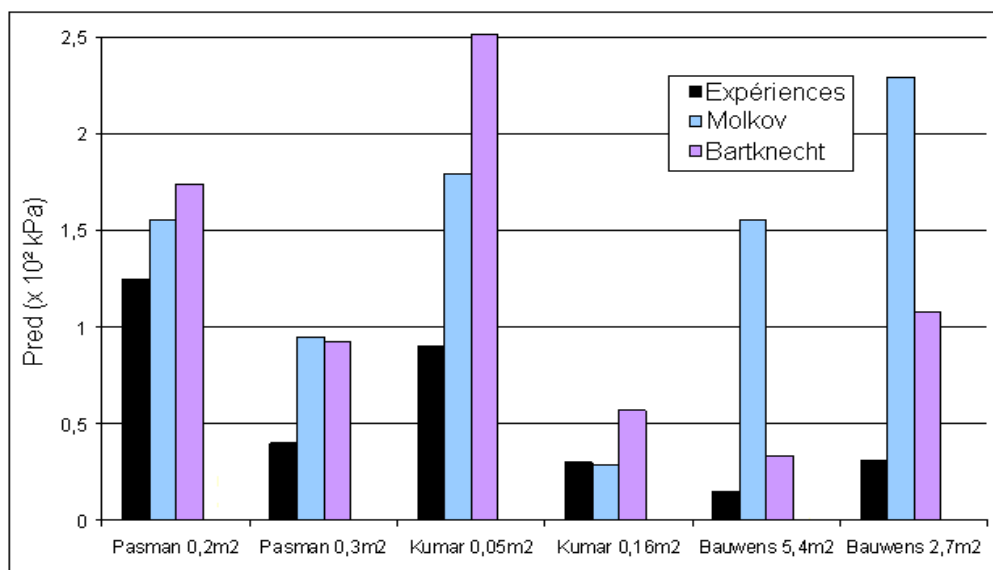


Figure 1.19 : Comparaison des résultats expérimentaux et des résultats par les deux modèles sélectionnés.

1.5 Synthèse

Nous avons donc pu mettre en évidence au cours des paragraphes précédents les points suivants :

- o La littérature et les modèles associés à la compréhension de la propagation des flammes dans des tubes fermés sont présents et validés.
- o Dans les configurations de tube ou couloir semi-confiné en présence d'obstacles, les travaux sont très récents et la compréhension des phénomènes physiques est en cours.
- o La littérature et les modèles associés pour le calcul de la vitesse de flamme dans des cas de mélange hydrogène-air en milieu libre obstrué sont très récents et peu de travaux sont exploitables en totalité faute d'indications détaillées. Les modèles nécessitent d'être validés.
- o En ce qui concerne les explosions à effet d'évents dans le cas de mélange hydrogène-air, l'analyse rejoint celle effectuée pour le cas d'une propagation en milieu obstrué et champ libre, c'est-à-dire, une littérature récente (2010) et des modèles qui doivent encore être calés grâce à l'apport de nouvelles données dans la littérature.

Par conséquent, il en est ressorti que les expériences entreprises faisant l'objet de ce mémoire s'inscrivent dans un domaine où les données sont rares et les modèles en phase d'amélioration. Il est donc apparu intéressant de débiter des expériences à l'échelle du laboratoire pour essayer de mieux comprendre les phénomènes en jeu et d'apporter de nouvelles données dans la littérature qui serviront à améliorer les modèles existants.

CHAPITRE 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les expériences réalisées dans le cadre de cette étude concernent des explosions de mélange uniforme hydrogène-air. Les explosions peuvent être libres ou confinées et/ou obstruées ou non. Le montage expérimental décrit ci-dessous doit nous permettre de :

- o créer un mélange gazeux uniforme dont les caractéristiques sont connues,
- o mesurer les caractéristiques de l'onde de pression consécutive à une déflagration : la surpression positive et le temps d'arrivée de l'onde de pression,
- o mesurer de façon directe la vitesse de flamme,
- o réaliser les expériences en toute sécurité.

2.1 Descriptif général du montage expérimental

Le banc expérimental se compose d'un plateau horizontal en Trespa blanc (1,85 m x 1,32 m x 0,90 m) équipé de différents éléments fixes ou échangeables. Cette table et ces équipements sont décrits plus spécifiquement et représentés schématiquement dans la suite de ce chapitre. La figure 2.1 représente une vue globale du dispositif expérimental.

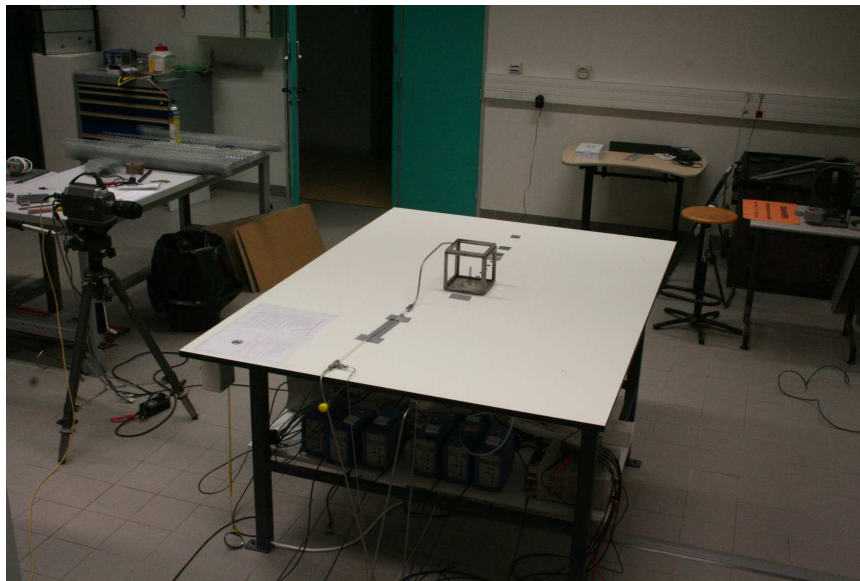


Figure 2.1 : Vue globale du dispositif expérimental.

Pour amorcer le mélange gazeux, un arc électrique est créé entre deux électrodes (espacées de 8 mm) placées dans les différents confinements utilisés et décrits ci-après. Ces électrodes sont reliées à une alimentation basse tension délivrant une énergie nominale de 122,5 mJ. Cette alimentation permet la synchronisation du tir avec le début de l'acquisition des différents signaux. Ces électrodes sont reliées à un coupe circuit permettant de mettre la table en sécurité (circuit électrique ouvert) pendant la création et le remplissage des confinements, et de connecter le système d'amorçage une fois le confinement initial rempli du mélange gazeux.

Une chaîne de mesure (figure 2.2) est composée de 6 capteurs de pression (Kistler 603 B) et de 5 photodiodes disposés suivant la même direction. Une carte d'acquisition (NI PCI – 5105 8 voies) et des amplificateurs de charge (Kistler 5011 B), reliés aux capteurs, permettent de visualiser et d'acquérir les signaux. Pour obtenir une bonne réponse des photodiodes, les essais sont réalisés dans l'obscurité. Une caméra rapide (Phantom V7.3) placée perpendiculairement aux capteurs et photodiodes permet de visualiser le front de flamme.

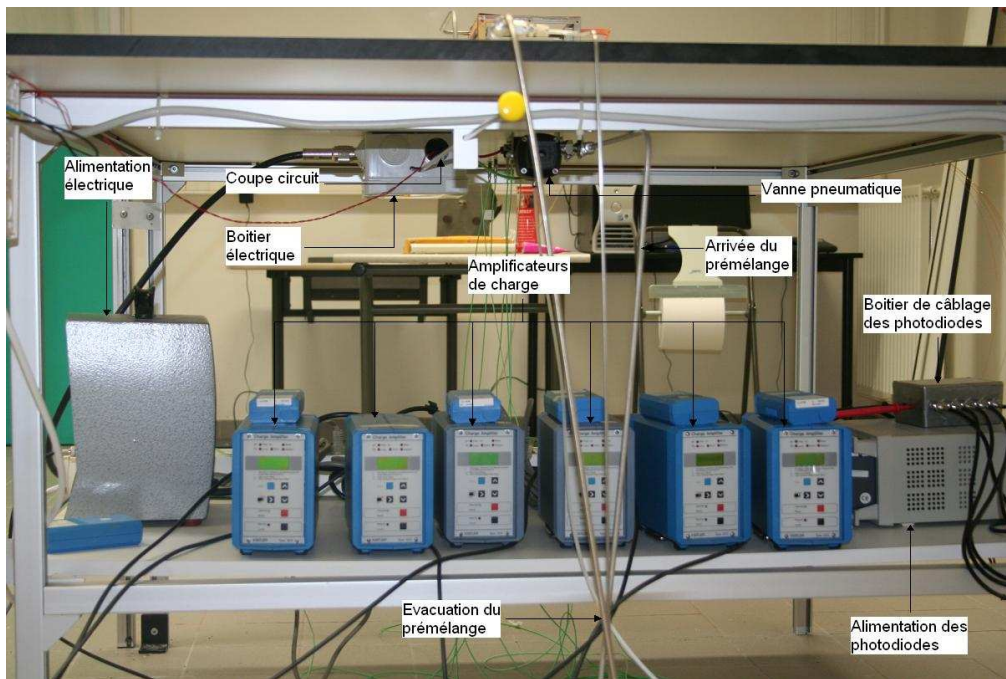


Figure 2.2 : Détail de la chaîne d'acquisition des mesures.

Dans le cas du dispositif avec l'ossature, les fuites de gaz au niveau du confinement sont testées avant chaque remplissage par le mélange gazeux adéquat. Il est important de préciser que l'opérateur est doté d'un bracelet électro-statique relié à la terre tout au long de l'expérience pour pallier au risque de décharge électro-statique. Avant chaque tir, l'opérateur doit se munir des protections auditives adéquates (bouchons d'oreille et casque anti-bruit). Enfin, un voyant rouge relié à une manette coupe circuit nous informe que la source d'amorçage est connectée quand le voyant s'allume et donc que le tir peut se produire.

Le protocole d'utilisation de ce banc expérimental est détaillé dans l'annexe 4.

2.2 Descriptif du montage expérimental sans ossature

2.2.1 La charge hémisphérique

Le mélange gazeux est injecté dans un réservoir tampon en acier inoxydable Swagelok (304L-HDF4-1000) relié au système de débitmètres massiques BROOKS (BROOKS modèle 5850S pour l'air et l'azote, BROOKS modèle MF50S ATEX zone 2 pour l'hydrogène), qui permet d'obtenir le mélange gazeux hydrogène-air dans les proportions souhaitées. La vanne micrométrique Swagelok (SS-SS4-OH-SC11) est alors réglée pour obtenir un débit d'injection du mélange réactif plus petit que celui obtenu avec les débitmètres. Le mélange gazeux ainsi créé est injecté dans une surface circulaire, préalablement imbibée de solution savonneuse, délimitée par un anneau métallique contenant les électrodes en son centre. Une charge hémisphérique contenant les réactifs est ainsi gonflée. Trois rayons d'anneau ont été utilisés, à savoir, 3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm, ce qui a donné trois volumes différents d'hémisphères. Une fois le confinement hémisphérique obtenu (création de la charge hémisphérique), le système de débitmètres est fermé. La charge hémisphérique ainsi créée est isolée des canalisations adjacentes et le tir peut alors se produire.

2.2.2 Le squelette carré

La structure de base se constitue d'une plaque pleine en acier inoxydable de 15 cm x 15 cm et d'épaisseur 2 mm fixée sur le banc de déflagration, où sont placées deux électrodes, l'entrée des gaz (tube de 1/8 de pouce) et la sortie du mélange gazeux (tube de 4 mm de diamètre interne en PVC transparent) reliée à un tube de 1/4 de pouce par une vanne quart de tour et placée à l'extérieure du laboratoire. Sur cette plaque de base, 4 tiges filetées métalliques d'une hauteur de 15,6 cm sont vissées et 2 tiges filetées (longueur de 14,5 cm) sont ensuite placées horizontalement entre les tiges verticales. La figure 2.3 présente une photo de ce montage expérimental. Pour créer un confinement initial au mélange gazeux, la structure est entourée d'un film plastique. Ce film plastique est maintenu par un système de bandes magnétiques jusqu'au déclenchement de l'amorçage. Ce système de bandes magnétiques a été utilisé dans les expériences de Cracknell et al. (2002). Une fois le confinement initial

créé, le mélange gazeux est introduit pendant une durée de 6 min. Le temps mis pour faire un balayage du volume de la boîte est de 1 min, ce qui permet de faire 6 balayages du volume de la boîte et donc d'assurer une bonne homogénéisation du mélange. Tout au long du balayage, la vanne de sortie du mélange gazeux est ouverte pour permettre l'évacuation de l'air présent dans la structure à l'instant initial ainsi que l'évacuation du mélange gazeux poussé par l'arrivée des gaz. Une fois le délai de balayage obtenu, le système de débitmètres ainsi que la vanne de sortie du mélange gazeux sont fermés et le mélange gazeux est prêt à être amorcé.

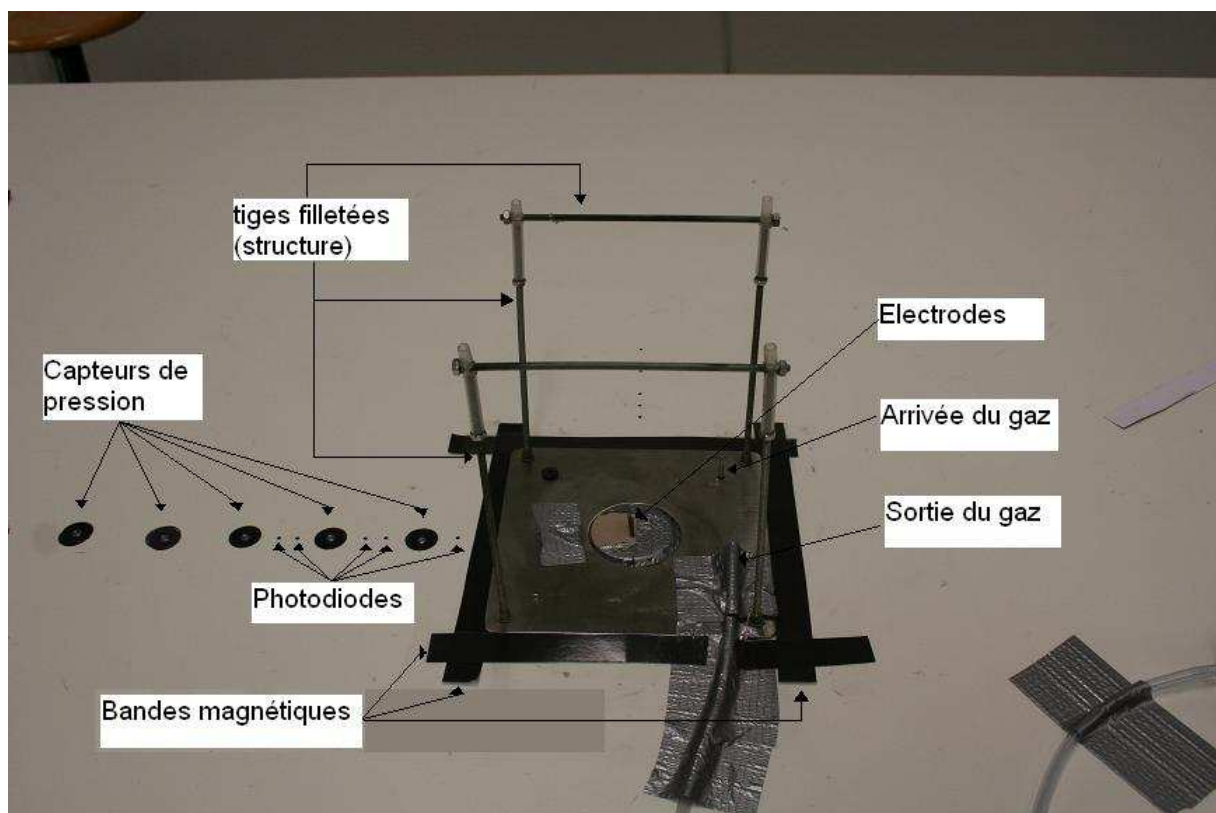


Figure 2.3 : Montage expérimental sans ossature.

2.3 Descriptif du montage expérimental avec ossature

2.3.1 Montage sans confinement

La structure cubique de base pour le confinement initial du mélange gazeux est réalisée en acier inoxydable et est installée sur le banc expérimental. Un jeu de cadres, d'épaisseur 0,5 cm, servant au confinement initial du mélange gazeux est réalisé pour permettre la pose d'un fin film PVC (voir figure 2.4). La base de la structure est composée d'une plaque pleine en acier inoxydable (15 cm x 15 cm avec une épaisseur de 0,5 cm) soudée au cube où sont placées deux électrodes, l'entrée des gaz (tube de 1/8 de pouce) et un capteur de pression. L'épaisseur de la structure est de 0,5 cm, le volume extérieur est de 15 x 15 x 15 cm et le volume intérieur de 14 x 14 x 14 cm. Les quatre côtés de la structure sont ouverts aussi bien que le haut. Le film plastique PVC est « coincé » entre la structure et les cadres pour créer un confinement initial au mélange gazeux. Les cadres sont tenus sur la structure par des vissees de type M3. Les différentes géométries de cadres utilisés sont les suivantes :

- o Deux cadres (perpendiculaire à l'axe des capteurs) ont une longueur de 15 cm, une largeur de 14 cm, deux des bords mesurent 1 cm et les deux autres 0,5 cm.
- o Deux cadres (dans la direction des capteurs) ont une longueur et une largeur de 14 cm, deux des bords mesurent 1 cm et les deux autres 0,5 cm.
- o Le cadre du sommet a une longueur et une largeur de 15 cm et des bords de 1 cm.

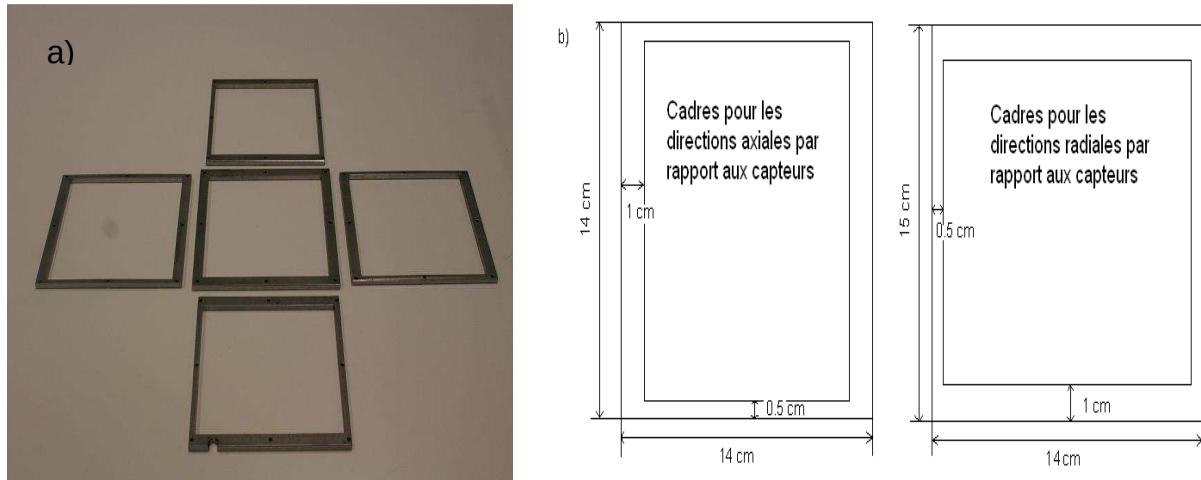


Figure 2.4 : a) Cadres servant à la mise en place du film PVC, b) Détail des côtes et des cadres.

Pour permettre l'homogénéisation du mélange gazeux, un tube de 1/4 de pouce est fixé sur un côté de la structure et relié à l'extérieur de la salle pour l'évacuation du mélange gazeux. La structure ainsi formée forme un VBR (Rapport du Volume de Blocage, c'est-à-dire, la somme du volume de tous les obstacles présents dans la structure sur le volume total de gaz considéré) de 6,9 % (figure 2.5). Le calcul des valeurs du VBR se fait comme suit :

$$VBR (total) = \frac{V (structure)}{V (contenant le gaz)} \quad (2.1)$$

Où : VBR (total) – Volume de Blocage du système en lui-même - %

V(structure) - volume formé par les diapositives et le squelette - cm^3

V(contenant le gaz) – volume de gaz contenu dans la structure - cm^3

Une fois la structure créée, le mélange gazeux est introduit dans l'enceinte selon la procédure décrite précédemment (voir chapitre 2.2.2).

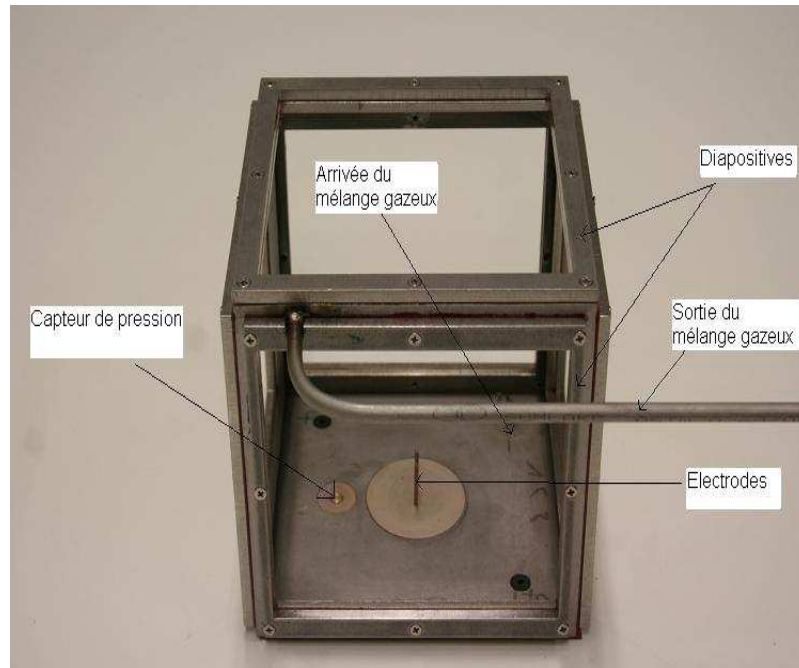


Figure 2.5 : Description de la boîte de confinement initial du mélange gazeux inflammable.

2.3.2 Montage avec confinement

Afin d'étudier l'effet du confinement dans les expériences, une série de plaques pleines en acier inoxydable d'épaisseur 2 mm a été usinée. Ces plaques sont fixées sur l'ossature précédemment décrite à la place des diapositives et permettent de créer différents degrés de confinement.

La face de la structure se trouvant dans l'alignement des capteurs de pression et des photodiodes n'est jamais obstruée pour permettre l'acquisition des signaux de pression.

Les différentes géométries de confinement réalisées sont les suivantes :

- o présence de plaques sur le sommet, les deux côtés et sur l'arrière (PSLA),
- o présence de plaques sur le sommet et les deux côtés (PSL),
- o présence de plaques sur l'arrière et les deux côtés (PAL)
- o présence de plaques sur les deux côtés (PL)
- o présence de plaques uniquement à l'arrière (PA),
- o présence de plaque uniquement sur le sommet (PS).

Le tableau 2.1 récapitule les différentes géométries de confinement.

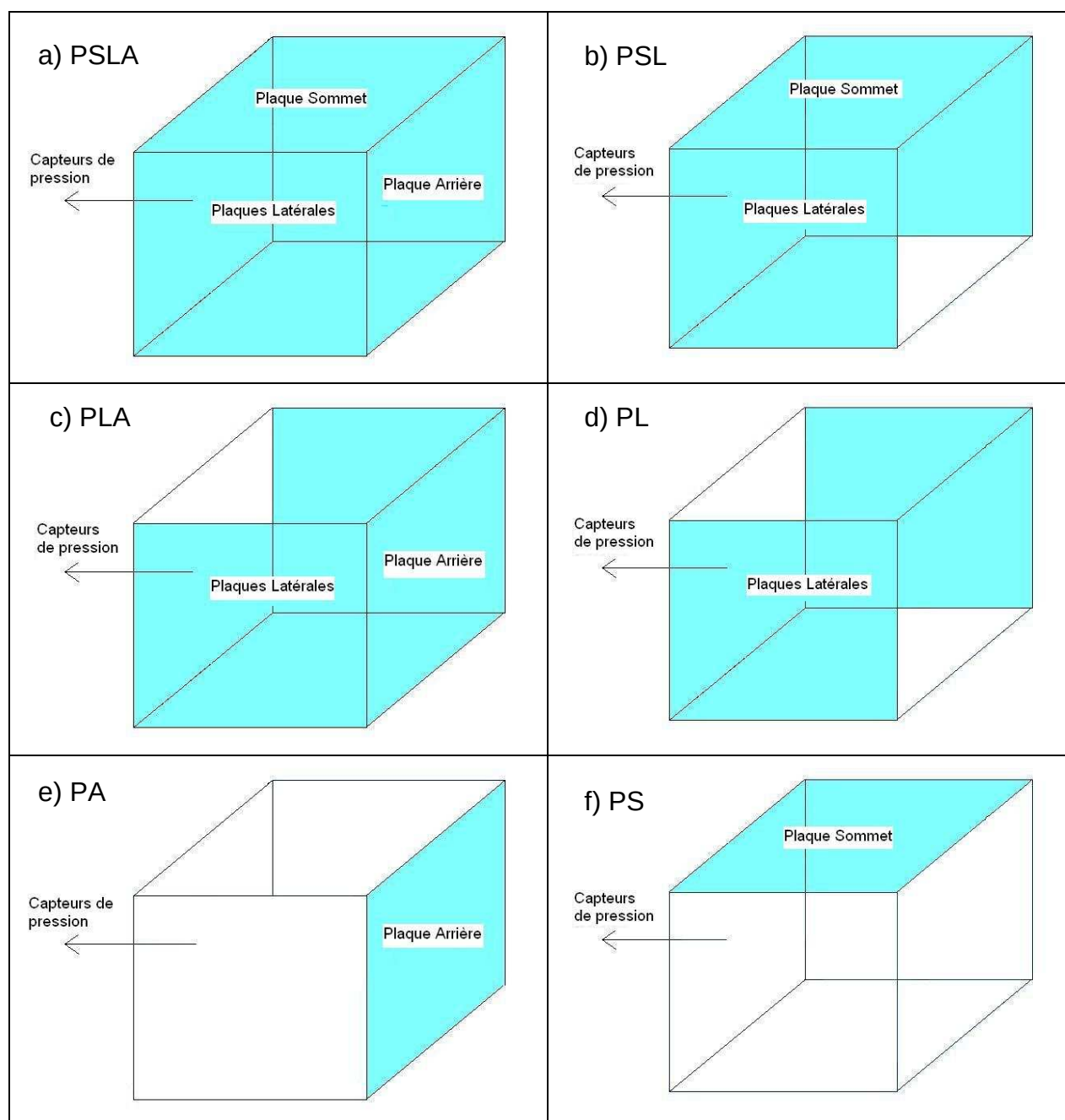


Tableau 2.1 : Description des différents types de confinement étudiés : a) Plaques Sommet Latérales Arrière (PSLA), b) Plaques Sommet Latérales (PSL), c) Plaques Latérales Arrière (PLA), d) Plaques Latérales (PL), e) Plaque Arrière (PA), et f) Plaque Sommet (PS).

2.4 Descriptif des configurations obstruées utilisées

Les structures d'obstacles de type couches sont insérées dans le dispositif de base décrit dans le paragraphe 2.2.2, c'est-à-dire le dispositif « sans ossature ». Seule une configuration obstruée (grilles type G5, croisées et espace entre couche de 4 mm) a été insérée dans le dispositif avec ossature décrit au paragraphe 2.3.1 et 2.3.2 car cette configuration donne l'ABR le plus important. Afin de pouvoir contrôler le positionnement des différentes couches d'obstacles, une géométrie à superposition de couches a été réalisée. En effet, en formant un ensemble de couches (figure 2.6 et figure 2.7), le positionnement de ces dernières a pu être contrôlé. Deux types de positionnements ont été réalisés :

- o toutes les grilles sont alignées (effets « tunnel »),
- o toutes les grilles sont croisées.

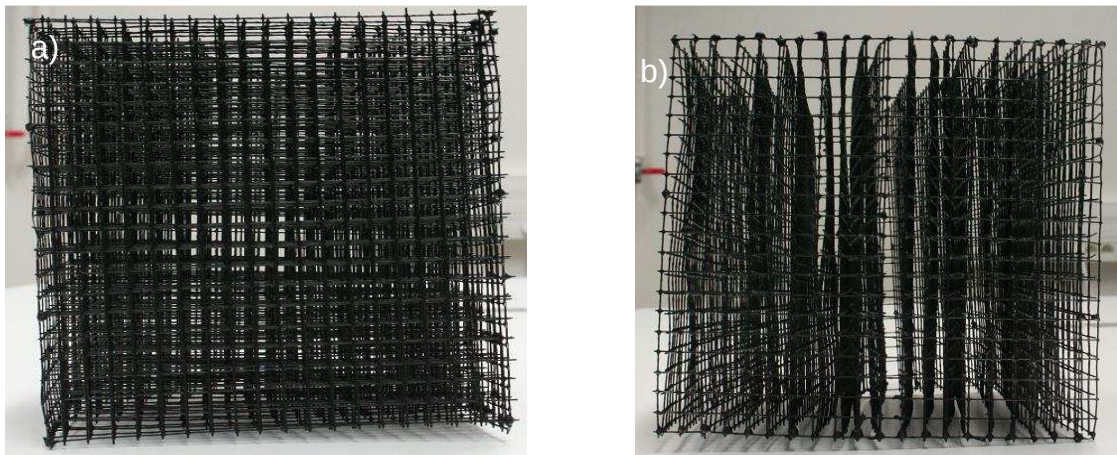


Figure 2.6 : Exemple de structure obstruée dans le cas des grilles de type G2, espacées de 13 mm et alignées : a) vue de face, et b) vue de profil (structure valable pour les grilles de types G1, G2 et G3).

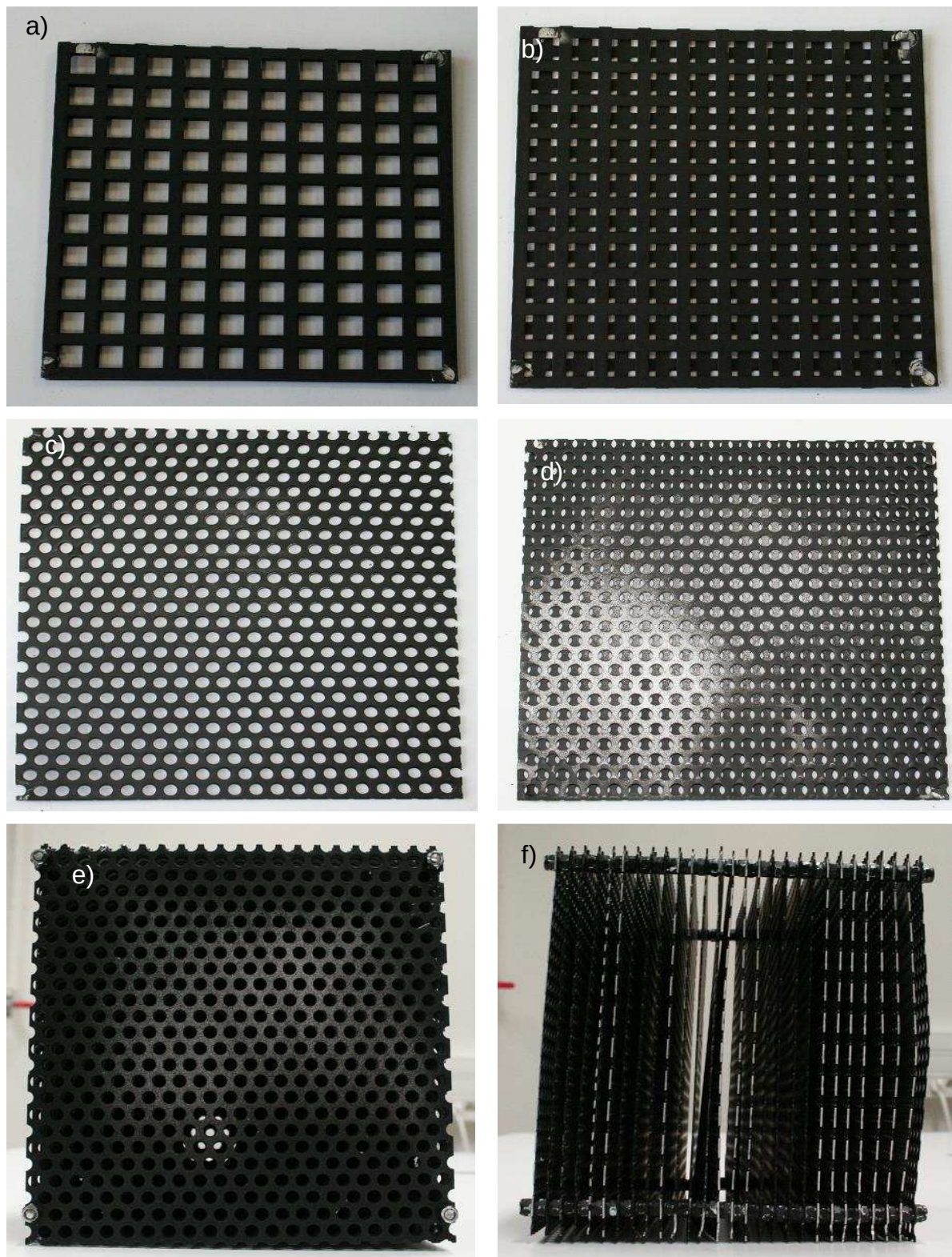


Figure 2.7 : Positionnement des différents type de grilles : a) G4 alignées, b) G4 croisées, c) G5 alignées, d) G5 croisées et exemple de structures obstruées obtenues à partir des grilles de type G5, alignées et espacées de 4 mm (e) vue de face et f) vue de profil).

Les différentes configurations choisies sont récapitulées dans le tableau 2.2 et les figures ci-dessus.

Type de grilles	Diamètres des obstacles (mm)	Position	Espace entre couche (mm)
G1 : mailles carrées de 25 mm x 25 mm	1,5	Alignée	25
G2 : mailles carrées de 13 mm x 13 mm	1	Alignée	13
G3 : mailles carrées de 6,4 mm x 6,4 mm	0,5	Alignée	6,4
G4 : mailles carrées de 8 mm x 8 mm	1 (épaisseur)	Alignée	4 ou 8
		Croisée	4 ou 8
G5* : maille ronde de diamètre 4 mm	1 (épaisseur)	Alignée	4 ou 8
		Croisée*	4* ou 8

Tableau 2.2 : Récapitulatif des différentes configurations obstruées.

Remarque : La configuration notée avec une * est celle employée dans le dispositif avec ossature.

Pour les trois premiers types de grilles (G1, G2 et G3), les dimensions des différentes couches sont de 13 cm x 13 cm. Pour former la structure complète, les différentes couches sont soudées à leurs extrémités à deux couches de mêmes caractéristiques qui permettent d'aligner les différentes couches entre elles (figure 2.6). Dans ces trois configurations, l'espace laissé entre chaque couche est égale à la taille de maille de la grille utilisée. Dans ce cas, l'ABR vaut 13,93 % pour le type de grille G3, 14,59 % pour le type de grille G2 et 11,94 % pour le type de grille G1.

Pour les deux derniers types de grilles (G4 et G5), le type de grille utilisée est légèrement différent. En effet, il s'agit de plaques d'aluminium d'épaisseur 1 mm

découpées aux dimensions souhaitées donc plus rigides que les grilles de type grillage (G1, G2 et G3). Deux séries de plaques sont utilisées, l'une comporte des orifices carrés de 8 mm x 8 mm (G4) et la deuxième a des orifices circulaires de diamètres 4 mm (G5) (voir figure 2.7). Pour ces deux types de grilles, le positionnement aligné et le positionnement croisé ont été étudié (voir figure 2.7). L'espace laissé entre les différentes couches est soit de 4 mm soit de 8 mm. Pour former les différentes structures, un ressort a été utilisé pour insérer les différentes couches de mailles carrées et des tiges filetées avec des écrous ont servi à la configuration avec maille ronde. Pour les grilles de type G4, l'ABR correspondant est de 37,4 % et pour les grilles de type G5 de 41,75 %.

2.5 Description de l'instrumentation relative aux expériences

2.5.1 Préparation du mélange gazeux

La structure cubique est remplie d'un mélange uniforme hydrogène-air à différentes concentrations en hydrogène. L'hydrogène et l'air (air comprimé) sont injectés ensemble grâce à un système de débitmètres massiques (BROOKS modèle 5850S pour l'air et l'azote, BROOKS modèle MF50S ATEX zone 2 pour l'hydrogène) commandé à distance (logiciel Smart Control) qui assure la distribution dans les bonnes quantités de ces deux gaz (voir tableau 2.3 pour les caractéristiques de distribution).

Mélanges	Richesse	Débit d'hydrogène	Débit d'air comprimé
25 %	0,79	0,897 l/min	2,691 l/min
30 %	1	1,077 l/min	2,513 l/min
40 %	1,58	1,435 l/min	2,153 l/min

Tableau 2.3 : Débit des gaz pour les différents mélanges envisagés.

La bouteille d'hydrogène est stockée à l'extérieure du bâtiment et est reliée au système des débitmètres par un tube de diamètre 1/4 de pouce (voir annexe 5 pour les caractéristiques du gaz). Concernant l'air comprimé, nous nous sommes raccordé sur le système d'air comprimé du laboratoire que nous relions à notre système de débitmètres par un tube 1/4 de pouce (voir annexe 5 pour les caractéristiques du gaz). Le mélange obtenu est inséré dans le confinement par un tube de diamètre 1/8 de pouce. Pour assurer l'homogénéité du mélange gazeux, un balayage de la structure est effectué. En raison de la présence du film PVC qui ne doit pas être rompu pendant la phase de balayage, le balayage s'effectue sur une durée de 1 min (soit un débit volumique d'environ $3,6 \text{ l.min}^{-1}$) et est renouvelé six fois. La figure 2.8 représente les différents branchements des débitmètres utilisés.

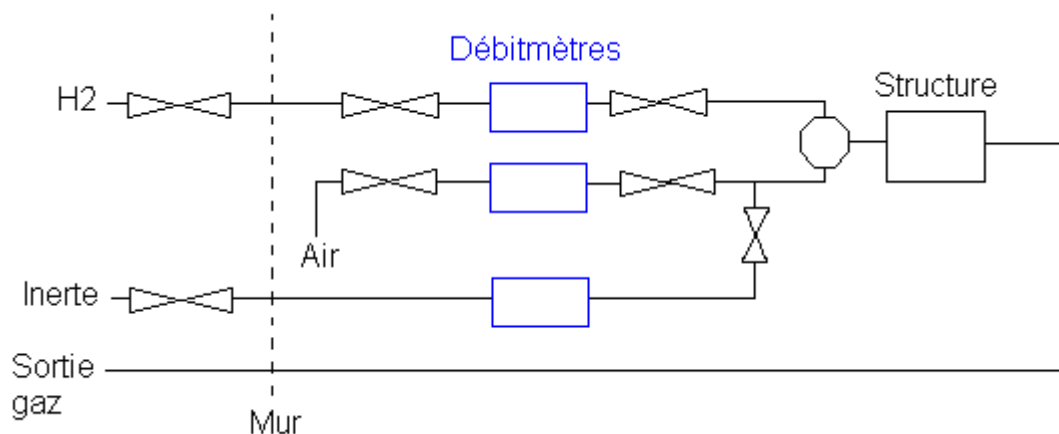


Figure 2.8 : Schéma des branchements des débitmètres massiques.

Lors de l'utilisation du dispositif expérimental avec la charge hémisphérique, un réservoir tampon est inséré entre la sortie du système des débitmètres et l'arrivée du mélange gazeux dans le confinement (figure 2.9). Le réservoir tampon en acier inoxydable 304 L Swagelok (304L-HDF4-1000) a un volume de 1000 cm³ et résiste à une pression de 124 bar. La vanne micrométrique en acier inoxydable Swagelok (SS-SS4-OH-SC11) a un coefficient de débit de 0,004 et tient à une pression de 137 bar.

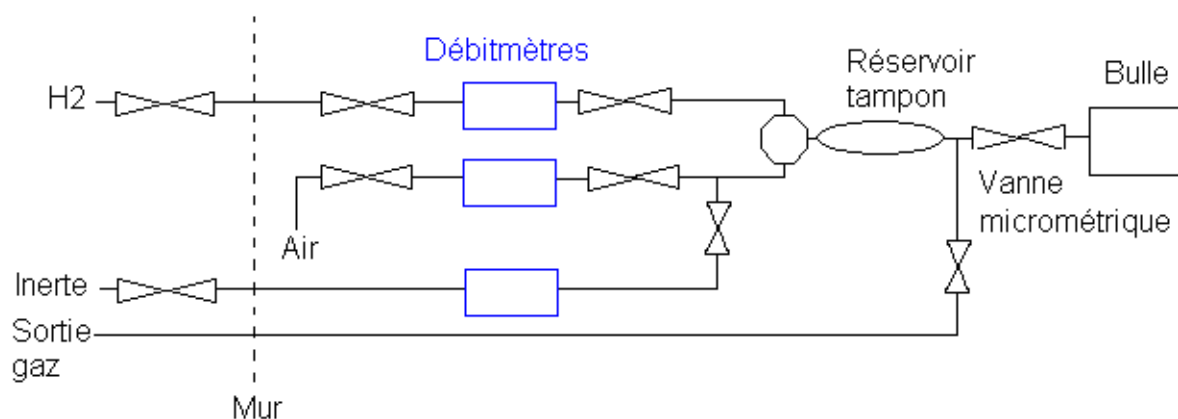
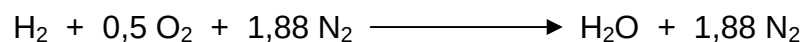


Figure 2.9 : Schéma des branchements des débitmètres massiques pour le montage avec charge hémisphérique.

2.5.2 Propriétés des mélanges utilisés

Le mélange gazeux hydrogène-air est défini à la stoechiométrie par la réaction :



Dans le tableau suivant (tableau 2.4), un bref récapitulatif de ces données est réalisé pour toutes les richesses de mélanges utilisés dans les expériences.

Richesse	n(H ₂) (réactif)	n(O ₂) (réactif)	n(N ₂) (réactif)	n(H ₂ O)	σ (ρ _f / ρ _b)	S _L (m/s)	ΔH _R * (kJ)
0,79	1	0,63	2,37	1	6,30	1,49	-483,6
1	1	0,5	1,88	1	6,86	2,14	-241,8
1,58	1	0,315	1,185	0,63	6,38	2,72	-304,7

Tableau 2.4 : Récapitulatif des données en fonction de la richesse du mélange considérée

Remarque : Les valeurs de σ sont obtenues avec le logiciel Gaseq et les valeurs de S_L proviennent d'un rapport du CEA concernant le projet HYDROMEL (Studer (2007)).

2.5.3 Amorçage

L'amorçage du mélange gazeux s'effectue avec deux électrodes espacées de 0,8 cm et délivrant une énergie nominale de 122,5 mJ. L'énergie électrique nécessaire à l'obtention de l'étincelle est emmagasinée dans un condensateur 2 μF sous une tension de 350 V. Deux positions de la source d'amorçage ont été testées :

- o un amorçage au niveau de la table (c'est-à-dire au niveau du sol),
- o un amorçage en hauteur à 7 cm de la table.

Le système d'amorçage est relié à la centrale d'acquisition et permet de déclencher simultanément l'enregistrement des signaux de pression et de vitesse. Pour remplir les différents confinements utilisés en toute sécurité, le système des électrodes est relié à une manette de sécurité permettant d'ouvrir le circuit électrique pour la phase de remplissage et de le fermer pour la phase d'amorçage.

2.5.4 Acquisition des signaux de pression et de la vitesse

Six capteurs de pression (capteurs piézoélectriques), Kistler 603 B isolés mécaniquement par du caoutchouc (fiche technique en annexe 6), sont positionnés dans l'axe de la source d'amorçage au niveau de la table de la façon suivante :

- o positionnement pour la structure avec ossature : 4, 12, 17, 22, 27 et 32 cm de la source d'amorçage,
- o positionnement sans l'ossature : 12, 17, 22, 27, 32 et 37 cm de la source d'amorçage.

Cinq photodiodes (fiche technique en annexe 6) sont disposées près de la structure et au niveau de la table afin de déterminer la vitesse de propagation de la flamme. Elles sont positionnées à 9,5 cm, 13,5 cm et 15 cm de la source d'amorçage. Par souci de focalisation de la lumière émise par la flamme, les photodiodes sont mises en retrait du bord de la table pour n'émettre un signal qu'à la perpendiculaire de la lumière.

Les six capteurs de pression, raccordés à six amplificateurs de charge Kistler 5011 B (fiche technique en annexe 6), ainsi que les cinq photodiodes sont raccordées à deux cartes d'acquisition (fiche technique en annexe 6) synchronisées pour faciliter l'analyse des résultats. Les cartes comportent chacune 8 voies et ont une résolution de 12 bits et une fréquence d'échantillonnage maximale de 60 Méch.s^{-1} . Le temps d'acquisition totale est fixé à 20 ms (pour pouvoir enregistrer le signal du dernier capteur à 70 cm de la source d'amorçage) et la fréquence à 1 Méch.s^{-1} , ce qui donne un enregistrement de 20000 points.

Enfin, pour compléter ce système d'acquisition (figures 2.10 et 2.11), une caméra rapide (fiche technique en annexe 6) est utilisée pour visualiser le front de flamme. La résolution est fixée à 600 x 800 pixels ce qui permet d'obtenir un champ de vision assez large permettant de voir jusqu'à 2 fois la distance de propagation. La fréquence d'acquisition de la caméra est prise à 6688 images par seconde pour permettre une analyse plus aisée des images. L'acquisition de la vidéo est synchronisée sur le déclenchement du trigger de l'alimentation des électrodes.

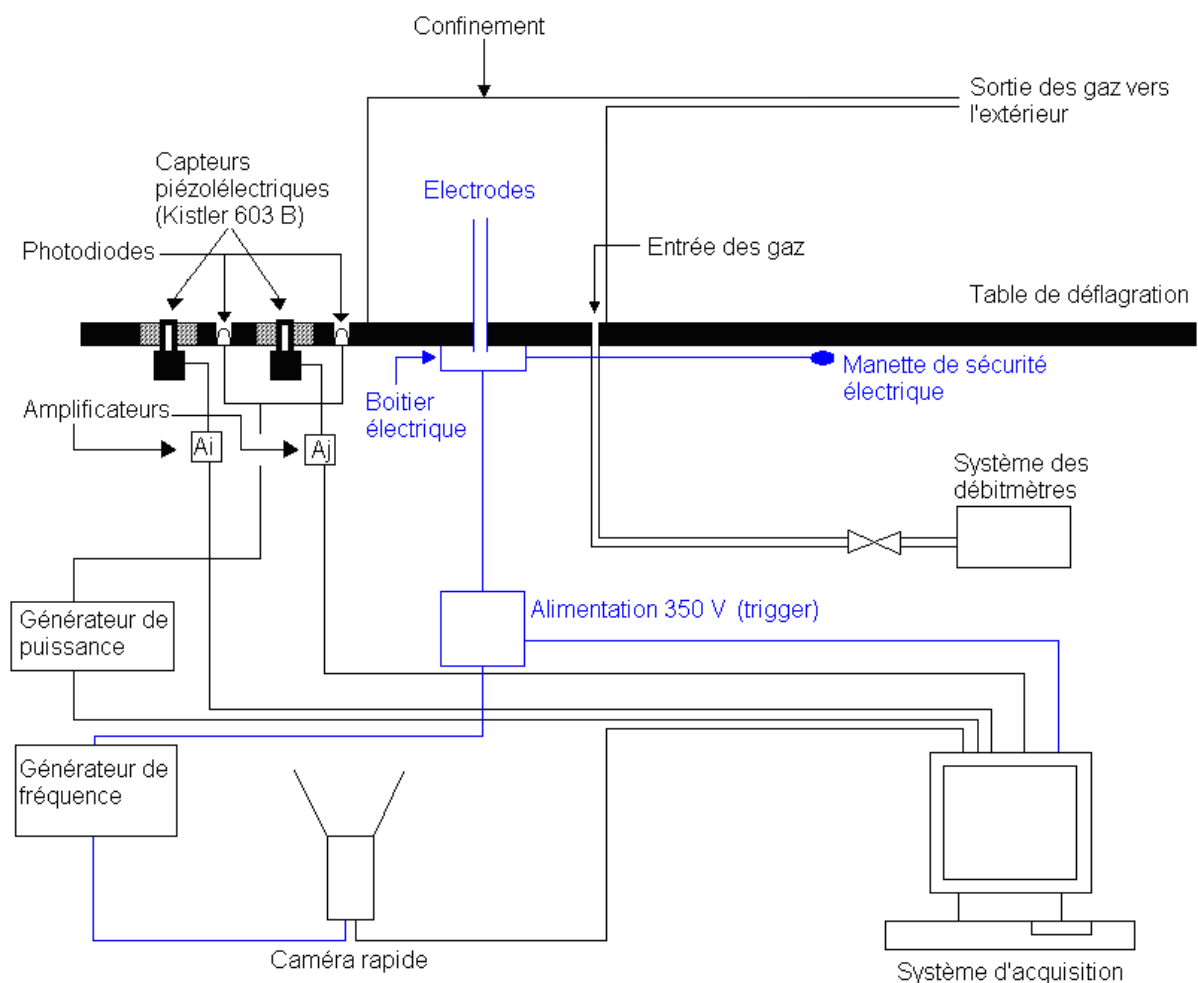


Figure 2.10 : Schéma du dispositif d'acquisition des capteurs de pression, des photodiodes et de la caméra pour les confinements carrés.

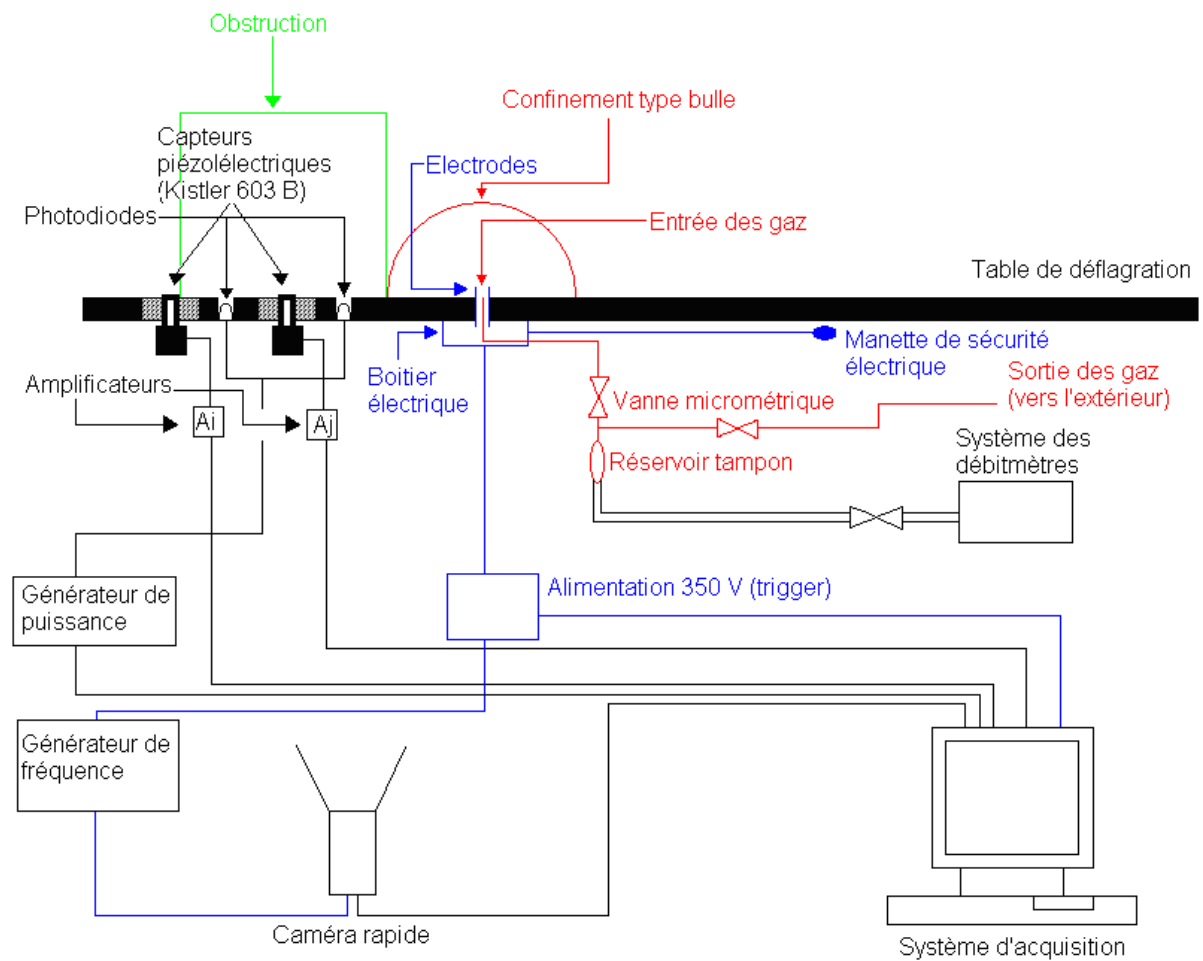


Figure 2.11 : Schéma du dispositif d'acquisition des capteurs de pression, des photodiodes et de la caméra pour le confinement charge hémisphérique.

CHAPITRE 3. PROPAGATION DE FLAMME EN MILIEU OBSTRUE

L'étude expérimentale de la propagation de la flamme en milieu obstrué est menée via les mesures de surpressions maximales induites par l'onde de pression et la vitesse de flamme. Toutes les expériences réalisées et analysées ci-après sont menées dans les conditions normales de pression et de température ($T = 293\text{ K}$ et $P = 101325\text{ Pa}$).

La principale caractéristique de l'onde de pression consécutive à une déflagration exploitée dans cette étude (figure 3.1) est la surpression maximale positive du front de l'onde (P_{max} (kPa)).

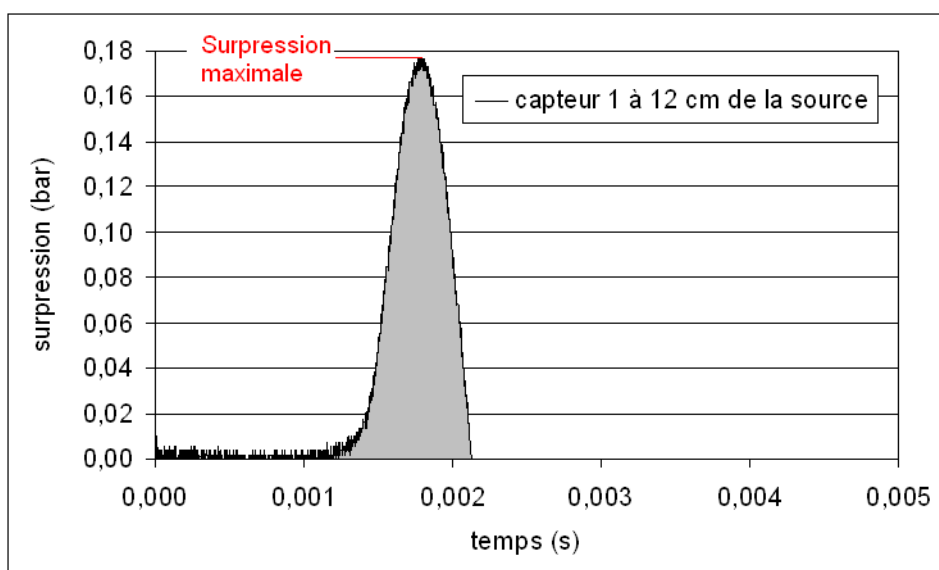


Figure 3.1 : Principales caractéristiques étudiées sur nos signaux (exemple pour le cas d'un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène et les grilles G4 croisées et espacées de 4 mm).

3.1 Processus de dépouillement des résultats

3.1.1 L'onde de pression

La table d'expérimentation est munie de six capteurs de pression piézoélectriques (voir chapitre 2.5.4) dont la face sensible affleure le banc de déflagration répartis selon un axe radial à partir de la source d'amorçage (à 12, 17, 22, 27, 32 et 37 cm). Une fine couche de silicone est déposée sur le face affleurante des capteurs de pression pour les protéger de la chaleur. La figure 3.2 récapitule la disposition des capteurs de pression depuis la source d'amorçage.

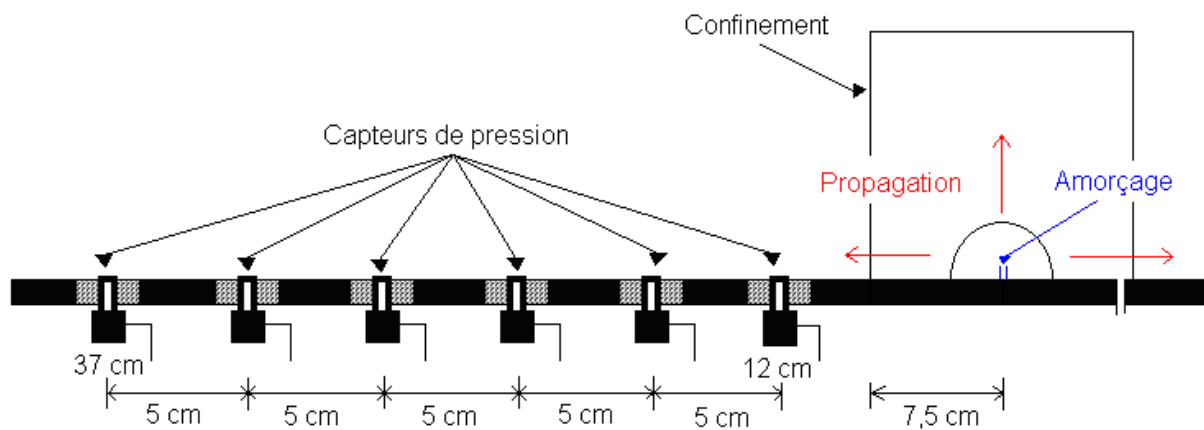


Figure 3.2 : Disposition des capteurs de pression le long de l'axe radial, les électrodes étant l'origine de l'axe.

Ces capteurs de pression permettent de mesurer la pression en champ libre, c'est-à-dire l'onde de choc consécutive à l'explosion du mélange gazeux. Une fois le confinement initial créé (installation du film sur le squelette métallique ou dépôt de la solution aqueuse) et rempli du mélange hydrogène-air dans les proportions souhaitées, une énergie électrique suffisante à l'amorçage de notre mélange est libérée entre les deux électrodes placées au centre du squelette métallique. Cette étincelle va alors allumer le mélange réactif et provoquer une déflagration. L'onde de choc consécutive à la déflagration se propage alors quasi hémisphériquement le long du banc de déflagration. Pour une configuration donnée, les points expérimentaux présentés dans la suite de cette étude sont obtenus en conservant les valeurs de surpression les plus importantes de manière conservative. Les incertitudes (% de

l'écart type sur la moyenne des valeurs obtenues sur 3 à 5 tirs pour chaque capteur) obtenues sur les valeurs de surpression maximale sont d'environ 15 % pour le mélange hydrogène-air à 25 % d'hydrogène, 7 % pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et 5 % pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

3.1.2 La vitesse de flamme

Deux méthodes directes de détermination de la vitesse de flamme ont été appliquées pour obtenir la vitesse de flamme de notre explosion :

- o l'une à partir de l'enregistrement de la caméra,
- o et l'autre à partir des données des photodiodes.

En ce qui concerne la mesure de la vitesse à partir de la caméra, tous les films obtenus ont été analysés avec le logiciel TEMA 3.3. Dans un premier temps, les pixels du film ont été convertis en distance. La structure de grille G1 (taille de maille de 25 mm) a été positionnée comme référence pour être exprimée en termes de pixels. Un facteur de conversion de 0,03053995 cm pour 1 pixel a alors été obtenu. La figure 3.3 donne une image instantanée de la structure de grille G1 avec les points qui nous ont servis de repères.

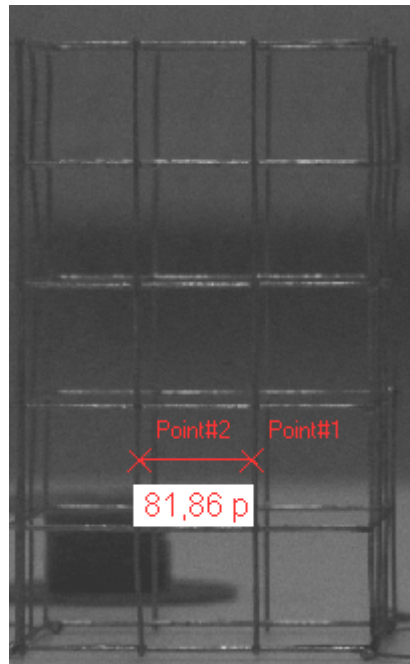


Figure 3.3 : Référence pour convertir les pixels en centimètres.

Dans un second temps, le front de flamme a été suivi en positionnant trois points sur son contour, un point suivant la direction verticale des électrodes (point 2), un autre point suivant la direction horizontale des électrodes (point 1) et un dernier point sur la diagonale des électrodes (point 3) (voir la figure 3.4).

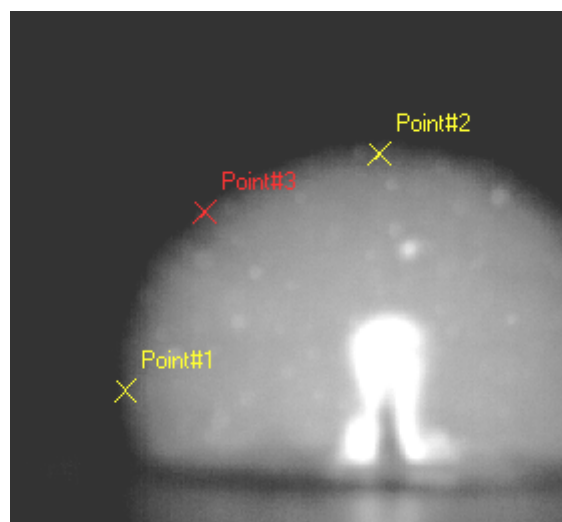


Figure 3.4 : Position des points servant de référence pour le calcul de la vitesse.

Les trois points de suivi sont positionnés, leurs coordonnées (x et y) en fonction du temps sont déterminées (figure 3.5), ce qui permet de vérifier que la propagation de flamme est quasi hémisphérique.

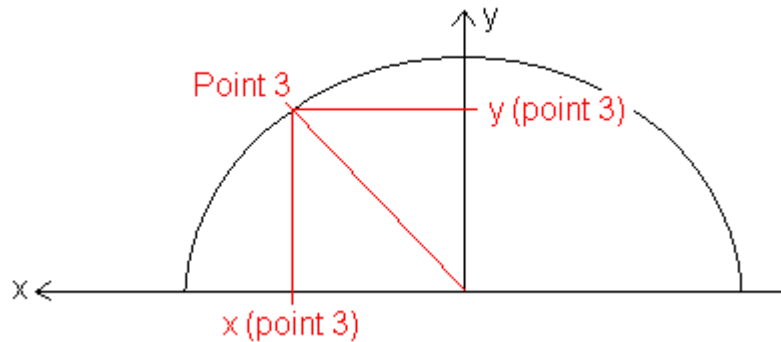


Figure 3.5 : Détermination des coordonnées du point 3.

La figure 3.6 montre un exemple de diagramme de marche obtenu pour le cas sans obstacle et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène sans ossature. Un parfait accord est observé entre la propagation en diagonale et la propagation verticale. Les différences obtenues dans les derniers instants de la propagation sont dues au fait que la flamme parcourt 7,5 cm suivant la direction horizontale avant de sortir du confinement alors qu'en direction verticale elle en parcourt 15 cm. Le point pris en diagonale va sortir du confinement et se retrouver en champ libre plus rapidement que le point pris dans la direction verticale. De plus, vers la fin de l'enregistrement il est assez difficile de distinguer la flamme elle-même du film. Pour le cas de la propagation horizontale, les différences sont dues au dispositif expérimental. En effet, pour permettre le positionnement du film plastique, des bandes magnétiques ont été utilisées (maintient du film plastique pendant le remplissage et jusqu'au moment de l'amorçage) ce qui a provoqué un effet de confinement de la flamme. Il est donc plus difficile de suivre le trajet du point suivant la direction horizontale car le contraste du film n'a pas permis de distinguer le front de flamme du film PVC ou du dispositif de positionnement du film PVC. Il a donc été décidé de considérer uniquement le point pris sur la diagonale et le point pris suivant la direction verticale car moins perturbés par le dispositif expérimental lui-même. A partir de la position du point le long de la diagonale et le long de la direction verticale, les profils de vitesse instantanée et le profil de vitesse moyenne ont été tracés. Cependant, même avec

l'utilisation d'une caméra rapide, la précision de la mesure de la vitesse maximale de flamme, est liée à la fréquence des images : la flamme peut atteindre sa vitesse maximale entre deux images. De plus, l'incertitude du positionnement manuel du point est estimée à 2 pixels. L'incertitude sur les mesures est donc de l'ordre de 4,1 m/s (la caméra est réglée pour acquérir à 6688 images/seconde avec une résolution de 600 x 800 p).

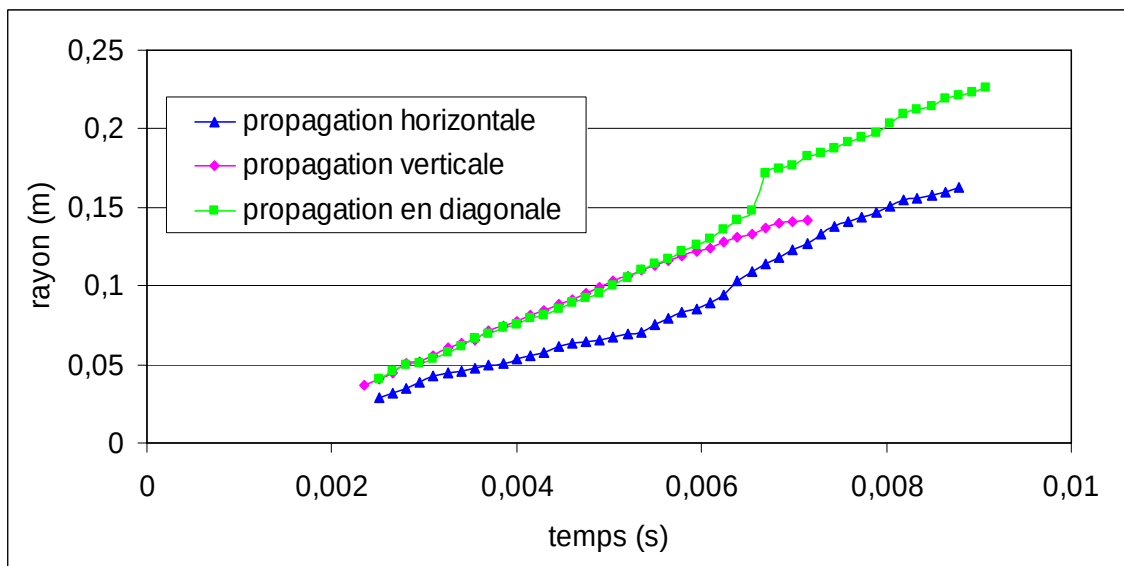


Figure 3.6 : Diagramme de marche pour le cas sans obstacle et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

En ce qui concerne les photodiodes, deux photodiodes ont été placées de part et d'autre du capteur de pression à 12 cm de la source d'amorçage (voir figure 3.7).

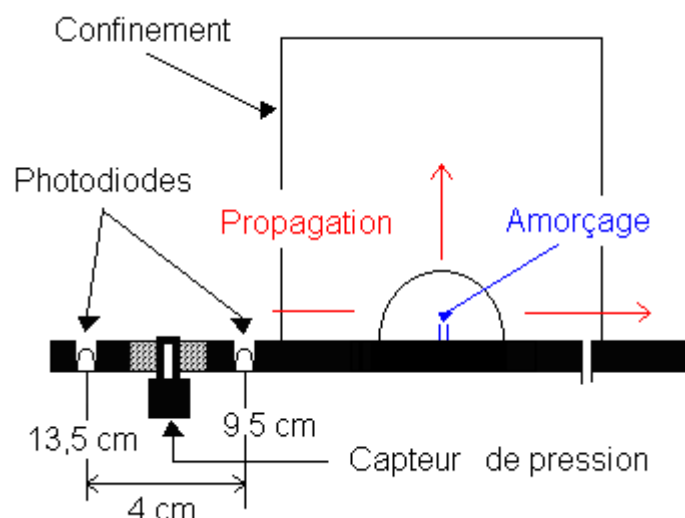


Figure 3.7 : Disposition des photodiodes pour la mesure de la vitesse de flamme.

Ces photodiodes génèrent un signal quand la flamme arrive à la perpendiculaire de leur position. Ce signal permet d'obtenir le temps de passage de flamme à des distances connues (distances de photodiodes : 9,5 cm et 13,5 cm de la source d'amorçage). Pour éviter les perturbations du signal dans le début de l'acquisition (dus à la source d'amorçage) et éviter les phénomènes de saturation des photodiodes, un seuil de référence de 0,02 par rapport au niveau « 0 » a été fixé pour obtenir le temps de passage de la flamme. Les vitesses moyennes à 9,5 cm de et à 13,5 cm de la source d'amorçage ont ainsi été obtenues. Comme pour le cas de la pression, les valeurs de vitesse de flamme obtenues avec les photodiodes correspondent aux valeurs les plus élevées. L'incertitude (% de l'écart type sur la moyenne des valeurs obtenues sur 3 à 5 tirs pour chaque photodiode) relative à ces mesures de vitesse de flamme moyenne est d'environ 3 %. La figure 3.8 montre un exemple d'enregistrement des photodiodes avec le seuil de 0,02.

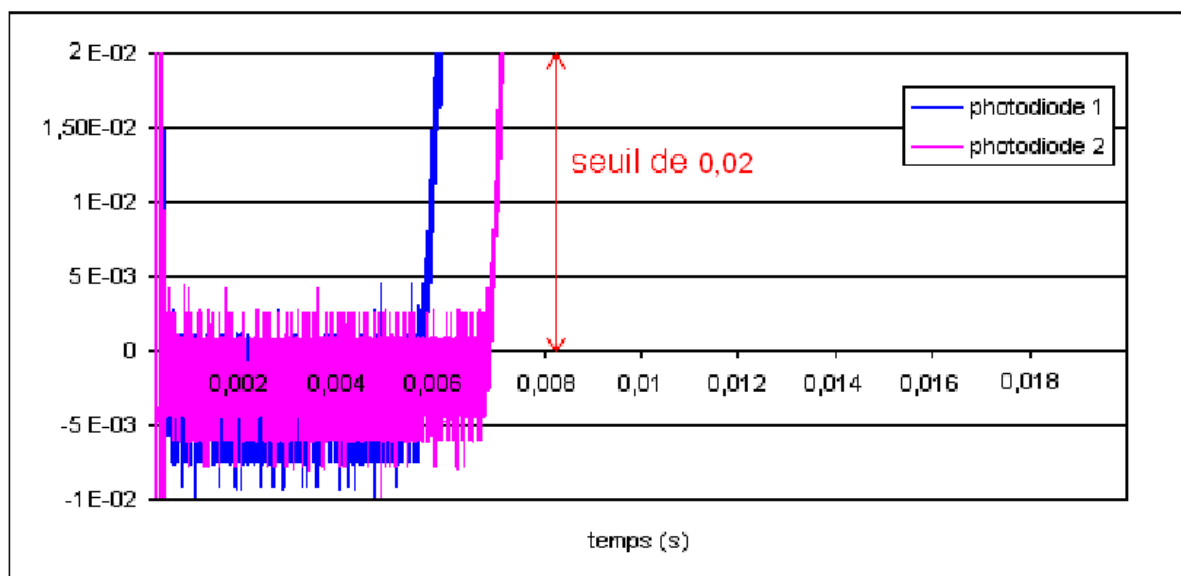


Figure 3.8 : Exemple d'enregistrement de signal des photodiodes dans le cas sans obstacle et mélange à 40 % d'hydrogène.

3.1.3 Rappel des principales caractéristiques des éléments utilisés lors des expériences

Différentes teneurs en hydrogène ont été utilisées dans les expériences réalisées pour étudier l'influence de la réactivité sur la pression et sur la vitesse de flamme. Un bref récapitulatif des différentes caractéristiques des mélanges hydrogène-air utilisés est présenté dans le tableau 3.1 (pour plus de détails sur les mélanges voir le chapitre 2, paragraphe 2.5.2).

% H ₂	Richesse	$\sigma (\rho_f / \rho_b)$	S_L (m/s)
25	0,79	6,30	1,49
30	1	6,86	2,14
40	1,6	6,38	2,72

Tableau 3.1 : Récapitulatif des caractéristiques principales des mélanges gazeux hydrogène-air utilisés (valeurs de S_L tirées du rapport Hydromel).

Enfin, pour analyser l'influence de la présence d'obstacles durant la propagation de la déflagration, des structures constituées de grilles ou de plaques sont introduites dans le squelette. Un bref récapitulatif des structures utilisées est apporté dans le

tableau 3.2 (pour plus de détails sur les différentes structures voir chapitre 2, paragraphes 2.4.2 et 2.4.3).

Dénomination	Géométrie	Tailles de mailles (mm)	Position	ABR (%)	Nbre couches
G1	Maille carrée	25 x 25	Alignées	11,94	3
G2	Maille carrée	13 x 13	Alignées	14,59	6
G3	Maille carrée	6,4 x 6,4	Alignées	13,93	11
G4	Maille carrée	8 x 8	Alignées ou Croisées	37,4	8 ou 14
G5	Maille ronde	4	Alignées ou Croisées	41,75	8 et 14

Tableau 3.2 : Récapitulatif des différentes caractéristiques des structures d'obstacles utilisées dans la suite de l'étude.

Le nombre de couches mentionné dans le tableau ci-dessus est le nombre de couches vu par la flamme lors de sa propagation.

3.2 Expériences basées sur les hémisphères aqueux

Afin de valider le système de visualisation de la vitesse de flamme par la caméra, une première série d'expériences a été réalisées avec une charge hémisphérique (3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm) contenant le mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.

De plus, pour le rayon de 7 cm, des obstacles ont été ajoutés à la limite de l'hémisphère gazeux.

Seuls les signaux de vitesse de flamme provenant de la caméra ont été utilisés. En effet, la sensibilité des capteurs de pression (Kistler 603 B) n'est pas suffisante pour mesurer l'onde de pression consécutive à la déflagration de la charge gazeuse et la luminosité de la flamme est trop faible pour être décelable par les photodiodes. Des microphones à condensateur (Guibert Duplantier (1993)) aurait permis de mesurer le signal de pression.

3.2.1 Sans obstacle

Les enregistrements vidéo (figure 3.9) du front de flamme confirment visuellement une propagation hémisphérique centrée sur la source d'amorçage. Le front de flamme se propage au sein du mélange gazeux combustible jusqu'au bord de la charge hémisphérique (images 1 et 2). Puis, le front de flamme se propage hors du confinement hémisphérique initial pour atteindre un rayon maximal à environ $1,87 \times R_0$ (images 3 et 4). Cette évolution du front de flamme pour un mélange gazeux initialement confiné dans une charge hémisphérique a aussi été mise en évidence par Guibert-Duplantier (1993) pour le cas d'un mélange éthylène-air. Toutefois, le rayon maximal atteint pour le cas d'un mélange éthylène-air ($\alpha = 0,125$) est de $2 \times R_0$ (10 cm pour un rayon de charge hémisphérique initial de 5 cm).

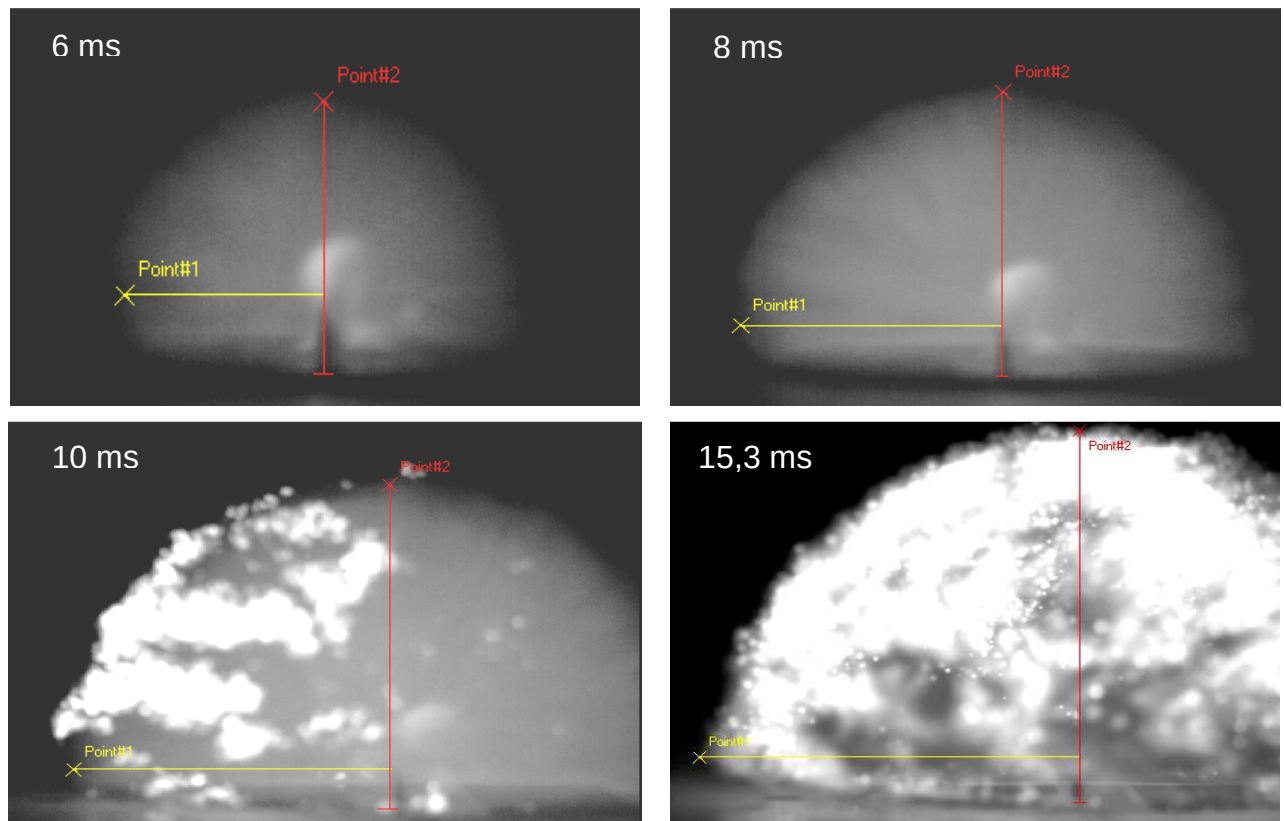


Figure 3.9 : Visualisation de l'évolution du rayon de flamme pour un rayon initial de charge hémisphérique de 8,5 cm (mélange hydrogène-air stœchiométrique) (vitesse d'acquisition de la caméra 6688 images/s et résolution de 600 x 800 p).

La figure 3.10 confirme que la propagation de flamme est bien hémisphérique. En effet, les deux courbes de l'évolution du rayon, suivant la diagonale (courbe verte) et la verticale (courbe rose), en fonction du temps sont quasi identiques pour les charges hémisphériques de rayons 3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm. En ce qui concerne la propagation horizontale (courbe bleue), les valeurs obtenues sont, dans tous les cas, inférieures aux rayons verticaux et diagonaux. L'écart moyen entre les valeurs de rayons horizontaux et de rayons diagonaux est de 2,03 %. Cette différence peut être due au fait que l'hydrogène a un coefficient de diffusion important ($0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$) et a tendance à se disperser rapidement dès que le confinement initial est rompu. De plus, les rayons pris suivant l'horizontale sont influencés par l'effet de sol produit par le banc expérimental. Néanmoins, l'écart entre les valeurs obtenues reste raisonnable (inférieur à 5 %).

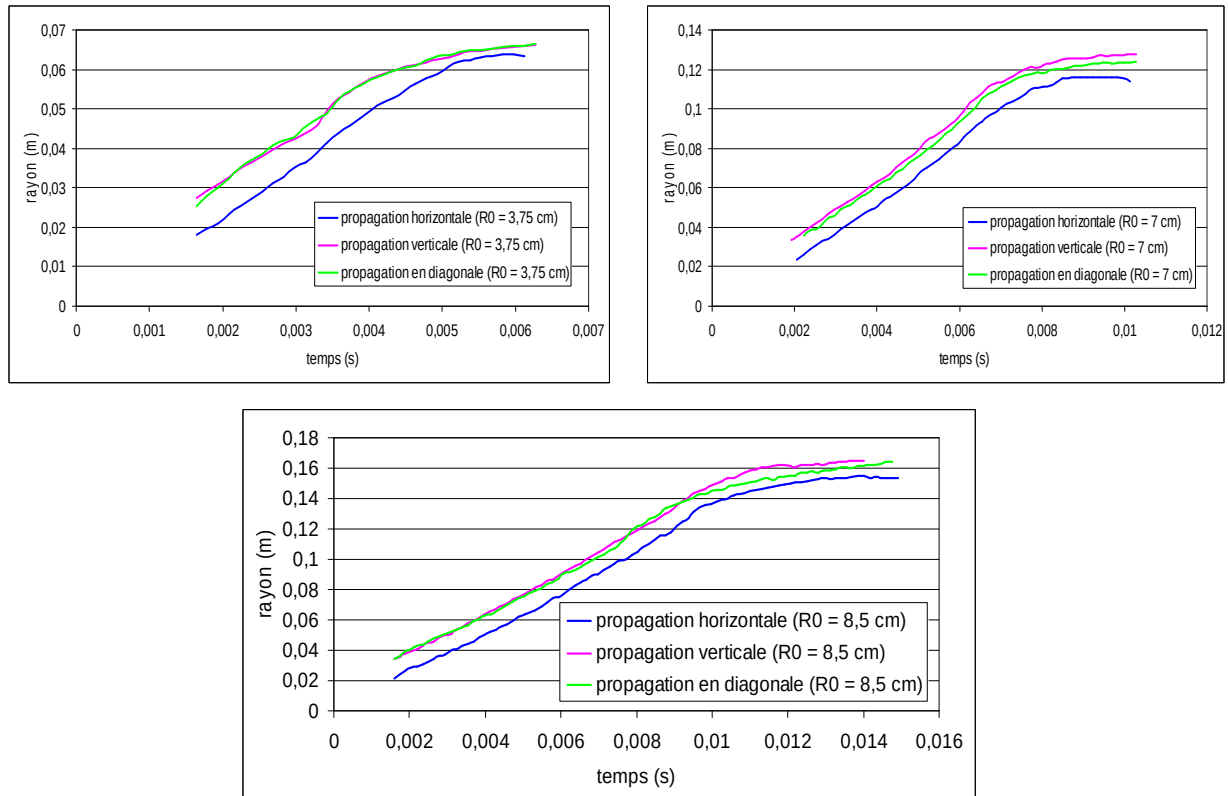


Figure 3.10 : Evolution du rayon de flamme suivant trois axes pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et différents rayons de charge hémisphérique (3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm).

La figure 3.11 montre que le rayon de flamme augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale en $1,87 \times R_0$ (R_0 étant le rayon initial), ce qui confirme que le rayon de flamme atteint bien son maximum à environ $\sigma^{(1/3)} \times R_0$ (σ = rapport d'expansion = $\rho_f / \rho_b = 6,86$) conformément aux observations de Guibert Duplantier (1993).

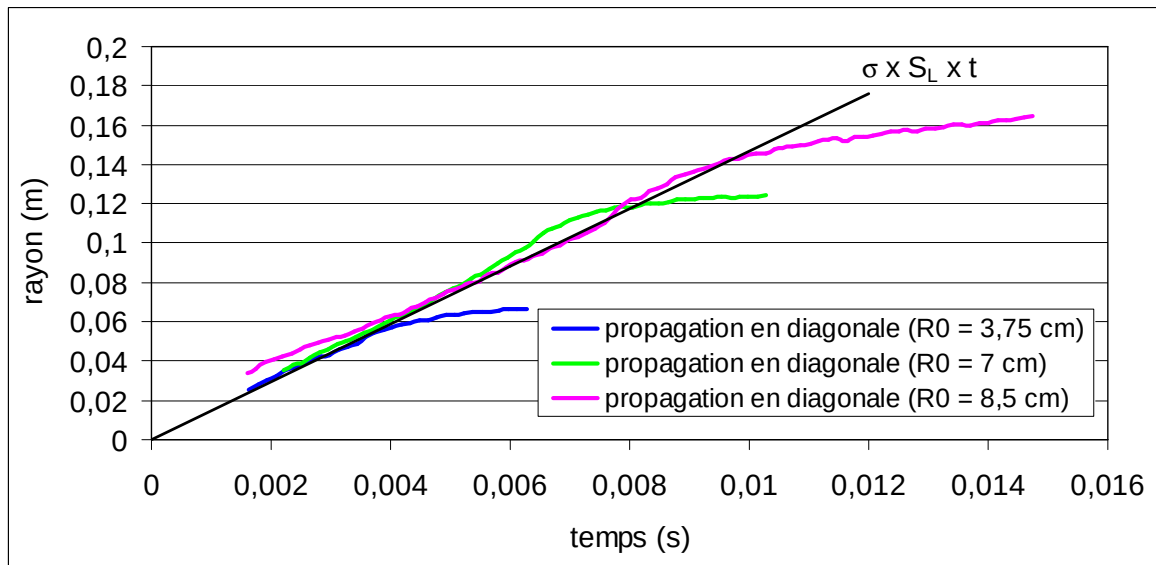


Figure 3.11 : Evolution du rayon de flamme suivant la diagonale pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et différents rayons de charge hémisphérique (3,75 cm, 7 cm et 8,5 cm).

L'évolution du rayon de flamme suit bien une loi en $w \times t$ jusqu'à la rupture du confinement. Les pentes w sont en bon accord avec les données de la littérature, notamment avec celles de Bavoil (1997), qui obtient des vitesses de flamme de l'ordre de 15 m/s. Ces valeurs correspondent à $\sigma \times S_L$ (avec $\sigma = \rho_f / \rho_b$ et S_L la vitesse de flamme laminaire) et vaut 14,68 m/s. Ensuite, une deuxième partie de la courbe marque un fléchissement de la courbe d'évolution du rayon de flamme qui correspond à la phase de ralentissement de la flamme due au mélange des gaz frais issue de l'hémisphère gazeux avec l'air environnant. Le tableau 3.3 récapitule les différentes vitesses moyennes en fonction des rayons de charge hémisphériques. Il est à noter que l'hémisphère de 8,5 cm de rayon donne une valeur de vitesse de flamme moyenne légèrement plus élevée que les autres cas et se rapprochent ainsi de la valeur théorique $\sigma \times S_L$ (14,68 m/s).

Rayon (cm)	Vitesse moyenne (m/s) (caméra)
3,75	13,69
7	13,96
8,5	14,67

Tableau 3.3 : Récapitulatif des différentes vitesses moyennes pour un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.

Pour la vitesse de flamme instantanée, l'évolution est décrite en trois parties distinctes. Une première partie où la flamme se propage à vitesse constante, de l'ordre de sa vitesse moyenne, jusqu'à une distance égale à son rayon de confinement initial. Une deuxième partie où il apparaît une légère accélération de la flamme. Au vu des différentes séquences vidéo enregistrées, la distance, où la vitesse de flamme instantanée maximale apparaît, correspond à l'instant où la charge hémisphérique est « rompue » du fait de la propagation de la flamme et de l'expansion des gaz brûlés. Ceci entraîne des « poches de combustion » plus importantes autour de la charge hémisphérique comme le montre par exemple la figure 3.9 pour 10 ms. Cette constatation a également été notée par Guibert-Duplantier (1993) pour des mélanges $C_2H_4 + 3 O_2 + Z N_2$ avec Z inférieur à 6 où une accélération de la vitesse de flamme est observée. Enfin, la dernière phase constitue la phase de décélération de la flamme due au mélange des gaz frais issue de l'hémisphère gazeux avec l'air environnant.

De plus, étant donné que l'amorçage utilisé est faible (122 mJ), aucun effet de survitesse dû à la dépose de l'énergie dans le milieu inflammable n'est constaté.

Cette première étape permet de valider le protocole d'acquisition des vitesses de flamme par caméra rapide. En effet, les vitesses obtenues sont en adéquation avec les vitesses théoriques $\sigma \times S_L$. La deuxième étape consiste à disposer des structures obstruées sur le parcours du front de flamme.

3.2.2 Avec obstacles à la limite de la charge hémisphérique (7 cm de rayon)

Dans le but de mettre en évidence l'influence des obstacles sur la propagation de flamme, différentes structures obstruées ont été placées à la limite de l'hémisphère de rayon 7 cm (voir chapitre 2, paragraphe 2.4.3 pour le descriptif de la configuration). Le tableau 3.4 rappelle les différentes structures utilisées lors de ces essais et la figure 3.12 le positionnement de la charge hémisphérique et des différents types de grilles.

Grilles utilisées	Configurations	Espace (D, mm)	Taille caractéristique (mm)
G1 (25 mm x 25 mm)	Alignée	25	1,5
G2 (13 mm x 13 mm)	Alignée	13	1
G3 (6,4 mm x 6,4 mm)	Alignée	6,4	0,5
G5 (rond de diamètre 4 mm)	Alignée	8	2
	Croisée	4	2

Tableau 3.4 : Rappel des différentes configurations obstruées utilisées.

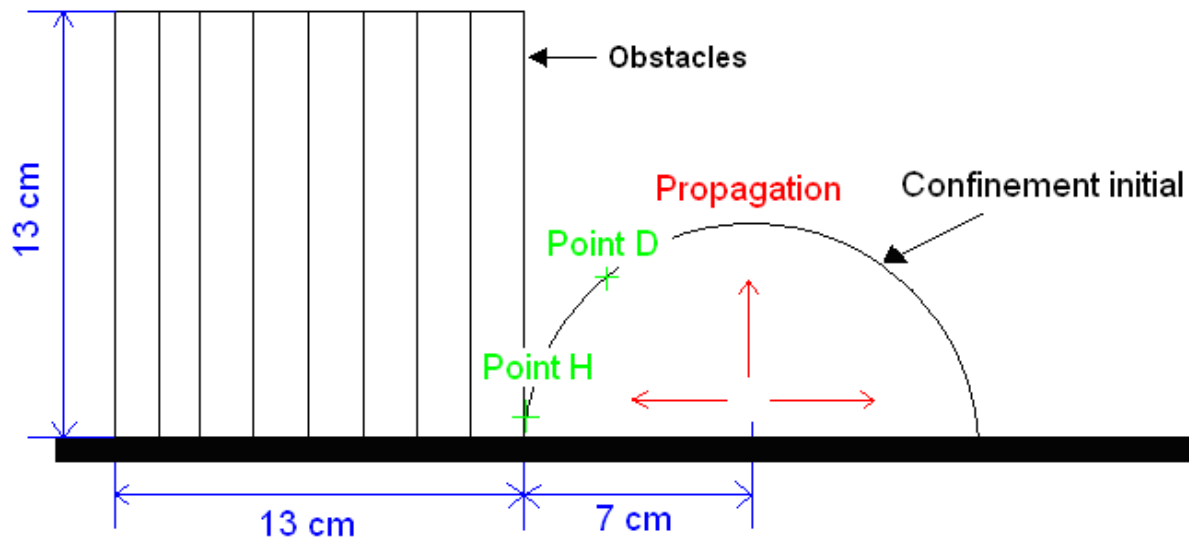


Figure 3.12 : Positionnement de la charge hémisphérique par rapport aux obstacles.

La visualisation des enregistrements vidéo du front de flamme confirme bien une évolution hémisphérique centrée sur la source d'amorçage dans les premiers instants de propagation, comme pour le cas sans obstacle. Puis, deux évolutions distinctes apparaissent représentant les deux évolutions du rayon de flamme, c'est-à-dire, soit la flamme continue de se propager dans la structure obstruée ; soit la structure joue un rôle de mur et freine la propagation de la flamme à l'intérieur de la structure. La figure 3.13 présente le cas d'une flamme pouvant se propager à l'intérieur de la structure obstruée (grilles de type G2).

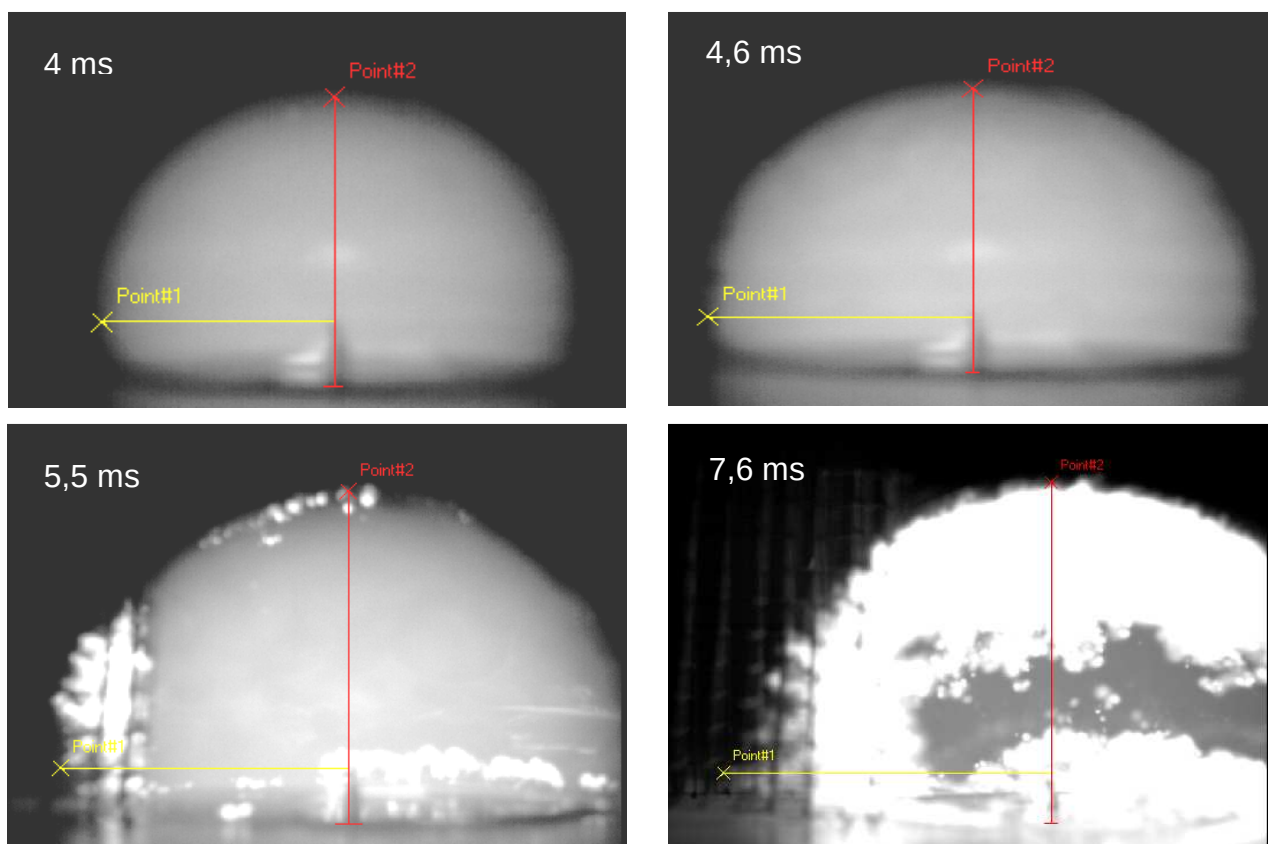


Figure 3.13 : Visualisation de l'évolution du rayon de flamme pour un rayon initial de charge hémisphérique de 7 cm et les grilles G2 (mélange hydrogène-air stœchiométrique) (vitesse d'acquisition de la caméra 6688 images/s et résolution de 600 x 800 p).

La figure 3.14 montre que la propagation de flamme est quasi hémisphérique. En effet, les courbes de propagation du rayon vertical (courbe rose) et diagonal (courbe verte) se superposent pendant les premiers instants de propagation. Pour la propagation du rayon horizontal, elle est légèrement moins importante que la propagation suivant la diagonale (différence 1,21 %) comme remarqué dans le

paragraphe précédent. Puis, la flamme rencontre la structure obstruée positionnée à 7 cm de la source d'amorçage (en périphérie de la charge hémisphérique), et la propagation horizontale atteint des valeurs du même ordre de grandeur que la propagation verticale ou diagonal. En revanche, pour les grilles G5, la propagation du rayon horizontale n'atteint pas les valeurs de la propagation du rayon vertical ou diagonal.

Comme montré sur la figure 3.15, lorsque la propagation horizontale de la flamme atteint les obstacles, la vitesse de flamme s'accélère significativement. Ce phénomène est plus marqué sur l'axe horizontal car le point se trouvant à l'horizontale de la propagation (Point H) rencontre plus rapidement les grilles que le point se trouvant à la diagonale (Point D) (figure 3.12). Il est à noter que dans le cas des obstacles de type G5, les obstacles ont tendance à ralentir la propagation de flamme, la pente de la deuxième courbe étant plus faible que celle de la première. Les valeurs du rayon de flamme maximal suivant l'horizontale et la diagonale sont récapitulées dans le tableau 3.5.

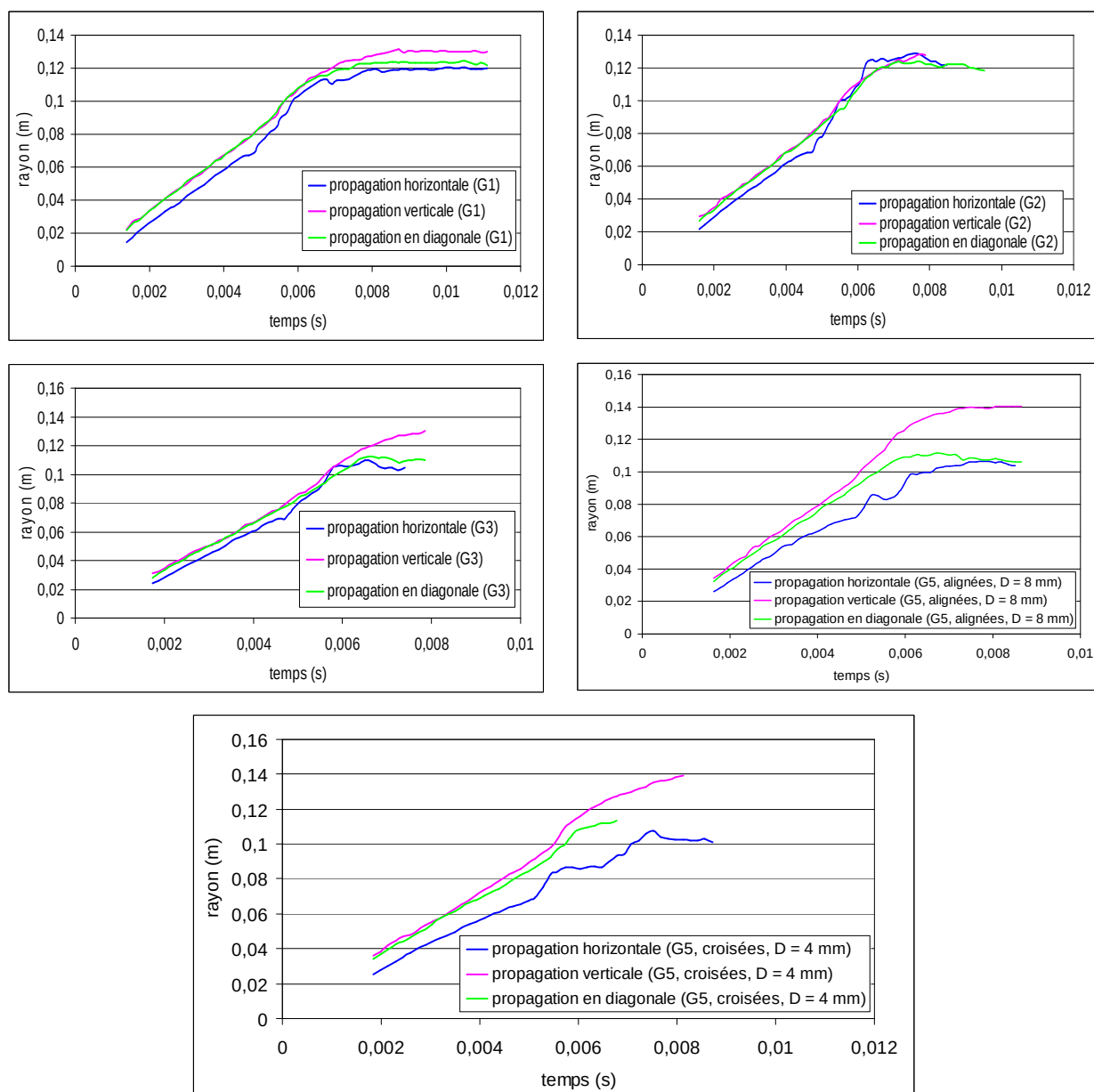


Figure 3.14 : Evolution du rayon de flamme pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et une charge hémisphérique de 7cm de rayon en présence d'obstacles.

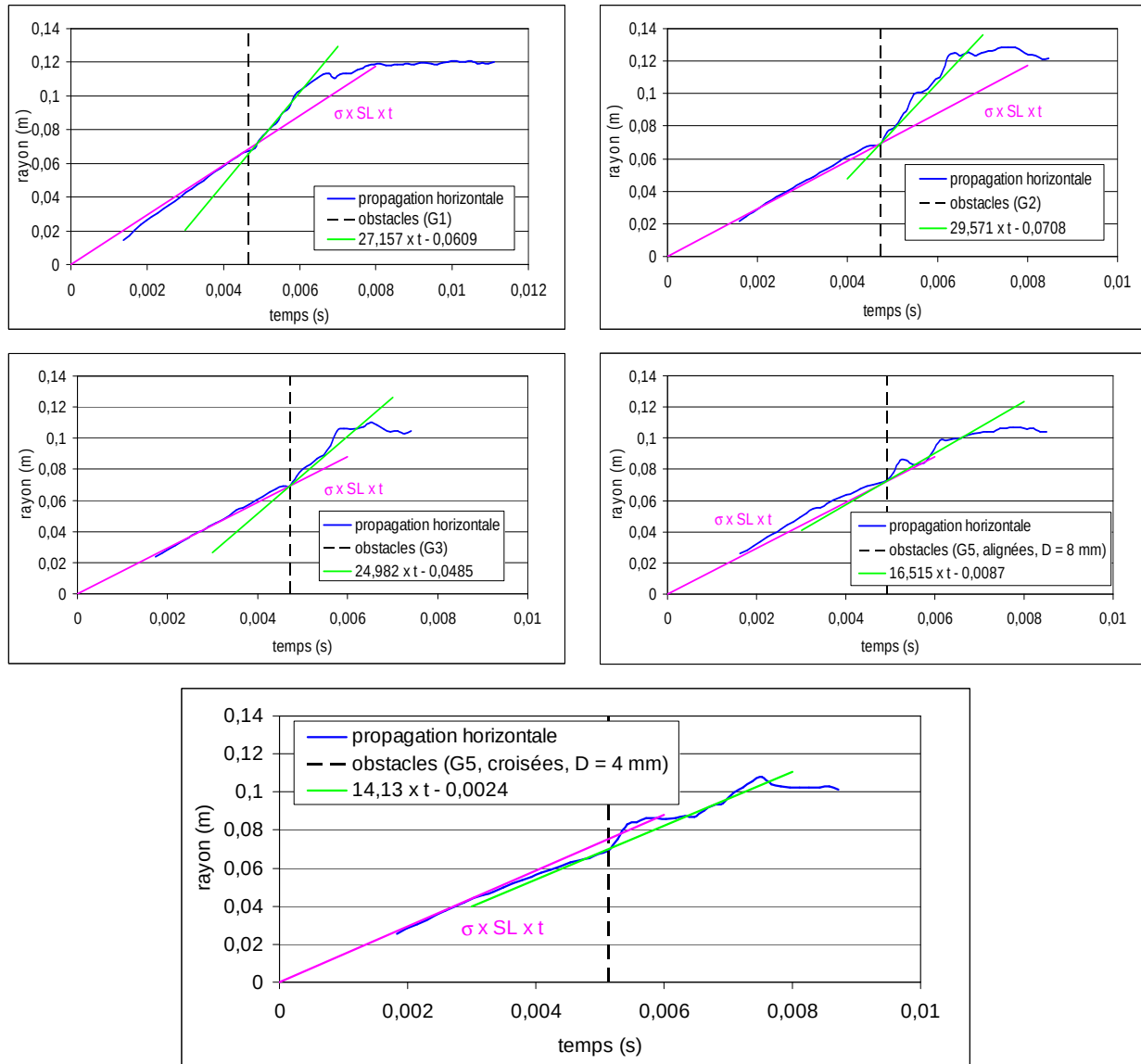


Figure 3.15 : Evolution du rayon de flamme horizontale pour un mélange hydrogène-air stœchiométrique et une charge hémisphérique de rayon 7 cm en présence d'obstacles.

Configurations	Rayon initial (m)	Rayon maximal suivant la diagonale (m)	Rayon maximal suivant l'horizontale (m)
Grilles G1	0,07	0,125	0,12
Grilles G2	0,07	0,124	0,129
Grilles G3	0,07	0,112	0,11
Grilles G5, D = 8 mm	0,07	0,114	0,108
Grilles G5, D = 4 mm	0,07	0,116	0,107

Tableau 3.5 : Récapitulatif des rayons de flamme maximaux atteints en fonction des configurations réalisées pour un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie.

L'évolution de la vitesse de flamme confirme l'influence des obstacles détectée dans le cas de la propagation du rayon de flamme. Dans la phase de propagation avant les obstacles, la vitesse de propagation de la flamme se corrèle bien avec la vitesse moyenne de flamme obtenue lors de l'étude précédente réalisée sans obstacle, soit environ 14 m/s. Dans la zone d'écoulement en présence d'obstacles, la vitesse de flamme moyenne augmente, sauf dans le cas des grilles G5 où la vitesse décroît. Les vitesses de flamme moyennes mesurées dans le champ d'obstacles caractérisent un coefficient d'expansion pour le mélange dilué résultant de la rupture du confinement aqueux et du mélange des gaz frais avec l'air ambiant. Les différentes valeurs de vitesse de flamme moyenne sont récapitulées dans le tableau 3.8.

Configurations	Vitesse moyenne mesurée avant obstacles (m/s)	Vitesse moyenne mesurée dans le champ d'obstacles (m/s)
G1	13,71	14,30
G2	14,12	17,20
G3	13,99	15,72
G5, alignées, D = 8 mm	13,44	13,59
G5, croisées, D = 4 mm	15,27	13,85

Tableau 3.6 : Récapitulatif des vitesses de flamme moyennes, déterminées à partir de la caméra, en fonction des configurations réalisées.

Avertissement : Les différences obtenues dans le suivi du front de flamme pour l'obtention du rayon de flamme peuvent être dues au positionnement du point servant au calcul du rayon. En effet, le point est précisé manuellement pour toutes les images de l'enregistrement.

3.3 Expériences sans ossature et sans obstacle

Plusieurs concentrations en hydrogène (25 %, 30 % et 40 %) ont été utilisées pour le cas des expériences sans obstacle et sans ossature. Les principales caractéristiques de ces mélanges sont rappelées dans le chapitre 2, paragraphe 2.5.2. Par soucis de clarté, le dispositif expérimental est rappelé avec la figure 3.16. Les valeurs de surpression et de vitesse de flamme déterminées à partir des photodiodes ont pu être obtenues contrairement au cas des hémisphères présenté dans le paragraphe précédent. En effet, le volume de gaz inflammable mis en jeu dans les expériences sans ossature est plus important que dans le cas des hémisphères aqueux et donc la surpression et les vitesses de flamme seront plus importantes.

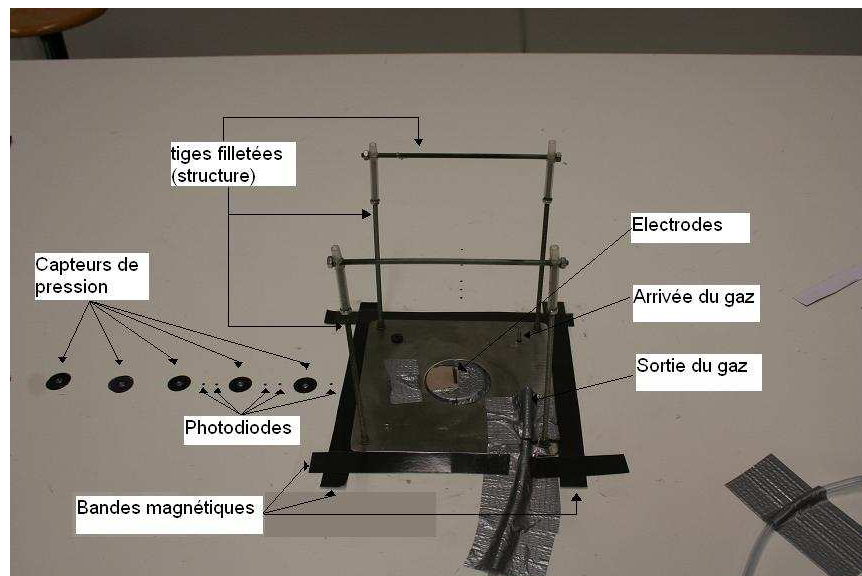


Figure 3.16 : Rappel du dispositif expérimental sans ossature.

La figure 3.17 présente l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les trois mélanges hydrogène-air employés (25 %, 30 % et 40 % d'hydrogène). Pour le premier capteur (à 12 cm de la source d'amorçage), les écarts de surpressions sont plus importants entre un mélange contenant 30 % d'hydrogène et un mélange contenant 40 % d'hydrogène (0,75 kPa) qu'entre un mélange contenant 25 % d'hydrogène et un mélange contenant 30 % d'hydrogène (0,26 kPa). Le tableau 3.7 dresse un bilan des surpressions maximales obtenues pour le premier capteur.

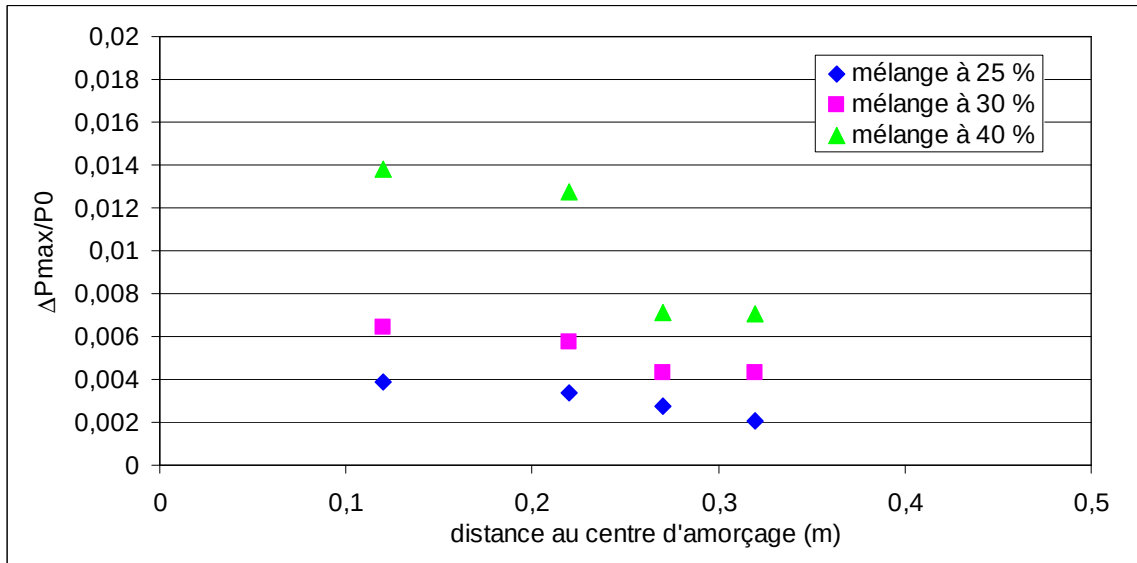


Figure 3.17 : Evolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les différents mélanges hydrogène-air employés (sans obstacle).

Distance (m)	25 %	30 %	40 %
0,12	0,39 kPa	0,65 kPa	1,4 kPa

Tableau 3.7 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale mesurées à 12 cm de la source d'amorçage pour les différents mélanges hydrogène-air employés.

Le diagramme de marche et donc la vitesse de flamme n'est obtenu que pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène car le mélange hydrogène-air à 25 % d'hydrogène n'est pas suffisamment lumineux pour permettre une analyse correcte avec la caméra. Les images issues de la caméra sont exploitées seulement suivant la diagonale car la flamme est moins perturbée par la présence du film et les vitesses de flamme sont plus élevées. La figure 3.18 représente l'évolution du diagramme de marche de la flamme pour des mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène. Comme obtenu avec les hémisphères aqueux en l'absence d'obstacle et compte tenu du faible volume de gaz initial (environ 3 L), la flamme ne s'accélère pas et l'évolution du rayon de flamme doit donc normalement suivre la loi $\sigma \times S_L \times t$. Il est à constater au vu de la figure 3.18 le rôle joué par le film avec une évolution en deux temps. En effet, un changement de pente dans l'évolution du rayon est observé à 6,542 ms pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène et à 10,238 ms pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

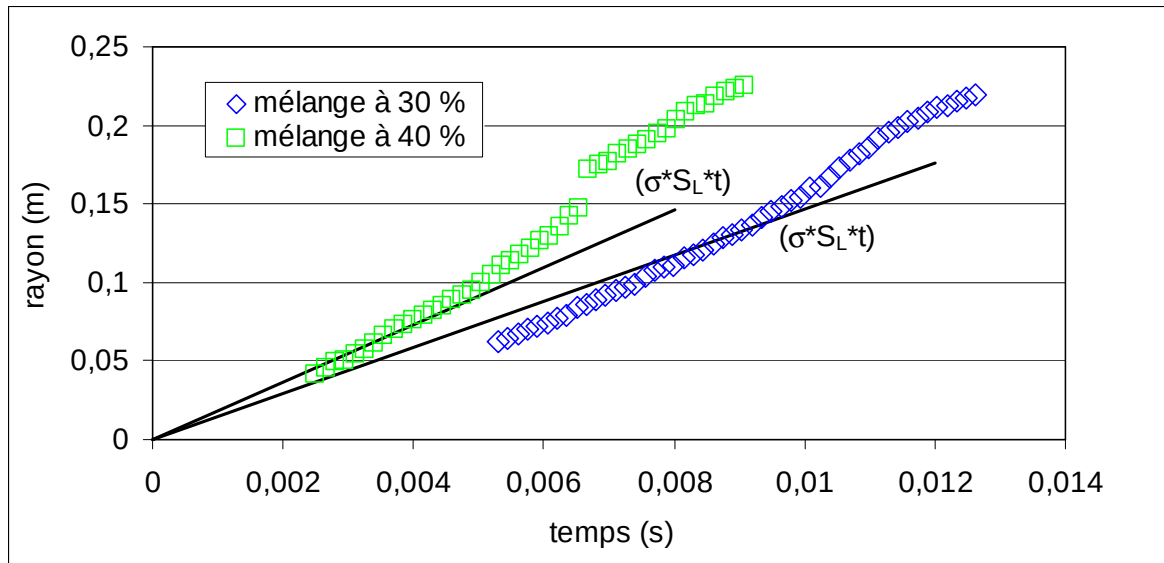


Figure 3.18 : Diagramme de marche de la flamme pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène, sans obstacle et sans ossature.

Les données de vitesses moyennes issues de la caméra sont en bon accord avec les données théoriques. En effet, pour un mélange à 30 % d'hydrogène, la vitesse de propagation moyenne est de 14,88 m/s et pour le mélange à 40 % de 19,68 m/s. Or, en théorie les vitesses de propagation devraient être de 14,68 m/s dans le cas d'un mélange à 30 % d'hydrogène et 17,35 m/s dans le cas d'un mélange à 40 % d'hydrogène. Les vitesses de flamme obtenues sont en accord aux vitesses de flamme obtenues dans la littérature. Ainsi, pour un mélange à 30 % d'hydrogène, Bavoil (1997) trouve une vitesse de flamme de l'ordre de 15 m/s et pour un mélange avec 40 % d'hydrogène environ 20 m/s. Dans les expériences basées sur les charges hémisphériques, une vitesse moyenne d'environ 14 m/s dans le cas d'un mélange à 30 % d'hydrogène a été obtenue.

3.4 Expériences avec obstacles de type grillage et sans ossature

Différentes configurations d'obstacles ont été testées pour les concentrations d'hydrogène de 30 % et 40 % (pour plus de détails sur les mélanges se référer au chapitre 2, paragraphe 2.5.2). Le tableau 3.8 résume les principales caractéristiques des obstacles utilisés (pour plus de précisions se référer au chapitre 2, paragraphe 2.4.3).

Taille de maille (mm)	Diamètre (mm)	Espacement (mm)	Positionnement	Nombre de couches	ABR (%)
G3 6,4 x 6,4	0,5	6,4	Aligné	11	13,93
G2 13 x 13	1	13	Aligné	6	14,59
G1 25 x 25	1,5	25	Aligné	3	11,94

Tableau 3.8 : Récapitulatif des configurations d'obstacles testées.

Les figures 3.19 et 3.20 montrent l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance à la source d'amorçage.

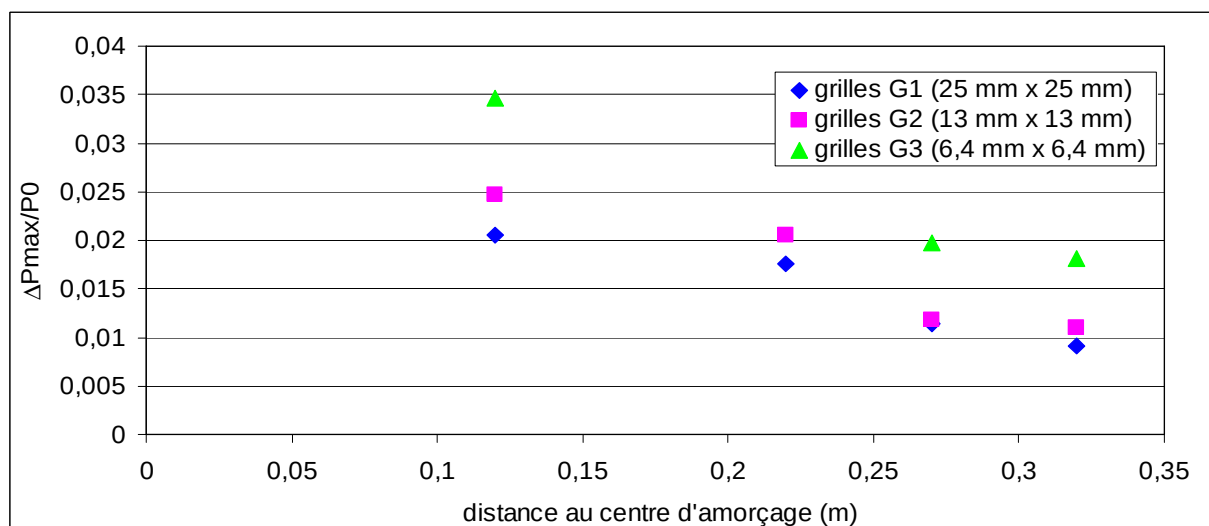


Figure 3.19 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour différents types de grilles (mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène).

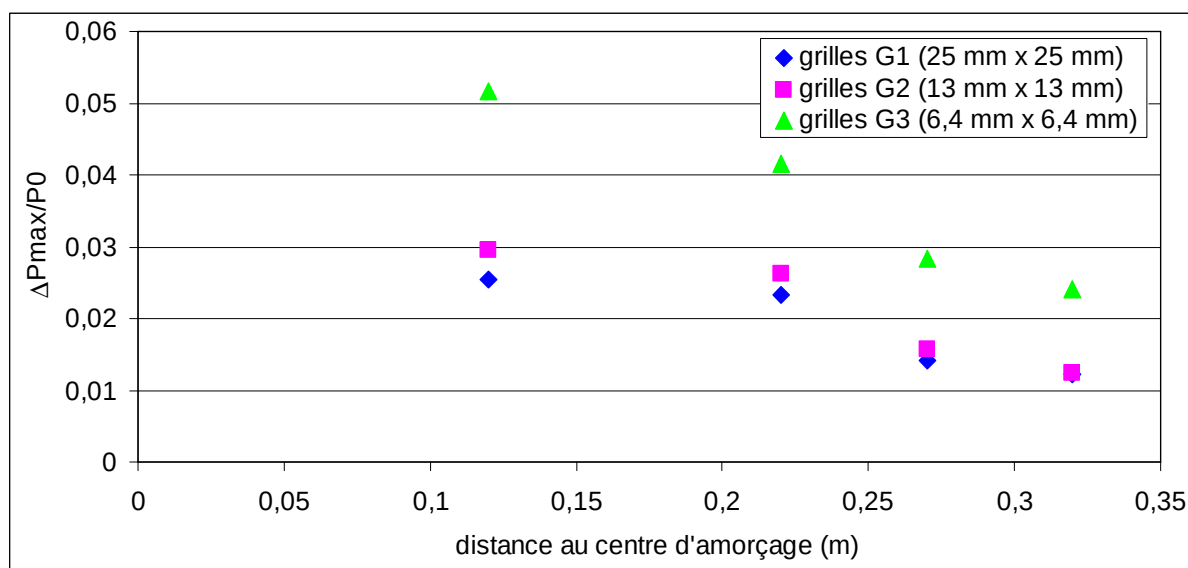


Figure 3.20 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour différents types de grilles (mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène).

Pour les deux mélanges, la diminution de la taille de maille et donc du diamètre des obstacles, et l'augmentation du nombre de couches vu par la flamme, entraîne une augmentation des valeurs de la surpression maximale. Il apparaît donc que l'espace entre couches joue un rôle prédominant dans l'augmentation des valeurs de la surpression. Les valeurs maximales de surpression sont donc atteintes dans tous les cas pour les grilles de type G3. De plus, le mélange hydrogène-air à 40 %

d'hydrogène donne toujours les valeurs de surpression les plus élevées. Le tableau 3.9 dresse un bilan des différentes valeurs de surpression maximale obtenues à 12 cm de la source en fonction de la richesse et du type d'obstacle. Pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène (figure 3.19), l'écart le plus important en termes de surpression à 12 cm de la source d'amorçage se trouve entre la configuration avec les grilles G3 et la configuration avec les grilles G2 (1 kPa). Concernant le cas du mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène (figure 3.20), l'écart de surpression le plus important à 12 cm de la source est toujours obtenu entre la configuration avec les grilles G3 et la configuration avec les grilles G2 (2,2 kPa).

Configurations	Mélange hydrogène-air	
	30 % H ₂	40 % H ₂
G1	2,1 kPa	2,6 kPa
G2	2,5 kPa	3 kPa
G3	3,5 kPa	5,2 kPa

Tableau 3.9 : Bilan des valeurs de surpression maximale obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les différents types de grilles et les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

Comme explicité dans le paragraphe traitant du processus de dépouillement des résultats, l'évolution du rayon de flamme ainsi que de la vitesse selon la diagonale sont étudiées en ramenant les distances au niveau du sol (c'est-à-dire en ne considérant que la coordonnée x). De plus, comme précisé dans le paragraphe précédent (paragraphe 3.3), seules les acquisitions vidéo des mélanges à 30 % et 40 % ont été analysées.

Les figures 3.21 et 3.22 représentent l'évolution du rayon de flamme (a) et l'évolution de la vitesse moyenne (b) en fonction du temps pour les différents types d'obstacles et les mélanges hydrogène-air à 30 % (figure 3.21) et 40 % (figure 3.22) d'hydrogène. L'évolution globale des rayons de flamme (figures 3.21 et 3.22 (a)) est cohérente avec les résultats obtenus pour la pression et les vitesses de flamme : en présence d'obstacles, les vitesses de flamme ainsi que les surpressions maximales sont plus importantes. Cependant, pour le mélange hydrogène-air à 30 %

d'hydrogène et les obstacles de type G1, le rayon de flamme est supérieur au rayon de flamme obtenu avec les obstacles de type G2 pour un temps donné. Ce phénomène est confirmé par l'évolution de la vitesse moyenne en fonction du temps (figure 3.21 (b)). En effet, la vitesse moyenne obtenue dans le cas des obstacles de type G1 est supérieure à celle des obstacles de type G2 pour un temps donné. Cette constatation n'avait pas été faite au niveau des pressions, où les surpressions maximales pour des grilles de type G2 sont plus élevées que les surpressions maximales pour les grilles de type G1. Cette inversion dans l'évolution du rayon de flamme entre les grilles de types G1 et G2 n'est plus présente pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène (figure 3.22 (a)). La vitesse moyenne de flamme (figure 3.22 (b)) pour le cas des obstacles G3 est bien supérieure à celles des obstacles de type G2 et G1. De plus, pour les deux mélanges utilisés, la courbe représentative de la vitesse de flamme moyenne se compose en deux parties : une première partie croissante où la vitesse de flamme moyenne maximale est atteinte ; et une deuxième partie qui marque la phase de ralentissement de la flamme.

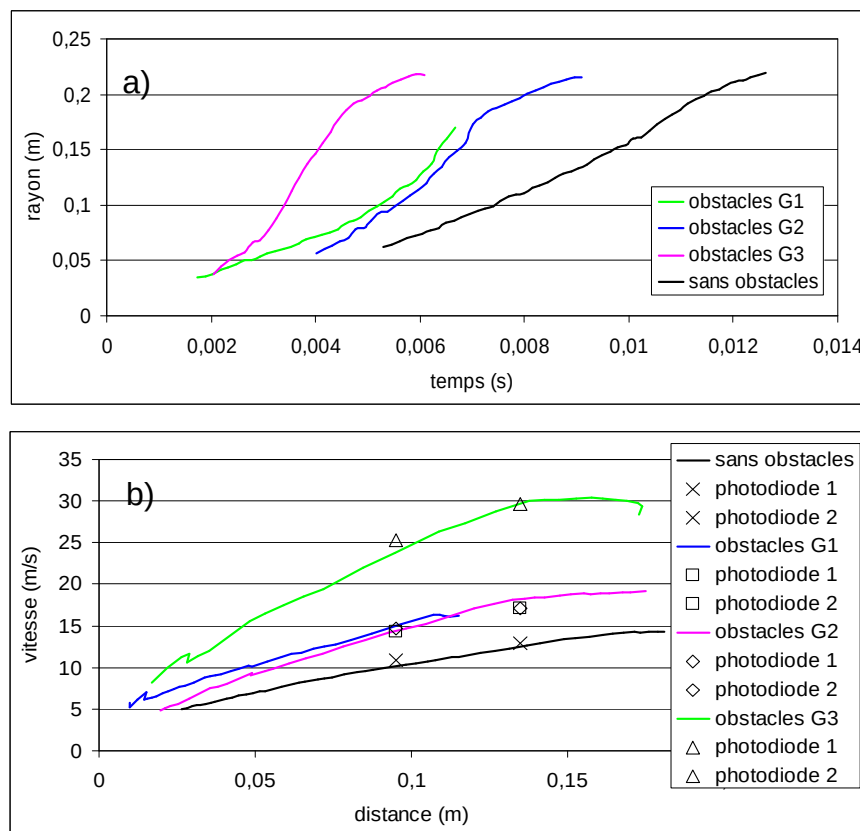


Figure 3.21 : Influence des obstacles sur l'évolution du rayon de flamme (a) et sur la vitesse moyenne (b) pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène (caméra et photodiodes).

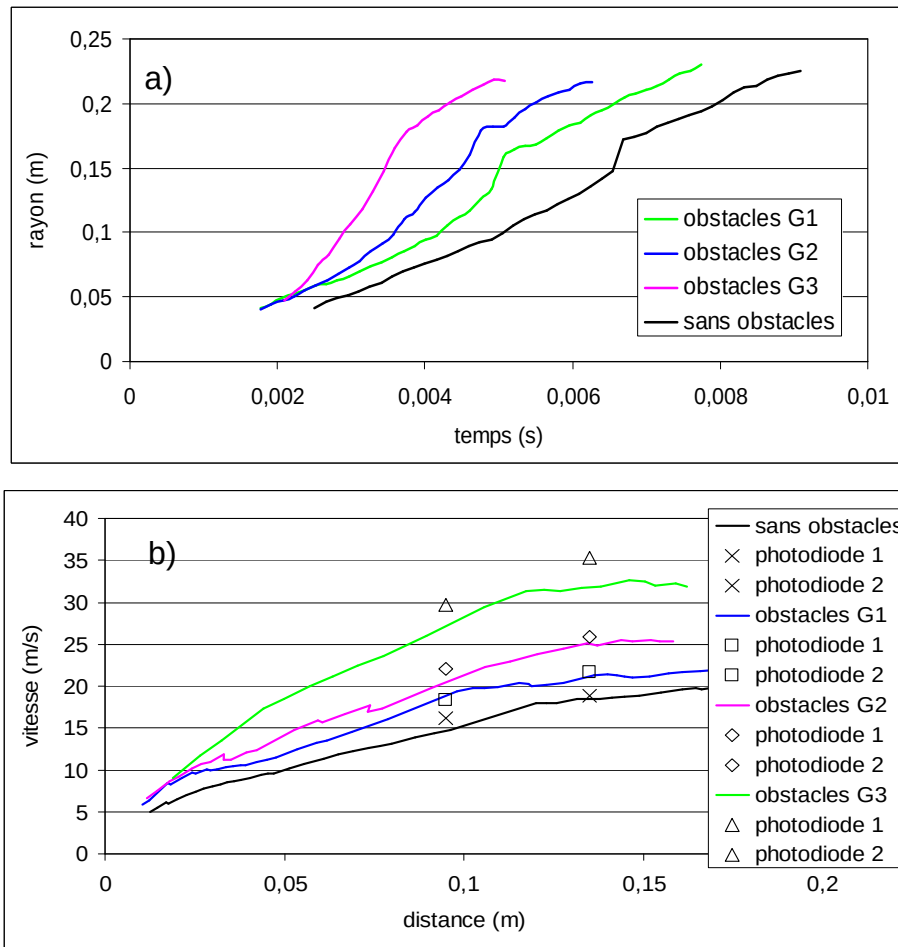


Figure 3.22 : Influence des obstacles sur l'évolution du rayon de flamme (a) et sur l'évolution de la vitesse moyenne (b) pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

Les vitesses de flamme obtenues avec les photodiodes sont globalement en assez bon accord avec les vitesses de flamme obtenue avec la caméra pour les deux mélanges hydrogène-air utilisés. Le tableau 3.10 récapitule les valeurs des vitesses moyennes de flamme obtenues avec les photodiodes et obtenues avec la caméra pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène. L'écart le plus important entre les valeurs des photodiodes 1 et 2 et les valeurs de la caméra correspond au cas des grilles de type G3 quelque soit le mélange hydrogène-air utilisé. Le fait d'obtenir l'écart le plus important au niveau des obstacles G3 peut s'expliquer par le faible espace entre les différentes couches (6,4 mm). Il a donc été très difficile de discerner le front de flamme lors de sa propagation dans le champ d'obstacles.

Configurations	Distance (m)	30 % d'hydrogène		40 % d'hydrogène	
		V _f photodiodes (m/s)	V _f caméra (m/s)	V _f photodiodes (m/s)	V _f caméra (m/s)
Sans obstacle	0,095	10,83	10,21	16,15	14,62
	0,135	12,82	12,51	18,85	18,49
Obstacles G1	0,095	14,32	14,66	18,33	18,86
	0,135	17,14		21,62	21,15
Obstacles G2	0,095	14,74	14,34	22,02	20,39
	0,135	17,14	17,26	25,87	25,04
Obstacles G3	0,095	25,26	23,81	29,71	27,16
	0,135	29,58	29,67	35,28	31,74

Tableau 3.10 : Récapitulatif des différentes vitesses de flamme moyenne obtenues par la caméra et par les photodiodes pour le mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

Pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et le cas des obstacles G1, le front de flamme n'a pu être suivi jusqu'à la position de la deuxième photodiode en raison de la difficulté à discerner le front de flamme du film PVC. L'évolution de la vitesse moyenne en fonction du type de grilles utilisé est en accord avec l'évolution constatée au niveau de la surpression. En effet, la vitesse de flamme moyenne la plus élevée est obtenue avec les grilles de type G3 et la moins élevée avec le cas sans obstacle. Il apparaît aussi peu de différence entre les vitesses relevées pour les grilles de type G1 et de type G2, ce qui est en accord avec l'évolution des pressions où l'écart entre les grilles de type G1 et de type G2 est faible (0,4 kPa pour les deux mélanges hydrogène-air).

Connaissant l'évolution du rayon de flamme, la vitesse instantanée selon la diagonale de propagation de la flamme est déduite en dérivant le rayon de flamme jusqu'à la sortie du champ d'obstacles. En effet, en dehors du champ d'obstacles, il a été assez difficile de discerner exactement le film PVC du front de flamme. Il est donc apparu plus prudent de ne pas prendre en compte ces points. Le tableau 3.11 dresse un bilan des vitesses de flamme maximale instantanées et des surpressions maximales pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

	30 % d'hydrogène		40 % d'hydrogène	
Configurations	V _{max} (m/s)	ΔP_{max} (kPa)	V _{max} (m/s)	ΔP_{max} (kPa)
Obstacles G1	43,86	2,1	47,76	2,6
Obstacles G2	48,83	2,5	65,76	3
Obstacles G3	77,78	3,5	107,74	5,2

Tableau 3.11 : Récapitulatif des différentes vitesses de flamme maximales obtenues par la dérivée du rayon de flamme pour le mélange hydrogène-air à 30%et 40% d'hydrogène.

Au vu des résultats présentés dans le tableau ci-dessus, il apparaît une bonne évolution globale de la vitesse de flamme maximale en fonction des obstacles utilisés dans les différentes configurations. Comme pour l'évolution de la pression et des vitesses moyennes, la vitesse maximale de flamme la plus importante correspond aux grilles G3. Les grilles G1 et G2 ont un effet similaire. Par contre, dans le cas de la vitesse maximale de flamme pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène, les grilles de type G2 donnent une valeur de vitesse plus élevées que les grilles de type G1, contrairement à l'évolution obtenue avec le rayon de flamme et la vitesse moyenne, où les grilles de type G1 donnaient des valeurs légèrement supérieures aux valeurs des grilles de type G2. De plus, les valeurs obtenues dans le cas d'un mélange à 40 % sont bien supérieures aux valeurs obtenues dans le cas d'un mélange à 30 % d'hydrogène.

3.5 Expériences avec obstacles de type plaque et sans ossature

Dans les séries d'expériences suivantes, un nouveau type d'obstacle plus massif a été étudié (pour une description plus détaillée voir le chapitre 2, paragraphe 2.4.3). Les configurations utilisées sont rappelées ci-dessous (tableau 3.12). Pour rappel, les différentes positions des grilles sont représentées dans les figures 3.23 et 3.24.

Taille de maille (mm)	Taille obstacle	Epaisseur (mm)	Espacement (mm)	Position	Nombre de couches	ABR (%)
G4 : Carrée 8 x 8	4	1	4	Aligné / croisé	14	37,40
		1	8	Aligné / croisé	8	37,40
G5 : Ronde diamètre 4	2	1	4	Aligné / croisé	14	41,75
		1	8	Aligné / croisé	8	41,75

Tableau 3.12 : Rappel des différentes configurations utilisées dans les expériences.

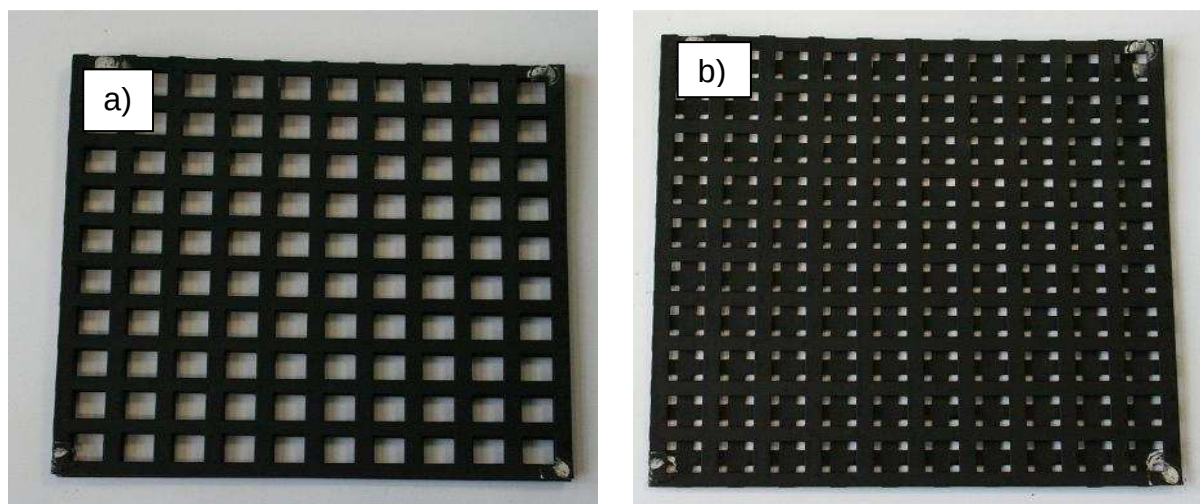


Figure 3.23 : Rappel des différentes positions pour les grilles G4 : a) alignée, et b) croisée.

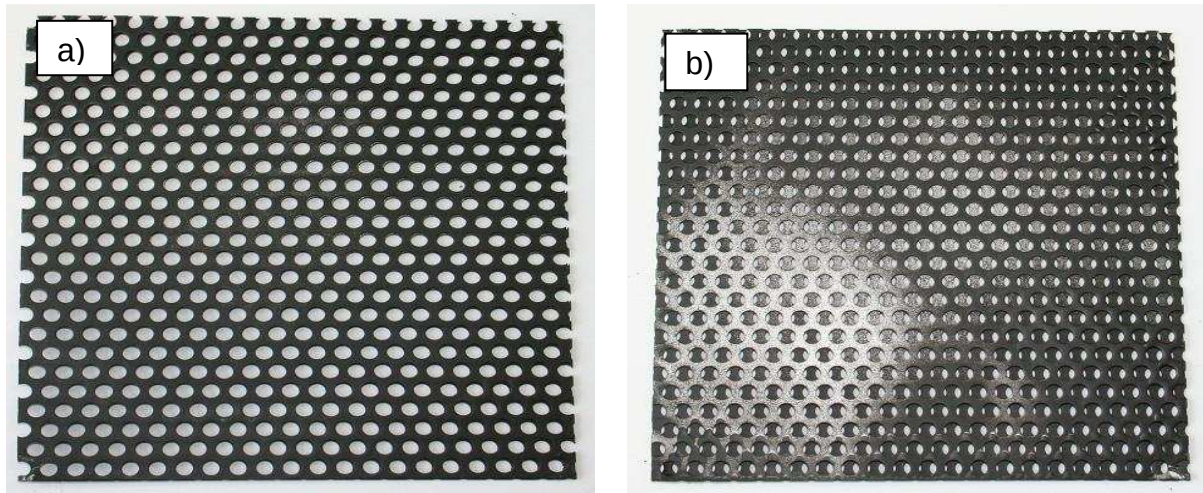


Figure 3.24 : Rappel des différentes positions pour les grilles G5 : a) alignée, et b) croisée.

Dans cette partie le type de grilles insérées dans le système est fixe et les paramètres de positionnement des grilles (aligné ou croisé voir figures 3.24 et 3.25) et l'espace entre couches (4 mm ou 8 mm) sont étudiés.

3.5.1 Grilles de type G4

Les figures 3.25 et 3.26 montrent que les valeurs de surpressions maximales les plus élevées sont obtenues avec un positionnement de grilles croisées et un espace entre couches de 4 mm (soit la moitié de la taille de maille) indépendamment du mélange hydrogène-air employé.

Le tableau 3.13 résume les différentes valeurs de surpression maximale obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour toutes les configurations étudiées et tous les mélanges hydrogène-air réalisés.

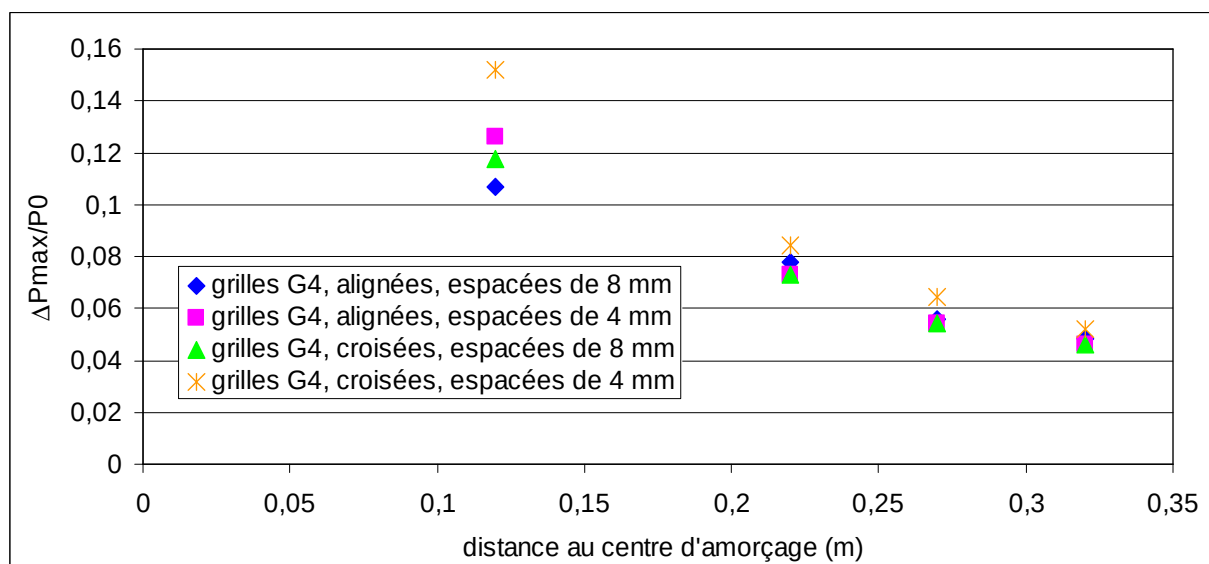


Figure 3.25 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G4 et un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

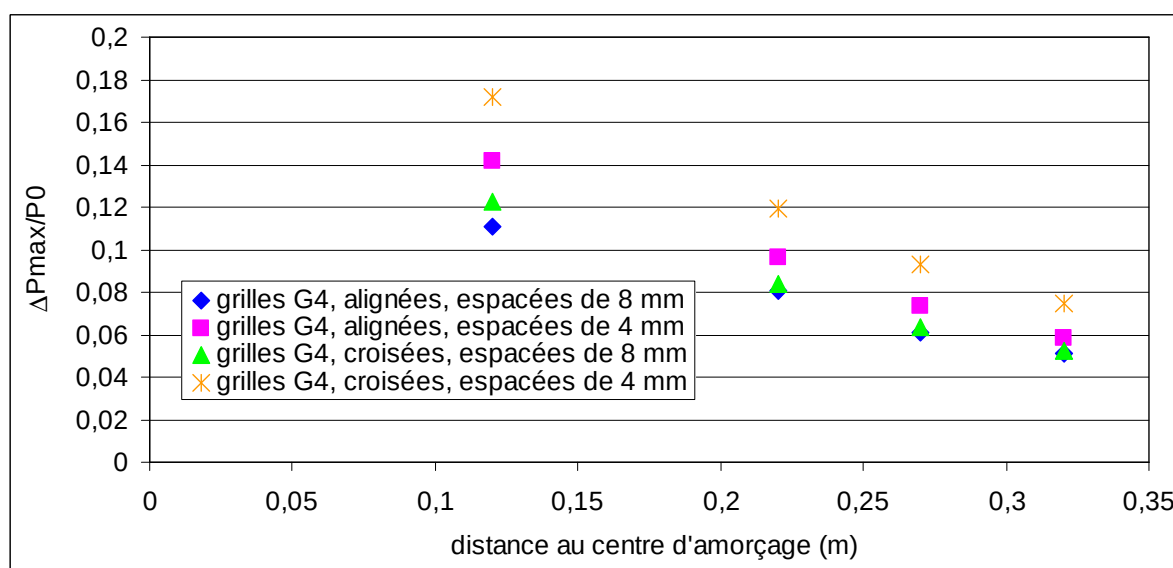


Figure 3.26 : Evolution de la surpression adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G4 et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

		30 % d'hydrogène	40 % d'hydrogène
Position des couches	Espace entre couches (mm)	Surpression (kPa)	Surpression (kPa)
Alignée	8	10,8	11,2
Alignée	4	12,0	14,3
Croisée	8	11,9	12,4
Croisée	4	15,4	17,4

Tableau 3.13 : Surpressions maximales obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les grilles de types G4 et un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

Comme dans les cas précédents, les images de la caméra ont permis d'obtenir l'évolution du rayon de flamme selon la diagonale et donc l'évolution de la vitesse moyenne selon la diagonale et la vitesse maximale instantanée. Les parties précédentes (paragraphe 3.3 et 3.4) ont permis de valider le processus d'acquisition de la vitesse instantanée maximale. Cette donnée sera par la suite comparée aux résultats des modèles de la littérature.

Comme dans les cas exposés avec les grilles G1, G2 et G3, l'évolution du rayon de flamme se compose en deux parties. La première partie correspond à la propagation de la flamme dans le champ d'obstacle, la seconde correspond à la phase de décélération de la flamme. Le tableau 3.14 dresse un bilan des vitesses de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes. Les vitesses obtenues avec les photodiodes et avec la caméra sont globalement en assez bon accord. Les grilles G4 croisées espacées de 4 mm donnent bien les vitesses de flamme moyennes les plus élevées quelque soit le mélange utilisé. En revanche pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène, l'écart entre vitesse de flamme moyenne pour le groupe espacé de 8 mm et espacé de 4 mm est plus marqué et représente donc mieux l'évolution de la surpression dans le cas du traitement des données de la caméra. Il est à noter qu'avec la caméra ou les photodiodes, il y a toujours une inversion comparée à l'évolution de la surpression pour l'espacement de 8 mm : les grilles donnant des valeurs de vitesse de flamme moyenne plus importantes que les grilles croisées. Pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène, le cas des grilles G4 alignées et espacées de 4 mm correspond aux valeurs de vitesse moyenne les plus faibles, ce qui est en contradiction avec

l'évolution de la surpression, où les deux configurations espacées de 4 mm généraient les plus fortes valeurs. Les vitesses moyennes de flamme obtenues sont similaires (caméra) ou inférieures (photodiodes) au cas des grilles alignées et espacées de 8 mm. Comme dans le cas des surpressions maximales, les valeurs de vitesse de flamme moyenne pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène sont bien supérieures aux valeurs pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Les deux différences dans l'évolution des vitesses de flamme moyennes comparées à l'évolution de la surpression maximale pour les grilles G4 sont de l'ordre de l'incertitude de mesure sur l'obtention de la vitesse à partir des données de la caméra. Il est donc possible qu'avec un meilleur post traitement des images de la caméra, l'évolution des vitesses de flamme moyennes deviennent identique à l'évolution de la surpression.

Position des couches	Distance (cm)	30 % d'hydrogène		40 % d'hydrogène	
		V _f caméra (m/s)	V _f photodiodes (m/s)	V _f caméra (m/s)	V _f photodiodes (m/s)
Alignée 8 mm	9,5	31,05	32,01	41,15	43,38
	13,5	36,54	37,48	47,83	49,98
Alignée 4 mm	9,5	40,51	33,62	41,66	41,38
	13,5	47,74	40,50	45,74	50,2
Croisée 8 mm	9,5	30,73	30,80	44,72	45,43
	13,5	37,06	36,71	49,51	54,13
Croisée 4 mm	9,5	48,78	47,95	57,91	56,92
	13,5	50,52	54,85	60,17	62,67

Tableau 3.14 : Bilan des vitesses de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes pour les grilles G4 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.

Les valeurs de la vitesse instantanée maximale obtenues par la dérivée du rayon de flamme sont présentées dans la suite de ce paragraphe. Comme dans les cas précédents, seule la phase d'accélération de la flamme est prise en compte en raison de la difficulté à suivre le front de flamme hors de la zone obstruée. Le tableau 3.15 résume les différentes valeurs de vitesse de flamme maximale instantanée

obtenues pour le cas des grilles de type G4 et les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

		30 % d'hydrogène	40 % d'hydrogène
Position des couches	Espace entre couches (mm)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)
Alignée	8	82,67	159,67
Alignée	4	205,09	200,81
Croisée	8	152,26	196,79
Croisée	4	215,03	287,92

Tableau 3.15 : Récapitulatif des vitesses de flamme obtenues avec la caméra (résolution de 600 x 800 images et vitesse de 6688 images/s) pour les grilles G4 pour un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

Au vu des résultats présentés dans le tableau 3.15, il apparaît une bonne évolution globale de la vitesse de flamme en fonction des obstacles utilisés dans les différentes configurations. Comme pour l'évolution de la pression, la vitesse de flamme maximale est obtenue avec les grilles croisées et espacées de 4 mm avec une valeur de 215,03 m/s pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et 287,92 m/s pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène. Les deux configurations pour lesquelles les vitesses de flamme instantanées sont maximales correspondent à celles où l'espace entre couches est de 4 mm. Aucune inversion entre l'évolution de la vitesse de flamme maximale instantanée et l'évolution de la surpression n'est présente contrairement au cas de la vitesse de flamme moyenne abordée précédemment.

3.5.2 Grilles de type G5

Les mêmes constations peuvent être faites dans le cas des grilles de type G5 que dans le cas des grilles G4. Les figures 3.27 et 3.28 représentent l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène. La valeur de surpression maximale la plus importante est obtenue avec la configuration croisée et

l'espacement entre couches de 4 mm (diamètre de la maille) quelque soit le mélange hydrogène-air utilisé : 13,6 kPa pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et 15,2 kPa pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène. La valeur de surpression maximale la moins élevée est toujours obtenue avec la configuration alignée et l'espace entre couches de 8 mm. L'écart de pression reste faible entre les configurations avec espace entre couches de 4 mm et configurations avec espace entre couches de 8 mm. Les valeurs de surpression maximale obtenues sont récapitulées dans le tableau 3.16 pour les deux mélanges hydrogène-air testés.

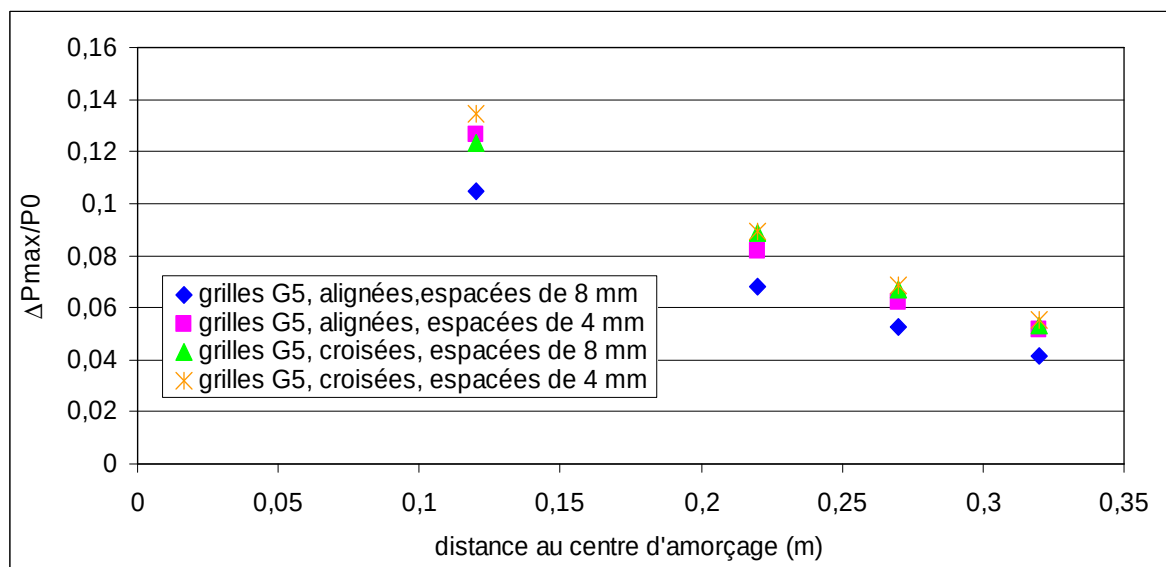


Figure 3.27 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles G5 et un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

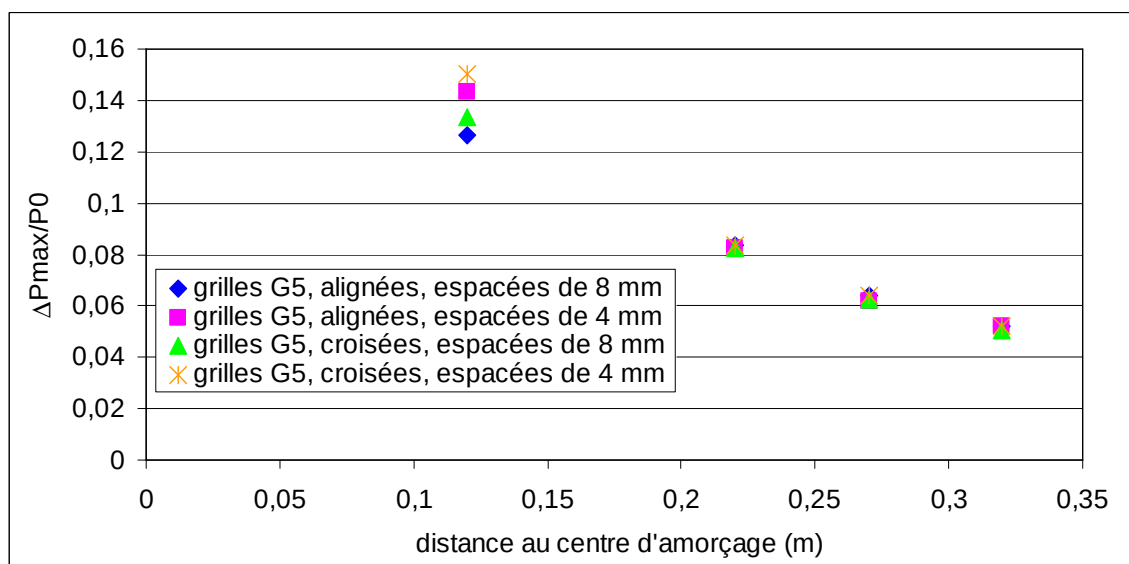


Figure 3.28 : Evolution de la surpression maximale adimensionnée en fonction de la distance au centre d'amorçage pour les grilles de type G5 et un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

Position des couches	Espace entre couches (mm)	30 % d'hydrogène	40 % d'hydrogène
		Surpression (kPa)	Surpression (kPa)
Alignée	8	10,6	11,2
Alignée	4	12,8	14,3
Croisée	8	12,5	12,4
Croisée	4	13,6	15,2

Tableau 3.16 : Surpressions maximales obtenues à 12 cm de la source d'amorçage pour les grilles de types G5 et un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

L'évolution du rayon de flamme se compose toujours de deux parties distinctes : la première partie correspondant à la propagation de la flamme dans le champ d'obstacle, la seconde correspondant à la phase de décélération de la flamme. Le tableau 3.17 récapitule les vitesses de flamme moyenne obtenues à partir de la caméra et avec les photodiodes. Le cas des grilles G5 semble correspondre à un cas limite de l'accélération de flamme comme pressenti dans l'analyse de l'évolution de la surpression. Pour les deux mélanges utilisés, les valeurs de vitesse de flamme moyenne sont toutes assez similaires quelque soit le processus de détermination employé. Ceci avait été déjà mis en évidence au niveau des surpressions. Toutefois,

pour les vitesses de flamme moyenne, aucune caractérisation de l'évolution ne peut être tirée avec assurance étant donné que les écarts au niveau des valeurs des vitesses sont de l'ordre de l'incertitude de mesure (4 m/s). Toutefois, il est à noter que le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène donne des valeurs de vitesse de flamme moyenne plus élevées que le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Position des couches	Distance (cm)	30 % d'hydrogène		40 % d'hydrogène	
		V _f caméra (m/s)	V _f photodiodes (m/s)	V _f caméra (m/s)	V _f photodiodes (m/s)
Alignée 8 mm	9,5	44,78	45,95	43,04	47,59
	13,5	44,75	49,32	49,42	55,90
Alignée 4 mm	9,5	42,12	39,01	45,41	40,15
	13,5	46,04	46,31	46,64	47,32
Croisée 8 mm	9,5	43,16	43,5	43,11	47,33
	13,5	46,04	48,63	47,61	54,24
Croisée 4 mm	9,5	44,90	40,02	51,03	50,26
	13,5	46,55	46,63	54,97	56,70

Tableau 3.17 : Bilan des vitesses de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes pour les grilles G5 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.

Le tableau 3.18 résume les différentes valeurs de vitesse de flamme maximale instantanée obtenues pour le cas des grilles de type G5 indépendamment du mélange hydrogène-air employé. Il apparaît une bonne évolution globale de la vitesse de flamme en fonction des obstacles utilisés dans les différentes configurations. Comme pour l'évolution de la surpression, la vitesse de flamme maximale est obtenue avec les grilles croisées et espacées de 4 mm avec une valeur de 287,41 m/s pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et 291,11 m/s pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène. L'écart entre les valeurs de vitesses maximales pour un même espace entre couches est beaucoup plus important dans le cas de l'espace entre couches de 4 mm que dans le cas d'un espace de 8 mm. Contrairement au cas des vitesses de flamme moyenne, l'écart

entre configuration est plu significatif et une évolution globale de la vitesse de flamme instantanée maximale en accord avec l'évolution de la surpression a pu être constatée.

		30 % d'hydrogène	40 % d'hydrogène
Position des couches	Espace entre couches (mm)	Vmax (m/s)	Vmax (m/s)
Alignée	8	191,83	179,01
Alignée	4	240,72	217,58
Croisée	8	178,82	211,77
Croisée	4	287,41	291,11

Tableau 3.18 : Récapitulatif des vitesses de flamme obtenues avec la caméra (résolution de 600 x 800 images et vitesse de 6688 images/s) pour les grilles G5 pour un mélange hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène.

3.6 Discussion sur les résultats obtenus avec obstacles et sans ossature

3.6.1 Comparaison des différentes obstructions

Dans un premier, les expériences réalisées avec les grilles G1, G2 et G3 ont permis de mettre en évidence que les grilles G3 génèrent des valeurs de surpressions maximales et de vitesse de flamme plus importantes que les grilles G2 et G1. De plus, les valeurs de surpressions maximales sont toujours plus élevées dans le cas du mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène que dans le cas du mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Dans un second temps, l'emploi des grilles G4 a permis de constater que les valeurs de surpression maximale et de vitesse de flamme sont plus importantes que dans le cas des grilles G3, G2 et G1. En effet, l'ABR lié aux grilles de type G3 vaut 14 % (ABR le plus important pour les grilles de types G1, G2 et G3) ; alors que l'ABR lié aux grilles de type G4 est en moyenne de 37,4 %. De plus, il apparaît que les surpressions obtenues avec les grilles croisées sont plus importantes qu'avec les grilles alignées. Dans un positionnement de grilles donné, l'espace de 4 mm entraîne des valeurs de surpression et de vitesse de flamme plus importante que l'espace de 8 mm.

Dans le cas des grilles G5, les mêmes constations sont faites que dans le cas des grilles G4. Toutefois, les effets du positionnement des grilles et de l'espace entre couches sont moins marqués. Les grilles G5 génèrent des valeurs de surpression plus faibles que les grilles G4. Cette évolution semble être due au fait que les grilles avec mailles carrées vont créer plus de turbulence que les grilles de mailles rondes dues aux effets de bords plus présents dans le cas des grilles de mailles carrées que dans le cas des grilles de mailles rondes.

Le tableau 3.19 résume l'ensemble des valeurs de surpressions obtenues à 12 cm de la source d'amorçage quelque soit les grilles et le mélange hydrogène-air utilisés.

	30 % d'hydrogène	40 % d'hydrogène
Configurations	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	$\Delta P_{\max}$ (kPa)
G1	2,1	2,6
G2	2,5	3
G3	3,5	5,2
G4 , alignées, D = 8 mm	10,8	11,2
G4 , alignées, D = 4 mm	12,03	14,3
G4 , croisées, D = 8 mm	11,9	12,4
G4 , croisées, D = 4 mm	15,4	17,4
G5 , alignées, D = 8 mm	10,6	11,2
G5 , alignées, D = 4 mm	12,8	14,3
G5 , croisées, D = 8 mm	12,5	12,4
G5 , croisées, D = 4 mm	13,6	15,2

Tableau 3.19 : Bilan des différentes valeurs maximales de surpression obtenues quelque soit les grilles et le mélange hydrogène-air utilisés.

3.6.2 Comparaison des vitesses expérimentales avec les formules de vitesse de flamme de la littérature

Comme il a été exposé au chapitre 1, paragraphe 1.3.2, les résultats expérimentaux sont comparés aux modèles de Dorofeev et al. (2007) et de Grune et al. (2003). Les relations relatives à ces deux modèles sont rappelées ci-dessous :

- o Formule de Dorofeev (2007) (domaine de validité pour $V_F \leq 500$ m/s) :

$$V_F = a^2 \times b \times \sigma \times (\sigma - 1) \times S_L \times \left(1 + \frac{4}{3} \times \frac{\sigma y}{x} \times \frac{R^\alpha}{(\sigma x)^\alpha} \right)^2 \times \left(\frac{R}{\delta} \right)^{1/3}$$

Où : a, b et α - constantes - (-)

σ - rapport des densités entre produits et réactifs - (-)

S_L - vitesse de combustion laminaire - m/s

y - taille caractéristique des obstacles – m

x - distance entre obstacle (centre à centre) – m

R - distance de fin de champ d'obstacles - m

δ - épaisseur de flamme (viscosité cinématique/vitesse laminaire de flamme) – m

- o Formule de Grune et al. (2003) :

$$V_F = k \times \sigma \times S_T \times \left(1 + \frac{(n - 1) \times n \times (2n - 1)}{6} \times \frac{\Delta^2}{(dx / 2)^2} \right)$$

Où : k - une constante (non donnée par les auteurs et définie à 0,05) - (-)

σ - rapport des densités entre produits et réactifs - (-)

S_T - vitesse de combustion turbulente ($10 \times S_L$) – m/s

n - nombre de couches de grillages traversées par la flamme - (-)

Δ - distance entre les couches (bord à bord) - m

dx - taille de maille - m

Aucune des relations sélectionnées ne prend en compte la position des obstacles ou des couches de grilles entre elles. Ainsi, les différentes positions des grilles G4 et G5 entre elles ne pourront pas être discernées et la seule variable sera l'espacement entre les couches.

La distance prise pour l'obtention des vitesses de flamme maximale par les relations de la littérature est la distance de la source d'amorçage à la sortie du champ d'obstacles soit 7,5 cm (10,6 cm selon la diagonale). Il a été choisi de ne pas convertir l'espace entre couche selon la diagonale pour garder la plus petite valeur. Dans le cas de l'application de la relation de Dorofeev (2007), la taille caractéristique (y) est définie à priori comme étant la partie pleine de la plaque que rencontrent les obstacles (figure 3.29). Les tableaux ci-dessous (tableaux 3.20 et 3.21) récapitulent pour tous les cas comparés dans la suite aux relations de la littérature, les données nécessaires à l'application des relations.



Figure 3.29 : Détermination de la taille caractéristique des obstacles (y) pour les grilles de type G4 et G5.

	Mélange H ₂ /air à 30 % d'H ₂							
Dorofeev (2007)		a²b	α	σ	S_L (m/s)	x (m)	y (m)	δ (m)
	G1	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,02625	0,0015	10 ⁻⁵
	G2	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,014	0,001	10 ⁻⁵
	G3	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,0069	0,0005	10 ⁻⁵
	G4	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,009	0,004	10 ⁻⁵
	G4	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,005	0,004	10 ⁻⁵
	G5	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,009	0,002	10 ⁻⁵
	G5	0,0085	0,63	6,86	2,14	0,005	0,002	10 ⁻⁵
Grune et al. (2003)		k	σ	S_T (m/s)	n	Δ (m)	dx (m)	
	G1	0,05	6,86	21,4	3	0,025	0,025	
	G2	0,05	6,86	21,4	6	0,013	0,013	
	G3	0,05	6,86	21,4	11	0,0064	0,0064	
	G4	0,05	6,86	21,4	8	0,008	0,008	
	G4	0,05	6,86	21,4	14	0,004	0,008	
	G5	0,05	6,86	21,4	8	0,008	0,004	
	G5	0,05	6,86	21,4	14	0,004	0,004	

Tableau 3.20 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application des relations de la littérature pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

	Mélange H ₂ /air à 40 % d'H ₂							
Dorofeev (2007)		a ² b	α	σ	S _L (m/s)	x (m)	y (m)	δ (m)
	G1	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,02625	0,0015	8 x 10 ⁻⁶
	G2	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,014	0,001	8 x 10 ⁻⁶
	G3	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,0069	0,0005	8 x 10 ⁻⁶
	G4	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,009	0,004	8 x 10 ⁻⁶
	G4	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,005	0,004	8 x 10 ⁻⁶
	G5	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,009	0,002	8 x 10 ⁻⁶
	G5	0,0085	0,63	6,38	2,72	0,005	0,002	8 x 10 ⁻⁶
Grune et al. (2003)		k	σ	S _T (m/s)	n	Δ (m)	dx (m)	
	G1	0,05	6,38	27,2	3	0,025	0,025	
	G2	0,05	6,38	27,2	6	0,013	0,013	
	G3	0,05	6,38	27,2	11	0,0064	0,0064	
	G4	0,05	6,38	27,2	8	0,008	0,008	
	G4	0,05	6,38	27,2	14	0,004	0,008	
	G5	0,05	6,38	27,2	8	0,008	0,004	
	G5	0,05	6,38	27,2	14	0,004	0,004	

Tableau 3.21 : Récapitulatif des données nécessaires à l'application des relations de la littérature pour un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

Les tableaux 3.22 et 3.23 récapitulent les résultats obtenus en appliquant les deux expressions. Ils dressent aussi un bilan de valeurs de vitesse de flamme maximales obtenues avec la caméra rapide et de l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues avec les relations de la littérature.

Configurations	Mélange H ₂ /air à 30 % H ₂				
	V _F caméra (m/s)	Dorofeev (2007)	Ecart avec Dorofeev (2007) (%)	Grune et al. (2003)	Ecart avec Grune et al. (2003) (%)
G1	43,86	30,12	+ 31,33	31,28	+ 28,68
G2	48,83	45,82	+ 6,16	101,48	- 107,82
G3	77,78	70,42	+ 9,46	267,98	- 244,53
G4 , alignées, D = 8 mm	82,67	Hors plage		161,69	+ 95,58
G4 , alignées, D = 4 mm	205,09	Hors plage		195,48	- 4,68
G4 , croisées, D = 8 mm	152,26	Hors plage		161,69	- 6,19
G4 , croisées, D = 4 mm	215,03	Hors plage		195,48	+ 9,09
G5 , alignées, D = 8 mm	191,83	237,23	- 23,67	323,16	- 68,46
G5 , alignées, D = 4 mm	240,72	Hors plage		390,79	- 62,32
G5 , croisées, D = 8 mm	178,82	237,23	- 32,66	232,16	- 80,72
G5 , croisées, D = 4 mm	287,41	Hors plage		390,16	- 35 97

Tableau 3.22 : Bilan des vitesses de flamme maximales obtenues par les formules de la littérature et par la caméra pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Configurations	Mélange H ₂ /air à 40 % H ₂				
	V _F caméra (m/s)	Dorofeev (2007)	Ecart avec Dorofeev (2007) (%)	Grune et al. (2003)	Ecart avec Grune et al. (2003) (%)
G1	47,76	34,68	+ 27,39	39,76	+ 16,75
G2	65,76	52,38	+ 20,35	128,99	- 96,15
G3	107,74	80,01	+ 25,74	340,61	- 216,14
G4 , alignées, D = 8 mm	159,67	Hors plage		205,51	- 28,71
G4 , alignées, D = 4 mm	200,81	Hors plage		248,46	- 23,73
G4 , croisées, D = 8 mm	196,79	Hors plage		205,51	- 4,43
G4 , croisées, D = 4 mm	287,92	Hors plage		248,51	+ 13,70
G5 , alignées, D = 8 mm	179,01	266,42	- 48,83	410,75	- 129,46
G5 , alignées, D = 4 mm	217,58	Hors plage		496,70	- 128,28
G5 , croisées, D = 8 mm	211,77	266,42	- 25,81	410,75	- 93,96
G5 , croisées, D = 4 mm	291,11	Hors plage		496,70	- 70,62

Tableau 3.23 : Bilan des vitesses de flamme maximales obtenues par les formules de la littérature et par la caméra pour un mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène.

Les résultats présentés dans les tableaux 3.23 et 3.23 ont permis de mettre en évidence les constations suivantes valable pour les deux mélanges hydrogène-air utilisés :

- o La relation de Dorofeev (2007) s'applique mieux pour les grilles G1, G2 et G3 que pour les grilles G4 et G5. En effet, dans le cas des grilles G1, G2 et G3 (type grillage), la taille caractéristique de l'obstacle est prise égale à son diamètre. En revanche, pour le cas des grilles G4 et G5 (type plaque), il a été

choisi de prendre comme taille caractéristique de l'obstacle la partie pleine (le croisillon voir figure 3.29) vue par la flamme lors de sa propagation. Ce choix peut être remis en cause dans la mesure où la taille caractéristique de l'obstacle aurait pu être prise égale à l'épaisseur de la plaque ou à un rayon équivalent à la surface d'une bande composant la plaque. L'auteur ne spécifie pas ce qu'il entend par taille caractéristique pour des obstacles qui ne seraient pas circulaires. De plus, l'application de cette relation conduit à des valeurs en dehors du domaine de validité pour le cas des grilles G4 et le cas de grilles G5 espacées de 4 mm.

- o La relation de Grune et al. (2003) s'applique assez bien dans le cas des grilles G4 croisées. En effet, les expériences à la base de cette relation sont effectuées dans des conditions similaires. Dans tous les autres cas, les valeurs de vitesses de flamme obtenues sur prédisent les valeurs obtenues à partir de la caméra, sauf dans le cas des grilles G1.
- o Le cas des grilles G5 (maille ronde) est à prendre avec prudence car les deux modèles appliqués ont été validés dans des cas de mailles carrées.

Au vu des constatations faites ci-dessus, deux voies d'améliorations ont été proposées indépendamment du mélange hydrogène-air utilisé :

- o Pour la relation de Dorofeev (2007) : définir une valeur de a^2b (actuellement 0,0085) représentant mieux les expériences réalisées avec les grilles G1, G2 et G3.
- o Pour la formule de Grune et al. (2003) : définir une valeur de k (actuellement 0,05) correspondant aux cas croisés et espacés de 4 mm et 8 mm pour les grilles G4.

Pour la formule de Dorofeev (2007), une nouvelle valeur de a^2b valant 0,0115 a été définie en essayant d'obtenir une valeur de vitesse de flamme semblable à la valeur de la vitesse de flamme expérimentale. Le tableau 3.24 dresse un bilan des valeurs de vitesse de flamme maximale obtenues à partir de la caméra, à partir de la relation de Dorofeev (2007) non modifiée et à partir de la relation de Dorofeev (2007) modifiée dans le cas des grilles G1, G2 et G3.

% H ₂	Grilles	V _{max} exp (m/s)	Dorofeev (2007) ($a^2b = 0,0085$)	Dorofeev (2007) modifiée ($a^2b = 0,0115$)	Ecart (%)
30	G1	43,86	30,12	40,16	+ 9
	G2	48,83	45,82	61,66	- 26
	G3	77,78	70,42	94,79	- 22
40	G1	47,76	34,68	43,34	+ 10
	G2	65,76	52,38	66,00	- 0,36
	G3	107,74	80,01	100,81	+ 7

Tableau 3.24 : Bilan des valeurs de vitesse de flamme expérimentale et des différentes valeurs de vitesse de flamme obtenues avec et sans modification du paramètre a^2b dans la relation de Dorofeev (2007).

Pour la relation de Grune et al. (2003), la nouvelle constante k déterminée à partir des expériences menées avec les grilles G4 et croisées (dispositif se rapprochant le plus des conditions d'application de la relation de Grune et al. (2003)) est égale à 0,0479, ce qui est assez semblable à la valeur de k définie précédemment. Le tableau 3.25 dresse un bilan des vitesses de flamme obtenues avec la caméra, avec la relation de Grune et al. (2003) non modifiée et avec la relation de Grune et al. (2003) modifiée.

% H ₂	Grilles	V _{max} exp (m/s)	Grune et al. (2003) (k = 0,05)	Grune et al. (2003) modifiée (k = 0,0479)	Ecart (%)
30	G4-8C	152,26	161,69	164,25	- 7,88
	G4-4C	215,03	195,48	198,58	+ 7,65
40	G4-8C	196,79	205,51	197,00	- 0,11
	G4-4C	287,92	248,51	238,17	+ 17,28

Tableau 3.25 : Bilan des valeurs de vitesse de flamme expérimentale et des différentes valeurs de vitesse de flamme obtenues avec et sans modification du paramètre k dans la relation de Grune et al.(2003).

Enfin, il est apparu intéressant d'utiliser la relation de Dorofeev (2007) permettant de calculer la surpression en fonction de la vitesse de flamme maximale (P₂) en partant du principe que la surpression est connue et la vitesse de flamme à déterminer. La relation appliquée dans la suite est rappelée ci-dessous :

$$P_2 = \frac{V_f^2}{a_0^2} \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{\bar{R}} - \frac{0,14}{\bar{R}^2} \right)$$

Où : V_f – vitesse de flamme – m/s

a₀ – vitesse du son dans l'air – m/s

σ - coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

$\bar{R}$ - distance adimensionnée ((R x P_{atm}^{1/3}) / E^{1/3}) – (-)

La relation est toujours appliquée dans le cas des grilles G1, G2 et G3. Ce processus permet alors de comparer la vitesse de flamme maximale obtenue à partir de la caméra à la vitesse de flamme maximale déduite des données du capteur de pression à 12 cm de la source d'amorçage. Le tableau 3.26 résume les différentes valeurs de surpressions maximales ainsi que les différentes valeurs de vitesse de flamme pour les deux mélanges hydrogène-air utilisés.

	30 % d'hydrogène			40 % d'hydrogène		
	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	V_F (m/s) via $\Delta P_{\max}$	V_{Fc} (m/s)	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	V_F (m/s) via $\Delta P_{\max}$	V_{Fc} (m/s)
G1	2,1	64,17	43,86	2,6	91,63	47,76
G2	2,5	69,29	48,83	3	98,35	65,76
G3	3,5	82,18	77,78	5,2	128,87	107,74

Tableau 3.26 : Bilan des surpressions maximales et des vitesses de flamme maximales obtenues avec la caméra et avec la relation de Dorofeev (2007) via la pression pour les grilles G1, G2 et G3 et les deux mélanges hydrogène-air utilisés.

Les valeurs de vitesse de flamme maximale obtenues via la surpression surestiment toujours les valeurs de vitesse de flamme obtenues à partir de la caméra. La méthode utilisée donne de meilleurs résultats dans le cas d'un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène que dans le cas d'un mélange hydrogène-air à 40 %. Dans le cas du mélange hydrogène-air à 30 %, la méthode obtient l'écart le plus faible pour les grilles G3 avec 5,66 %. Le capteur utilisé est positionné à 12 cm de la source d'amorçage, ce qui donne une valeur de $\bar{R}$ (0,20 pour le mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène et 0,19 pour le mélange hydrogène-air à 40 % d'hydrogène) en dehors de la plage de validité de la formule ($0,33 < \bar{R} < 3,77$). Néanmoins, l'accord obtenu entre les différentes valeurs de vitesse de flamme maximale est jugé bon.

3.6.3 Apport de la caméra

L'enregistrement vidéo (figure 3.30) a permis de mettre en évidence pour tous les cas de type de grilles testés, deux phénomènes d'évolution du front de flamme :

- o Dans les premiers instants de propagation, le front de flamme se propage de manière hémisphérique centré sur la source d'amorçage.
- o Puis, un effet tunnel apparaît nettement dans le cas de la propagation verticale. En effet, la flamme a tendance à s'engouffrer dans l'espace entre les couches de grilles, et une propagation du front de flamme en tranches successives (image 3) a été observée.

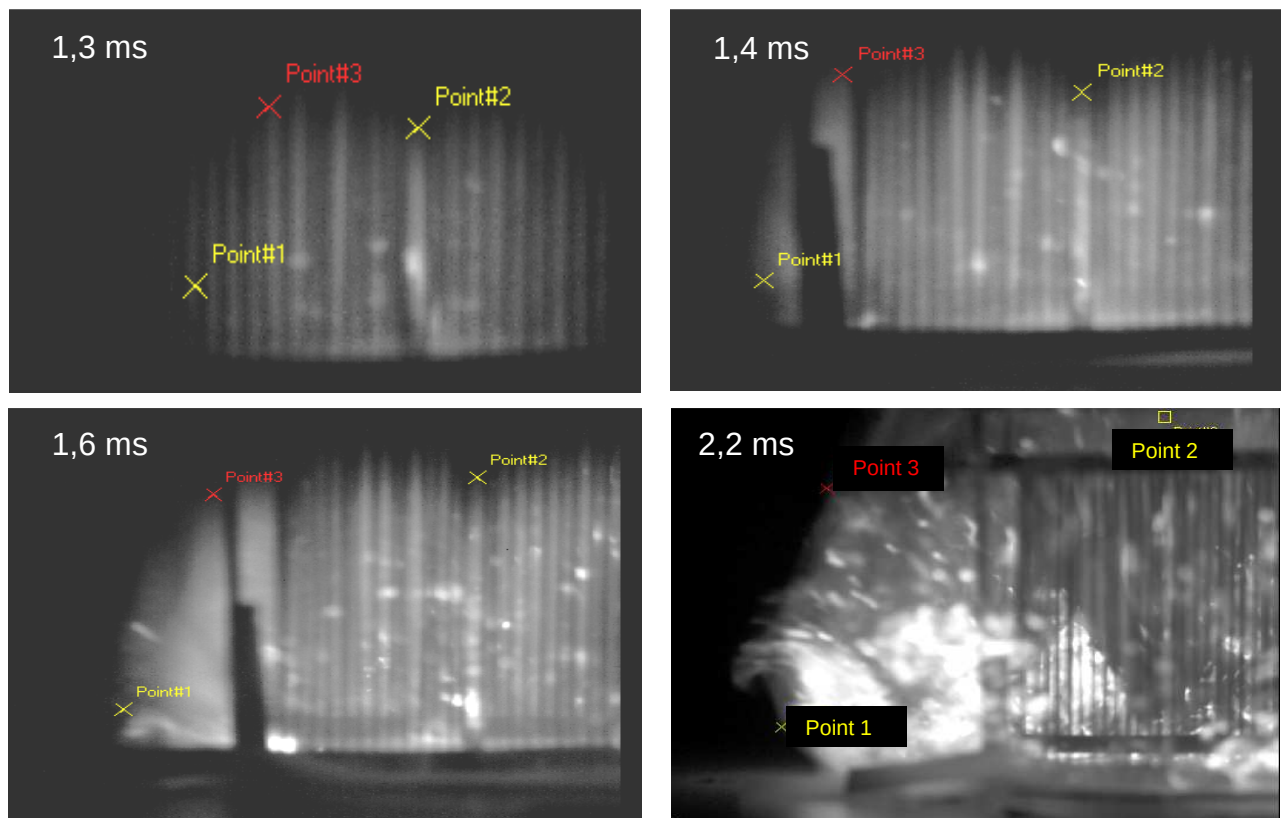


Figure 3.30 : Evolution du front de flamme pour un mélange H_2 /air à 40 % d' H_2 , les grilles G5 (croisées et $D = 4$ mm) (résolution 600 x 800 images et vitesse 6688 images/s).

3.7 Ce qu'il faut retenir

Au niveau des expériences réalisées avec des charges gazeuses hydrogène-air hémisphériques, les points suivants sont à prendre en considération :

- o La propagation du front de flamme est bien hémisphérique et centrée sur la source d'amorçage.
- o Le rayon de flamme atteint bien son maximum en $\sigma^{1/3} \times R_0$, et suit bien une loi en $\sigma \times S_L \times t$.
- o Il apparaît une légère accélération après les premiers centimètres de propagation comme déjà évoqué dans la thèse de Guibert-Duplantier (1993).
- o Dans le cas avec obstacles, les grilles de types G3 et G5 jouent un rôle de « mur ». La flamme ne pouvant pas pénétrer suffisamment en avant dans la structure, elle ne peut pas s'accélérer. Par contre, les grilles de types G1 et G2 accélèrent la flamme.
- o L'évolution du rayon de flamme se fait suivant deux zones bien distinctes, une de l'amorçage du mélange à la rencontre des obstacles (à 7 cm de la source), l'autre dans le champ obstrué. Il a donc pu être défini un coefficient σ_{eff} (valeur corrigée du coefficient d'expansion) caractérisant la propagation de la flamme dans le champ obstrué.

En ce qui concerne les expériences menées sans obstacle et sans ossature, les éléments suivants ont pu ressortir de l'analyse des résultats expérimentaux :

- o Pour les mélanges hydrogène-air à 30 % et 40 % d'hydrogène, le rayon de flamme suit une loi en $\sigma \times S_L \times t$ et les valeurs de vitesses moyennes obtenues sont en adéquation avec les données de la littérature.
- o La propagation du front de flamme est bien hémisphérique dans les premiers temps de propagation. Le mélange hydrogène-air à 25 % d'hydrogène ne peut pas être suivi en raison de sa faible luminosité.

- o Le film PVC servant au confinement initial semble jouer un rôle de « semi-confinement » lors de la déflagration. Dans les premiers temps de propagation le film se gonfle sous l'effet de la mise en mouvement des gaz initialement au repos. Puis, sous l'effet de l'onde de pression, les bandes magnétiques sont expulsées du dispositif expérimental ce qui libère le film plastique et laisse l'onde de pression et le front de flamme se propager dans l'environnement ambiant.

Pour les expériences réalisées en milieu obstrué, les constatations suivantes sont à retenir :

- o Dans le cas des grilles G1, G2 et G3, la détermination de la vitesse de flamme par dérivation du rayon de flamme pour les cas obstrués a été validée. Les valeurs des vitesses moyennes obtenues par les photodiodes et la caméra sont en adéquation.
- o Les valeurs de surpression maximale les plus élevées sont obtenues avec les grilles de type G4 (carré) en raison du meilleur taux de turbulence dû aux effets de bord créés par une maille carrée.
- o L'espace entre couches joue un rôle plus important que la position des grilles G4 et G5 indépendamment de la concentration du mélange hydrogène-air utilisée. Ce phénomène est visible aussi bien au niveau de la surpression maximale que des vitesses de flamme instantanées.
- o La comparaison des vitesses de flamme maximales déterminées à partir de la caméra avec la relation de Dorofeev (2007) représente mieux les valeurs expérimentales pour les grilles G1, G2 et G3. Il a ainsi été défini une nouvelle valeur du paramètre a^2b représentant mieux les expériences entreprises avec ces grilles.
- o La relation de Grune et al. (2003) conduit à une meilleure estimation de la vitesse de flamme dans le cas des grilles G4 et croisées. Dans cette configuration, une nouvelle valeur de la constante k a été déterminée pour

mieux correspondre aux valeurs de vitesse de flamme obtenues expérimentalement.

- o Concernant les grilles G5, leur géométrie ne permet pas d'obtenir une comparaison exploitable avec les relations de la littérature.
- o L'analyse des séquences vidéo montre qu'une propagation verticale en forme de tranches en raison du positionnement des grilles indépendamment du type de grille et du mélange hydrogène-air.

CHAPITRE 4. PROPAGATION DE FLAMME EN MILIEU CONFINE ET OBSTRUE

Cette partie a pour objectif d'identifier l'apport du confinement ou de l'obstruction dans le processus de turbulence favorisant l'accélération de la flamme et donc l'augmentation des valeurs de surpression. En ce qui concerne le processus de dépouillement, il reste identique à celui exposé au chapitre 3, paragraphe 3.1. La seule différence se situe au niveau de l'analyse de la vitesse de flamme. Etant donné que la source d'amorçage est centrée dans la structure, la vitesse de flamme est obtenue en suivant un point sur l'horizontale au niveau des électrodes, soit à 7 cm de hauteur. Pour rappel, le schéma du dispositif avec ossature est présenté à la figure 4.1.

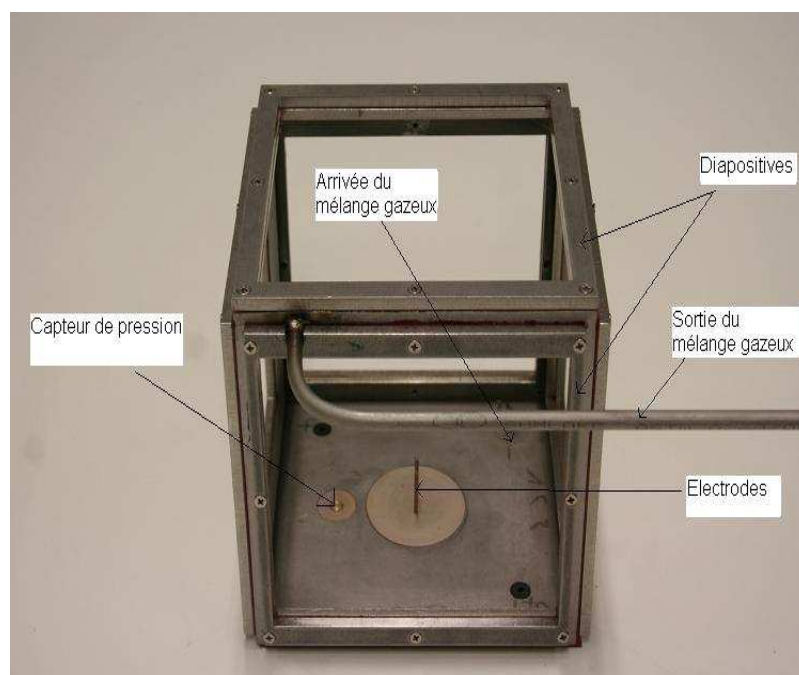


Figure 4.1 : Rappel du dispositif expérimental avec ossature.

4.1 Effets du confinement sans obstruction

Afin d'étudier l'impact du confinement sur la déflagration d'un prémélange hydrogène-air, des plaques pleines ont été ajoutées sur l'ossature (voir chapitre 2, paragraphe 2.3.2). Ces plaques ont permis de tester différentes configurations de confinement récapitulées ci-après :

- o plaques sur le sommet, les deux côtés et l'arrière (PSLA),
- o plaques sur le sommet et les deux côtés (PSL),
- o plaques sur l'arrière et les deux côtés (PAL),
- o plaques sur les deux côtés (PL),
- o plaque uniquement à l'arrière (PA),
- o plaque uniquement sur le sommet (PS).

4.1.1 Evolution de la surpression

Il a été constaté dans un premier temps la présence de deux pics de pression consécutifs au niveau de l'enregistrement du premier capteur de pression (dans l'ossature et à 4 cm de la source). La figure 4.2 montre un exemple d'enregistrement du capteur de pression 1. Ce deuxième pic de pression est caractéristique des explosions à effet d'évent (Bauwens et al. (2010) et Chao et al. (2010) par exemple).

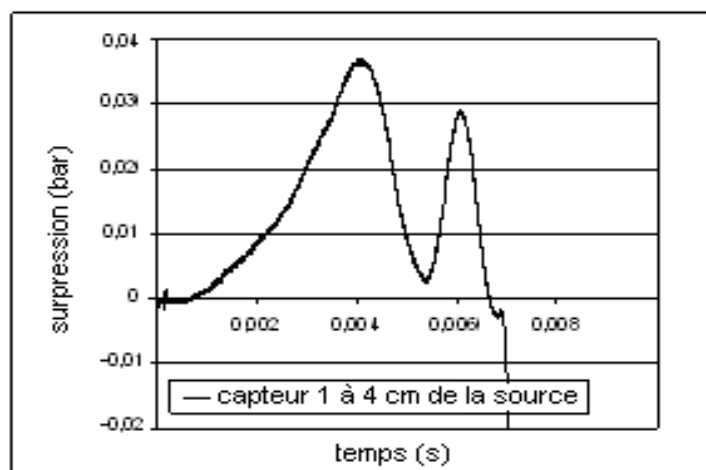


Figure 4.2 : Exemple d'enregistrement de signaux de surpression par le capteur 1 pour les cas d'un confinement PSLA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

L'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance à la source d'amorçage est représentée à la figure 4.3, pour différentes configurations de confinement. Les écarts entre les valeurs de surpression maximale pour une même configuration ne sont pas très importants (0,46 kPa entre le premier et le deuxième capteur dans le cas PA par exemple). De plus, l'écart est mineur entre les valeurs de surpression maximale obtenues quelque soit la configuration testée. L'écart le plus important (0,69 kPa) est obtenu entre la configuration PSLA et PS pour les valeurs de surpression maximale obtenues au premier capteur. Le tableau 4.1 récapitule les différentes valeurs de surpression maximale obtenues à 4 cm de la source d'amorçage.

Le cas le plus confiné PSLA donne donc la valeur de surpression maximale la plus élevée (3,98 kPa) pour le capteur de pression placé dans la structure. Le cas avec le confinement PL donne les valeurs de surpression maximale les moins élevées (2,09 kPa). En ce qui concerne les capteurs placés à partir de 12 cm de la source d'amorçage, les valeurs de surpression maximale sont à peu près identiques, sauf pour le cas PL qui donne des valeurs plus faibles (figure 4.2). Il est à remarquer que contrairement à ce que nous aurions pu attendre, les configurations avec trois plaques de confinement (PAL et PSL) et deux plaques de confinement (PL) ne donnent pas de valeurs de surpression maximale supérieures aux configurations avec une plaque (PA et PS). Au contraire, ces deux dernières configurations aboutissent à des valeurs de surpression maximale plus élevées. L'écart le plus

important se situe entre ces deux configurations et la configuration PL, soit une différence de 1,17 kPa avec la configuration PA et de 1,2 kPa avec la configuration PS.

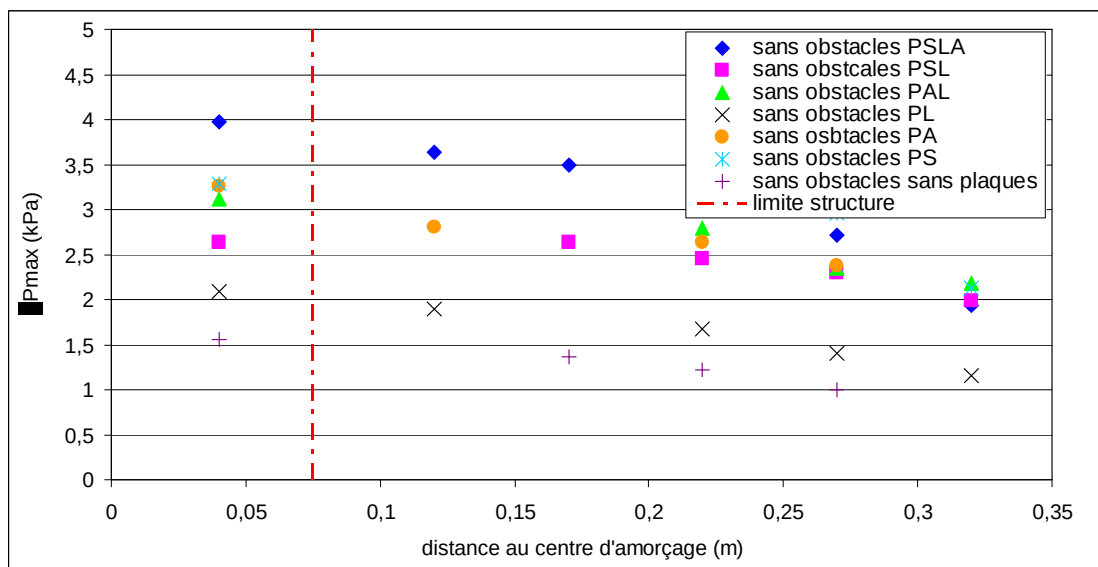


Figure 4.3 : Influence du degré de confinement sur l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour un mélange stœchiométrique.

Confinement	Surpression maximale (kPa)
PSLA	3,98
PSL	2,63
PAL	3,12
PL	2,09
PA	3,26
PS	3,29
Aucun	1,56

Tableau 4.1 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage en fonction du confinement pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Remarque: Au vu des faibles valeurs de pression obtenues dans le cas des expériences avec confinement, le choix des capteurs de pression Kistler 603 B serait sans doute à revoir au profit de microphones plus sensibles.

4.1.2 Evolution de la vitesse de flamme

Pour obtenir la vitesse de flamme deux méthodes ont été utilisées :

- o à partir de l'enregistrement de la caméra,
- o à partir des données des photodiodes.

Les plaques latérales n'étant pas transparentes, le calcul de la vitesse de flamme via la caméra a pu être mené uniquement en l'absence des plaques latérales

Pour le cas sans confinement, il est à constater, dans un premier temps, que les enregistrements vidéo (figure 4.4) montrent une propagation du front de flamme (images 1 et 2) sphérique et augmentant progressivement dans les premiers instants de propagation. Puis, le film PVC est détruit (image 3) et le front de flamme devient turbulent (image 4).

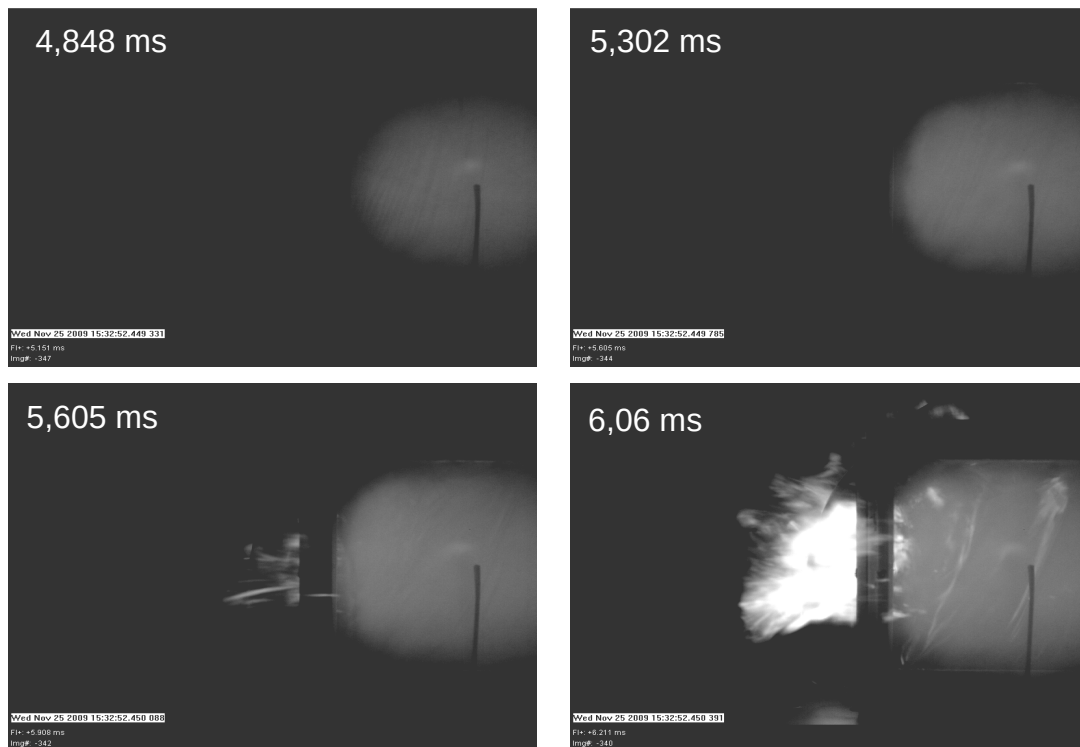


Figure 4.4 : Evolution du front de flamme pour une explosion centrée dans la boîte pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène (résolution de 600 x 800 pixels) sans confinement.

La figure 4.5 représente l'évolution de la vitesse moyenne dans le cas d'un confinement PS (a) et dans le cas d'un confinement PA (b) en fonction de la distance à la source d'amorçage. Il apparaît un changement de pente juste après le passage de l'ossature par la flamme pour le cas du confinement PS (figure 4.5 (a)). En effet, de 1,5 cm à 7,7 cm de la source d'amorçage, la pente caractérisant la droite d'évolution de la vitesse de flamme est de $38,24 \text{ s}^{-1}$. Ce phénomène est nettement visible sur le diagramme de marche de la marche présenté à la figure 4.6. Puis, la pente se raidit pour atteindre $223,01 \text{ s}^{-1}$. Il apparaît donc bien que la structure et/ou le film PVC vont jouer un rôle sur la propagation de la flamme ; la structure au vu des ses dimensions assez importantes (le VBR défini par l'ossature seule étant de 6,9 %) et le film PVC par le fait qu'il ne se déchire pas instantanément (il va avoir tendance à gonfler avant d'éclater). Cependant, contrairement au cas du confinement PS, la pente de la vitesse moyenne (figure 4.5 (b)) reste la même dans ou à l'extérieur de l'ossature et est de l'ordre de $92,7 \text{ s}^{-1}$ pour le cas du confinement PA.

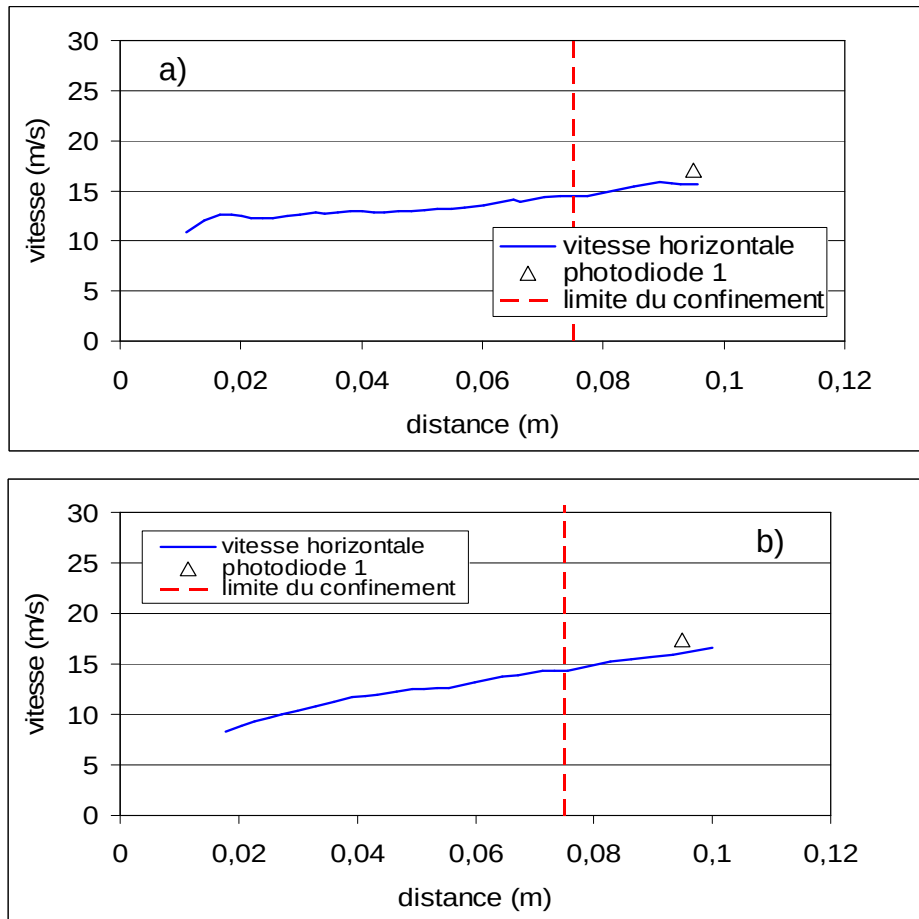


Figure 4.5 : Evolution de la vitesse moyenne dans le cas d'un confinement PS (a) et dans le cas d'un confinement PA (b) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

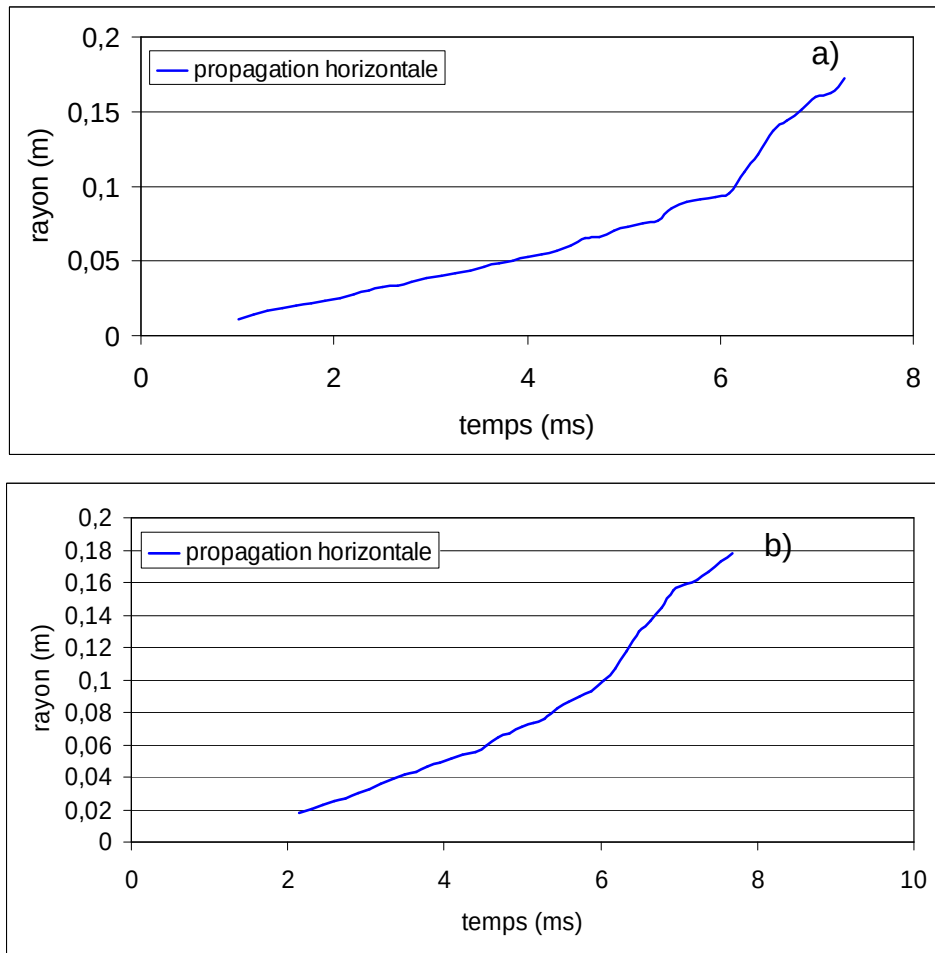


Figure 4.6 : Evolution du rayon de flamme dans le cas d'un confinement PS (a) et dans le cas d'un confinement PA (b) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

De plus, il est à constater une bonne adéquation entre les valeurs fournies par la photodiode et les valeurs de la caméra. Le tableau 4.2 récapitule les différentes valeurs de vitesse moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes pour les cas de confinement PS et PA. L'écart constaté entre la valeur obtenue avec la photodiode et la valeur obtenue avec la caméra est de 1,36 m/s quelque soit le confinement. Dans le tableau ci-dessous est aussi mentionnée la vitesse de flamme moyenne obtenue avec la photodiode pour le cas PSLA (cas aboutissant aux valeurs de surpression maximale les plus importantes). La vitesse de flamme moyenne pour ce cas n'a pas pu être déterminée pour les raisons citées précédemment (plaques latérales présentes et peux d'images en sortie de la structure). La valeur de la vitesse de flamme moyenne pour le cas PSLA obtenue avec la photodiode est bien supérieure aux vitesses caractérisant les autres cas de confinement (PA et PS).

Configuration	Distance (cm)	Vitesse photodiode (m/s)	Vitesse caméra (m/s)
PS	9,5	17,06	15,7
PA	9,5	17,4	16,04
PSLA	9,5	20,29	

Tableau 4.2 : Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme moyenne obtenues par la photodiode et par la caméra pour le confinement PS et PA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

En ce qui concerne la vitesse de flamme instantanée, l'évolution en fonction de la distance au centre d'amorçage se compose de deux parties :

- o une première partie constante de 1,5 cm à 7,5 cm, où la propagation du front de flamme se fait à une vitesse de 15,16 m/s pour le cas du confinement PS et de 18,12 m/s pour le cas du confinement PA,
- o une deuxième partie de 7,5 cm à la fin du suivi du front de flamme, où la vitesse de flamme maximale atteint son maximum à 8 cm de la source d'amorçage et vaut 51,8 m/s pour le cas du confinement PS et 48,5 m/s pour le cas du confinement PA.

La valeur de vitesse de flamme dans la première partie est en adéquation avec la vitesse de flamme d'un mélange stœchiométrique hydrogène-air de la littérature, c'est-à-dire environ 15 m/s (Bavoil (1997)). Comme dans le cas de la vitesse de flamme moyenne, le début de la montée en vitesse du front de flamme se situe juste après la fin de l'ossature à 7,6 cm. Ceci confirme donc l'influence de la structure et/ou du film PVC sur la vitesse de flamme.

Il est à constater que les valeurs de vitesse obtenues dans le cas du confinement PA sont similaires avec celles obtenues dans le cas du confinement PS. En effet, les valeurs obtenues avec la photodiode sont de 17,06 m/s pour le confinement PS et de 17,4 m/s pour le confinement PA, ce qui donne un écart de 0,34 m/s. Pour la vitesse obtenue avec la caméra, elle est de 15,7 m/s dans le cas du confinement PS et

16,04 dans le cas du confinement PA, soit un écart de 0,34 m/s identique à l'écart obtenu pour les photodiodes. En ce qui concerne les valeurs de vitesse de flamme instantanée maximale, la valeur de vitesse la plus élevée est de 51,8 m/s pour le cas du confinement PS. Toutefois l'écart entre les deux vitesses maximales atteintes reste faible et vaut 3,3 m/s, ce qui confirme l'évolution obtenue avec les profils de surpression maximale où les valeurs étaient pratiquement semblables dans les deux cas (3,29 kPa pour le confinement PS et 3,26 kPa pour le confinement PA).

L'analyse en termes de vitesse des images relatives au cas sans confinement donne une vitesse moyenne de 20 m/s dans la boîte. Cette vitesse est légèrement supérieure à la vitesse attendue dans le cas sans obstacle (Bavoil (1997) environ 15 m/s). Toutefois, l'ossature joue un rôle sur la vitesse de flamme en perturbant son écoulement et donc en augmentant sa vitesse. La vitesse en dehors de la boîte n'a pas été mesurée car le front de flamme est beaucoup trop perturbé. Cependant, au vu des acquisitions caméra, il semblerait que la vitesse maximale atteinte soit de l'ordre de 100 m/s.

Remarque : Le suivi de l'évolution du front de flamme est arrêté après sa sortie de l'ossature en raison de la difficulté de distinguer la flamme du film PVC ou des morceaux de film PVC qui brûlaient, ainsi qu'en raison de la forme perturbée par le front de flamme.

4.1.3 Comparaison des valeurs de la surpression maximale aux modèles de la littérature

Un grand nombre de modèle de calcul de pression dans le cas d'explosion en présence d'évent existe comme il a été mentionné dans le chapitre 1, paragraphe 1.5.2. Nous rappelons ici que nous comparerons uniquement nos résultats au modèle de Molkov et al. (2010) ainsi qu'au modèle du NFPA 68 (1998). Les relations utilisées par ces deux modèles sont mentionnées ci-dessous :

o Bartknecht (1993) (NFPA 68 (1998) et EN 14994 (2007)) :

Domaine de validité : $K_g \leq 550 \text{ bar.m/s}$, $0,1 \leq P_v \leq 0,5$, $P_{red} \leq 0,5$ et $1\text{m}^3 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3$.

$$A_v = \left[\frac{0,1265 \log K_g - 0,0567}{P_{red}^{0,5817}} + \frac{0,1754(P_v - 0,1)}{P_{red}^{0,5722}} \right] V^{2/3} \quad (5.1)$$

$$\text{Avec: } K_g = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} . V^{1/3} = 550 \text{ bar.m/s dans cette étude} \quad (5.2)$$

Où : A_v – surface de l'évent – m^2

V – volume de l'enceinte – m^3

p – pression observée dans une enceinte de 20 L pour un mélange hydrogène-air - bar

P_{red} – surpression interne maximale – kPa

P_v – pression d'ouverture de l'évent – kPa

o Molkov et al. (1997 – 2010) :

Les équations ci-dessous sont à appliquer dans le cas où les surfaces d'événements sont connues.

$$Br = \frac{A_v}{V^{2/3}} \times \frac{c_0}{S_0 (E_0 - 1)}$$

$$\frac{\chi}{\gamma} = \left[\frac{(1 + e \times V_{\#}^g) \times (1 + 0,5 \times Br^{0,8})}{1 + \pi_v} \right]^{0,4}$$

$$Br_t = \frac{\sqrt{E_0 / \gamma_u}}{\sqrt[3]{36 \times \Pi}} \times \frac{Br}{\chi / \gamma} \quad (5.3, 5.4 \text{ et } 5.5)$$

Où : A_v – surface de l'événement – m^2

V – volume de l'enceinte – m^3

c_0 – vitesse du son dans les gaz frais – m/s

S_0 – vitesse de combustion laminaire – m/s

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

e et g – constante ($e = 10$ et $g = 0,33$) – (-)

$V_{\#}^g$ - volume de l'enceinte adimensionné ($V / 1 \text{ m}^3$) – (-)

γ_u – rapport des chaleurs spécifiques – (-)

Π - 3,14 – (-)

Π_v – surpression d'ouverture de l'événement adimensionnée – (-)

Une fois le nombre de Bradley turbulent déterminé, la pression maximale est déterminée en appliquant les conditions ci-dessous dépendantes du nombre de Bradley turbulent.

$$\text{Si } \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} < 1 \text{ et } Br_t \geq 2, \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} = 5,6 \times Br_t^{-2,5} \quad (5.6)$$

$$\text{Si } \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} \geq 1 \text{ et } Br_t < 2, \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} = 7,9 - 5,8 \times Br_t^{0,25} \quad (5.7)$$

Où : Π_{red} – surpression adimensionnée – (-)

Π_v – surpression d'ouverture de l'évent adimensionnée – (-)

Le tableau 4.3 récapitule les données nécessaires pour l'application des relations spécifiées ci-dessus.

Configurations	Volume de gaz (m ³)	Mélange (% H ₂)	Surface d'évent (m ²)	Surpression maximale (kPa)	Pression d'ouverture de l'évent (kPa)
PSLA	0,0031535	30	0,0169	3,98	0
PSL	0,0031535	30	0,0338	3,63	0
PAL	0,0031535	30	0,0338	3,12	0
PL	0,0031535	30	0,507	2,09	0
PS	0,0031535	30	0,065	3,29	0
PA	0,0031535	30	0,065	3,26	0

Tableau 4.3 : Données nécessaires à l'application des relations de Molkov et al. (2010) et du NFPA 68 (1998) pour le cas sans obstacle et mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

La figure 4.7 présente les résultats des comparaisons de nos résultats expérimentaux avec les deux modèles cités ci-dessus. Le tableau 4.4 récapitule les valeurs des surpressions obtenues expérimentalement et avec les modèles de calcul. La surface totale pouvant être confinée est de 0,0819 m², ce qui correspond à la pose de plaque sur toutes les faces de l'ossature.

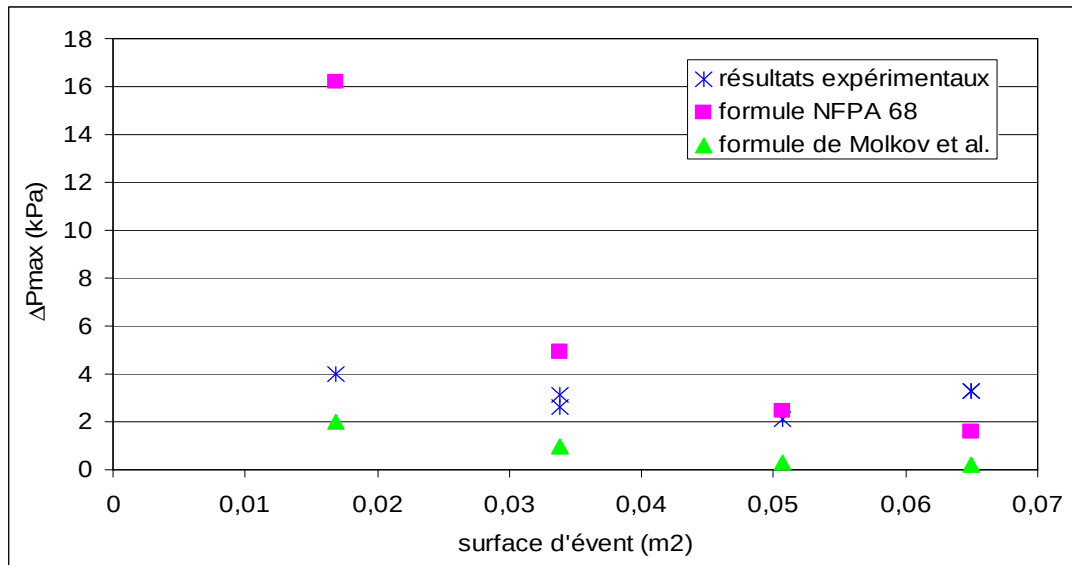


Figure 4.7 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les modèles de Molkov et al. (2010) et du NFPA 68 (1998) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Configurations	Surface d'événements (m2)	ΔPmax expérimental (kPa)	Molkov et al. (2010) (kPa)	NFPA 68 (1998) (kPa)
PSLA	0,0169	3,98	2	16,2
PSL	0,0338	2,63	1	4,9
PAL	0,0338	3,12	1	4,9
PL	0,0507	2,09	0,3	2,4
PS	0,065	3,29	0,2	1,6
PA	0,065	3,26	0,2	1,6

Tableau 4.4 : Récapitulatif des différentes valeurs de pression obtenues expérimentalement et avec les différents modèles.

Il est à constater que les résultats obtenus avec le modèle NFPA 68 (1998) surestiment toujours les résultats expérimentaux. L'erreur moyenne entre les résultats expérimentaux et la relation du NFPA 68 (1998) est de 95 %. L'écart le plus important correspond au cas PSLA, où la relation du NFPA 68 (1998) donne une valeur de 16,2 kPa contrairement à la valeur de la surpression maximale expérimentale de 3,98 kPa.

Concernant la relation de Molkov et al. (2010), les valeurs de surpression obtenues sous-estiment les valeurs expérimentales. L'erreur moyenne entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues à partir de la relation de Molkov et al. (2010) est de 75 %, avec l'écart le plus importants pour les cas PA et PS.

Cependant, les configurations PA, PS et PL ne sont pas assez confinées pour être vraiment considérées comme des configurations d'évent. En effet, dans le cas des configurations PA et PS, seul un côté de l'ossature est confiné. Pour le cas de la configuration PL, seules les deux faces latérales sont confinées, il reste donc 3 faces « libres » par lesquelles la déflagration peut se propager. Si ces trois configurations ne sont pas prises en compte, l'écart moyen passe à 150 % entre nos résultats et le modèle NFPA 68 (1998) et 60 % avec la formule de Molkov et al. (2010). L'augmentation de l'écart moyen pour le cas du modèle NFPA 68 (1998) est due à l'importante surestimation de la valeur de pression pour la configuration PSLA (tableau 4.4). En ce qui concerne l'écart moyen obtenu avec la formule de Molkov et al. (2010), il diminue en raison d'une meilleure estimation des valeurs de la surpression maximale mais qui reste toujours inférieure aux résultats expérimentaux.

4.2 Effets de confinement avec obstruction

L'obstruction ajoutée dans la configuration expérimentale se compose des couches de grilles de mailles rondes de 4 mm de diamètre espacées de 4 mm. Cette configuration a été retenue en raison de son fort taux d'ABR (rapport de blocage) de 42 %.

4.2.1 Evolution de la pression

Il a été constaté dans un premier temps la disparition du second pic de pression au niveau de l'enregistrement du premier capteur de pression (dans l'ossature et à 4 cm de la source). Cette disparition du second pic de pression dans les cas obstrués a été mise en avant par Chao et al. (2010). La figure 4.8 montre un exemple d'enregistrement du capteur de pression 1.

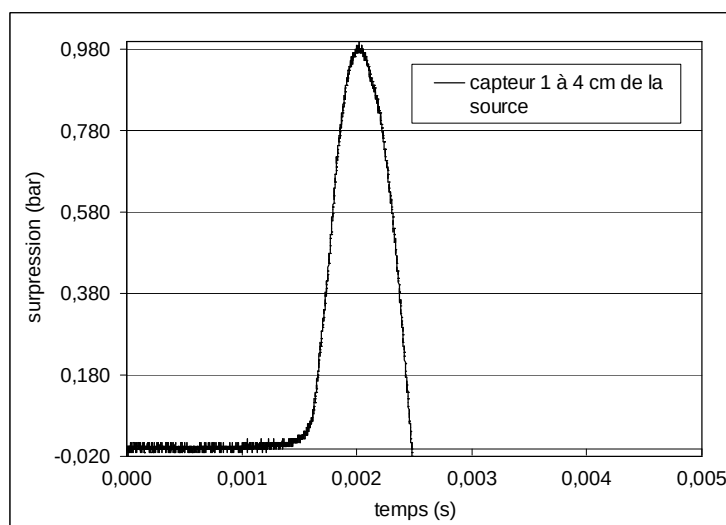


Figure 4.8 : Exemple d'enregistrement de signaux de surpression par le capteur 1 pour les cas d'un confinement PSLA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

L'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance à la source d'amorçage dans les cas confinés et obstrués est représentée à la figure 4.8. La surpression maximale la plus importante est obtenue avec le cas le plus confiné (PSLA) avec 108,44 kPa pour le capteur 1 à 4 cm de la source. La configuration

donnant la valeur de surpression maximale la moins élevée (63,25 kPa) est celle sans confinement (uniquement en présence des couches de grilles). Il apparaît que les obstacles de type plaque G5 (alignées et espacées de 4 mm) placées à l'intérieur de l'ossature ont un effet plus important que l'ossature elle-même.

En ce qui concerne les autres types de confinement étudiés, plus le confinement est important, plus les valeurs de surpression maximale vont être importantes (voir figure 4.9 et tableau 4.5). De plus, en comparant les confinements PSL et PAL, il apparaît que le confinement PSL conduit à des valeurs de surpression maximale plus élevées que le confinement PAL (101,19 kPa pour le confinement PSL et 84,05 kPa pour le confinement PAL). Il semblerait que l'ajout d'une plaque au niveau supérieur de la configuration a plus d'impact sur les valeurs de surpression maximale que l'ajout d'une plaque à l'arrière du dispositif. Cette tendance est confirmée avec les cas PS et PA où le confinement PS donne des valeurs de surpression maximale plus élevées que le confinement PA (68,38 kPa pour le confinement PS et 67,05 kPa pour le confinement PA). Pour le confinement PL, les valeurs se calent entre les valeurs obtenues avec 3 plaques (type PAL et PSL) et les valeurs de surpression maximale obtenues avec les configurations à 1 plaque (PA et PS), la valeur de la surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage étant de 83,45 kPa.

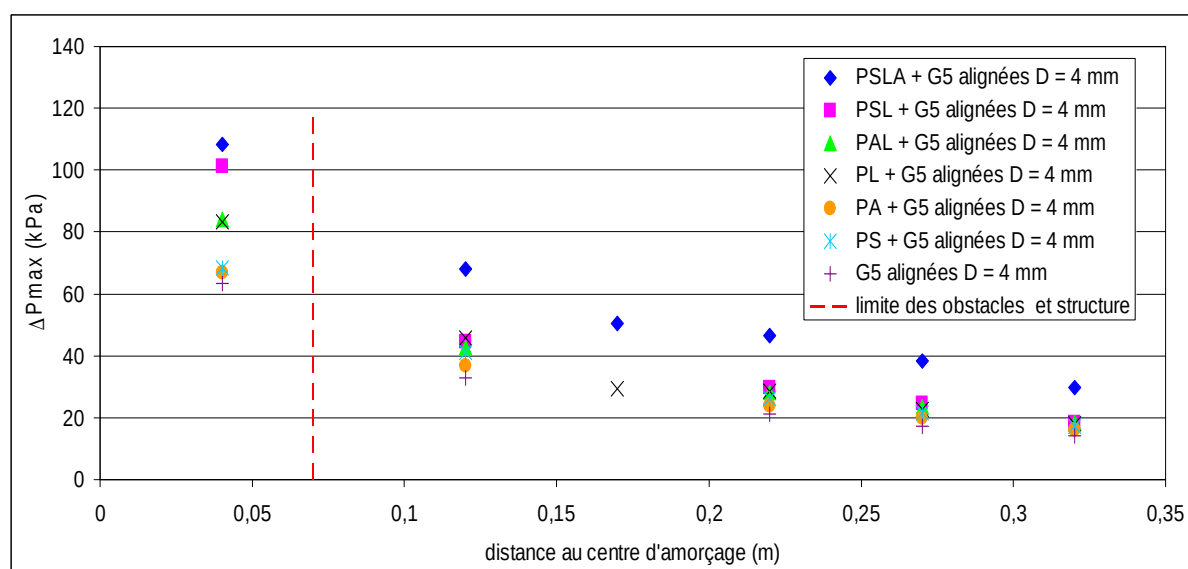


Figure 4.9 : Influence du degré de confinement et de la présence d'un type donné d'obstacles (grilles de mailles rondes de 4 mm de diamètre, alignées et espacées de 4 mm) sur l'évolution de la surpression maximale en fonction de la distance au centre d'amorçage pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Toutefois, même le plus important confinement (PSLA) avec l'ajout des couches de grilles type G5 et espacées de 4 mm ne parvient pas à produire une transition de la déflagration à la détonation. En effet, le temps de montée de l'onde de surpression maximale est de 0,554 ms ce qui est beaucoup trop long pour une détonation (de l'ordre de la microseconde). Ceci semble être dû au fait que notre zone obstruée ne mesure que 7 cm (de la source d'amorçage à une extrémité de la configuration obstruée). De plus, une fois que le film plastique a été rompu, la flamme se retrouve dans un environnement libre car aucun obstacle n'a été placé à l'extérieur du confinement. Dans un tube de diamètre 49 mm muni d'une spire de Schelkin de diamètre 33 mm et de longueur 64 cm ($ABR = 0,55$), Rocourt (2004) montre que la transition se produit à environ 30 à 40 cm de l'extrémité du tube et donc de la source d'amorçage pour un mélange hydrogène-air à la stœchiométrie. Il est donc important de noter que la transition a lieu dans la spire de Schelkin et qu'il faudrait environ 5 fois la longueur d'obstruction des expériences présentées dans ce mémoire.

La comparaison des valeurs de surpression maximale obtenues avec obstacles (figure 4.9) et sans obstacle (figure 4.3) montre que l'ajout des couches de grilles dans l'ossature entraîne une augmentation des valeurs de la surpression maximale. Le tableau suivant (tableau 4.5) récapitule les différentes valeurs de surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage pour les deux cas considérés.

Confinement	Surpression maximale (kPa)	
	Obstrué	Non obstrué
PSLA	108,44	3,98
PSL	101,19	2,63
PAL	84,05	3,12
PL	83,45	2,09
PA	67,05	3,26
PS	68,38	3,29
Aucun confinement	63,25	1,56

Tableau 4.5 : Récapitulatif des valeurs de surpression maximale à 4 cm de la source d'amorçage en fonction du confinement pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Au vu de l'écart de pression pour le cas PSLA entre la configuration obstruée et la configuration non obstruée (respectivement 108,44 kPa et 3,78 kPa), l'apport des couches de grilles paraît produire plus d'effets sur les valeurs de surpression maximale obtenues que l'ajout de confinement. Ce phénomène est vérifiable sur toutes les valeurs de surpression maximale obtenues.

De plus, pour passer de la valeur de surpression dans le cas non obstrué à la valeur de surpression dans le cas obstrué, il faut multiplier les valeurs par un coefficient moyen de 30. L'écart le plus important correspond au cas sans plaques de confinement où le facteur de passage est de 40.

Dans le cas d'explosion avec présence d'évent et d'obstacles, aucun des deux modèles (Molkov (2010) et NFPA 68 (1998)) décrits dans le paragraphe 4.1.1 n'est applicable. En effet, ces deux modèles ne prennent pas en compte la présence d'obstacles dans le confinement.

4.2.2 Evolution de la vitesse de flamme

Comme dans le cas des expériences confinées et sans obstacle, les vitesses de flamme sont déterminées :

- o à partir de l'enregistrement de la caméra,
- o à partir des données des photodiodes.

Comme mentionné dans le paragraphe 4.1.2, seuls les cas où les plaques latérales n'étaient pas présentes ont été analysés.

La figure 4.10 représente l'évolution de la vitesse moyenne de flamme dans le cas non confiné (a), dans le cas d'un confinement PS (b), et dans le cas d'un confinement PA (c) en fonction de la distance à la source d'amorçage.

Le profil de la vitesse de flamme moyenne se compose d'une première partie croissante :

- o de 3,5 cm à 14,5 cm avec une pente de $461,45 \text{ s}^{-1}$ pour le cas sans confinement,
- o de 5,3 cm à 15,2 cm avec une pente de $429,75 \text{ s}^{-1}$ pour le cas du confinement PS,
- o de 1 cm à 14 cm avec une pente de $519,23 \text{ s}^{-1}$ pour le cas du confinement PA.

La seconde partie de l'évolution du profil de la vitesse de flamme moyenne correspond à sa phase de stabilisation où la vitesse maximale moyenne est atteinte : 78,5 m/s pour le cas sans confinement, 80 m/s pour le cas du confinement PS et 77,5 m/s pour le cas du confinement PA.

Contrairement au cas sans obstacle, le passage de la flamme à travers l'ossature pour se retrouver en champ libre n'est pas marqué par un changement dans la pente du profil de vitesse moyenne en fonction de la distance. Ceci tend à confirmer que les obstacles ont une plus grande influence sur la vitesse de flamme et donc sur la surpression maximale que l'ossature elle-même.

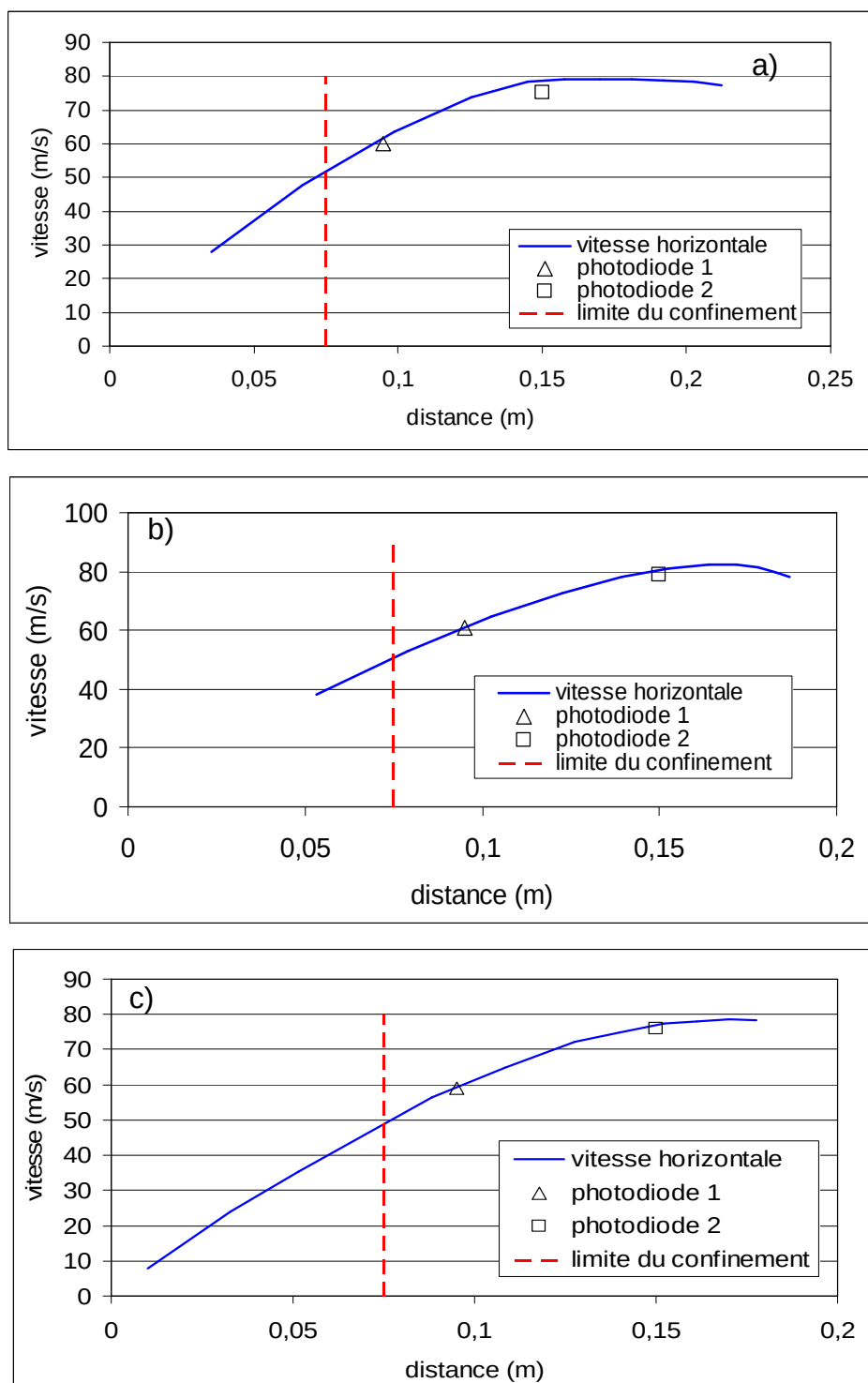


Figure 4.10 : Evolution de la vitesse moyenne sans confinement (a), dans le cas du confinement PS (b), et dans le cas du confinement PA (c) pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

La comparaison avec les photodiodes donnent de très bons résultats quelque soit la configuration étudiée. Le tableau 4.6 récapitule les différentes valeurs de vitesse de flamme moyenne obtenues avec la caméra et avec les photodiodes. Les valeurs obtenues avec les photodiodes sous-estiment les valeurs obtenues avec la caméra contrairement au cas sans obstacle. Les écarts entre les vitesses déterminées par les photodiodes et les vitesses déterminées à partir des données de la caméra sont de :

- o 1,47 m/s pour la photodiode 1 et 1,83 m/s pour la photodiode 2 dans le cas sans confinement,
- o 0,2 m/s pour la photodiode 1 et 1,23 m/s pour la photodiode 2 dans le cas du confinement PS,
- o 0,28 m/s pour la photodiode 1 et de 0,9 m/s pour la photodiode 2 dans le cas du confinement PA.

Comme pour la partie sans obstacle, les données obtenues avec les photodiodes pour le cas de confinement PSLA sont reportées dans le tableau. Il apparaît que les valeurs de vitesse de flamme moyenne pour le cas PSLA ne sont pas en accord avec l'évolution de la surpression maximale : les valeurs de vitesse de flamme moyenne sont inférieures aux autres cas de confinement. Cependant, toutes les valeurs de vitesses de flamme sont du même ordre de grandeur (58,87 m/s). Il est donc possible que cet différence d'évolution soit due à l'incertitude relative à la mesure par les photodiodes ou à la valeur seuil fixée qui ne serait pas optimale dans ce cas.

Configurations	Distance (cm)	Vitesse photodiode (m/s)	Vitesse caméra (m/s)
Sans confinement	9,5	59,97	61,80
	15	75,15	76,62
PS	9,5	60,74	60,94
	15	79,11	80,34
PA	9,5	58,9	59,18
	15	75,99	76,89
PSLA	9,5	55,88	
	15,5	78,10	

Tableau 4.6 : Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme moyenne obtenues par la photodiode et par la caméra pour le cas sans confinement, du confinement PS et du confinement PA pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Pour le cas sans confinement, la vitesse de flamme instantanée atteint sa valeur maximale à 8,3 cm de la source (soit à 0,8 cm de la fin de l'ossature) et vaut 212,82 m/s. Puis, la vitesse de flamme instantanée atteint un palier à 16,3 cm pour 81,5 m/s et se stabilise aux environs de 75 m/s. Le changement de comportement dans la vitesse moyenne de flamme (figure 4.8), c'est-à-dire le passage d'une progression augmentant constamment à une progression se stabilisant, correspond aux changements de profil de la vitesse instantanée qui cesse de décroître pour se stabiliser.

Pour le cas du confinement PS, la valeur maximale est atteinte à 6,6 cm de la source d'amorçage et est égale à 256,6 m/s. Ce phénomène paraît surprenant car dans ce cas la vitesse de flamme maximale instantanée est atteinte dans la partie obstruée et non à la sortie du champ d'obstacles. Cependant, le champ d'obstacles se termine à une distance de 7,5 cm et l'image suivant celle donnant notre vitesse maximale se situe à une distance de 9 cm de la source d'amorçage. Il se peut donc que la vitesse maximale réelle soit atteinte entre ces deux images et bien à la sortie du champ d'obstacles.

La vitesse de flamme instantanée maximale dans le cas du confinement PA vaut 366,15 m/s et est atteinte juste avant la sortie du champ d'obstacles à 7 cm. Une fois la vitesse de flamme maximale atteinte et la flamme sortie du champ d'obstacles, la vitesse de flamme décroît.

Au vu de l'évolution de toutes ces vitesses, il apparaît que le cas du confinement PA avec obstacles conduit à une valeur de vitesse instantanée de flamme maximale plus importante que les deux autres configurations (366,15 m/s pour le confinement PA contre 256,6 m/s pour le confinement PS et 212,82 m/s pour le cas sans confinement). Le tableau 4.7 récapitule les valeurs de vitesse maximale ainsi que les valeurs de surpression maximale trouvées dans les différents cas analysés.

Configurations	$\Delta P_{\max}$ (kPa)	$V_{\max}$ (m/s)
Sans confinement	63,25	212,82
PA	67,05	366,15
PS	68,38	256,6

Tableau 4.7: Récapitulatif des valeurs de la vitesse de flamme maximale et de valeurs de surpression maximale pour un mélange hydrogène-air à 30 % d'hydrogène.

Il est à constater que dans le cas du confinement PA et du confinement PS, les vitesses ne sont pas en bon accord avec l'évolution donnée par l'analyse de la surpression maximale. Néanmoins, au vu du faible écart de pression entre le cas du confinement PA et du confinement PS et le processus d'obtention de la vitesse de flamme, ces résultats sont à regarder avec prudence. En effet, pour la vitesse de flamme, les points sont positionnés manuellement le long du front de flamme, une incertitude sur leur positionnement se répercutera sur la valeur de la vitesse.

En effet, si nous nous référons aux valeurs données par les photodiodes en termes de vitesse moyenne, l'évolution est la même que dans le cas de la pression, c'est-à-dire, le confinement PS donnant des vitesses de flamme moyenne plus élevées que le confinement PA. Par exemple, si nous prenons le cas de la photodiode 1, elle donne une valeur de vitesse de 60,74 m/s dans le cas PS et de 58,9 m/s dans le cas PA. Les vitesses obtenues par la caméra pour une même position vont aussi dans ce sens avec une vitesse de 60,94 m/s pour le cas PS et 59,18 m/s pour le cas PA.

4.3 Ce qu'il faut retenir

Durant l'analyse effectuée dans ce chapitre, les points suivants ont pu être mis en évidence :

- o Dans le cas des expériences réalisées sans obstacle dans la partie confinée, nous avons pu constater la présence d'un second pic de pression consécutif au pic de pression principal au niveau du capteur 1.
- o Dans le cas des expériences où des obstacles sont présents dans la partie confinée, le second pic consécutif au pic de pression principal au niveau du capteur 1 n'apparaît plus. Les obstacles jouent donc un rôle assez important lors de ces expériences. L'ajout d'obstacles dans la partie confinée du dispositif entraîne une augmentation significative des valeurs de surpression obtenues comparé aux cas sans obstacle.
- o En ce qui concerne les comparaisons avec les modèles de calcul de pression en présence d'évent, il apparaît une importante sur-prédiction du modèle NFPA 68 (1998) surtout au niveau du cas du confinement PSLA. Dans le cas de la formule de Molkov et al. (2010), les résultats sous-prédisent les valeurs expérimentales mais dans des proportions moindres que la sur-prédiction du modèle NFPA 68 (1998).
- o Les confinements PA, PS et PL envisagés ne peuvent pas être considérés comme des cas d'évent, en raison de la trop grande surface non confinée.

L'analyse des vitesses reste à prendre avec prudence en raison du processus de traitement des images pour obtenir la vitesse de la flamme. En effet, un point repère sur le contour du front de flamme est choisi et ce point est repositionné manuellement sur toutes les images. Il apparaît donc une certaine incertitude sur le bon positionnement du point permettant d'obtenir la distance.

CONCLUSION

o Synthèse

Devant l'intérêt grandissant suscité par l'utilisation de l'hydrogène en tant que possible vecteur énergétique du futur, il est important de constituer une solide base de données concernant les explosions de mélange hydrogène-air. En effet, si une fuite de gaz se produit, l'une des conséquences possibles est l'explosion du nuage gazeux. Dans cette optique d'amélioration de la base de données concernant les explosions de mélange hydrogène-air et donc d'amélioration de la sécurité de l'hydrogène, différentes séries d'expériences ont été entreprises à l'échelle du laboratoire. Les dispositifs expérimentaux réalisés au cours de cette étude ont permis d'étudier les phénomènes suivants :

- o la propagation de flamme en champ libre avec le dispositif de l'hémisphère aqueux et le dispositif sans ossature,
- o la propagation de flamme en champ obstrué suivant deux types de configuration d'obstruction : i) obstruction en dehors du confinement initial (hémisphère aqueux), et ii) obstruction à l'intérieur du confinement initial (sans ossature),
- o la propagation de la flamme en milieu confiné pour obtenir des configurations de type évent,
- o la propagation de flamme en milieu confiné et obstrué pour essayer de se rapprocher des configurations industrielles.

Tous les résultats obtenus ont été analysés en termes de surpression maximale et de vitesse de flamme. Deux méthodes de détermination de la vitesse de flamme ont été utilisées : i) les photodiodes, et ii) la caméra rapide.

Dans un premier temps, les expériences menées avec l'hémisphère aqueux ont permis de valider la détermination des vitesses de flamme avec la caméra rapide. En effet, une très bonne adéquation a été établie entre les vitesses moyennes obtenues avec les photodiodes et avec la caméra. De plus, les valeurs de vitesse de flamme déterminées avec la caméra dans le cadre de l'hémisphère aqueux sont en bon accord avec les résultats de la littérature (Guibert-Duplantier (1993)). La visualisation des enregistrements vidéo montre que la propagation du front de flamme est bien hémisphérique et centrée sur la source d'amorçage. Dans tous les cas de rayon d'hémisphère aqueux employé, il est apparu une légère accélération après les premiers centimètres de propagation comme déjà évoqué dans la thèse de Guibert-Duplantier (1993). Enfin, l'étude de l'influence des obstacles (rayon d'hémisphère de 7 cm) sur la propagation de la flamme montre que les grilles de types G1 (maille carrée de 25 mm x 25 mm) et G2 (maille carrée de 13 mm x 13 mm) accélèrent la flamme. En effet, avec ces deux types de grille, la flamme se propage à l'intérieur de la zone obstruée contrairement aux autres grilles employées (grilles de type G3 (maille carrée de 6,4 mm x 6,4 mm), G4 (maille carrée de 8 mm x 8 mm) et G5 (maille ronde de diamètre 4 mm)) qui exercent le rôle d'un mur. L'évolution du rayon de flamme en présence d'obstacles se fait suivant deux pentes bien distinctes, une de l'amorçage du mélange à la rencontre des obstacles (à 7 cm de la source), l'autre dans le champ obstrué.

Dans un second temps, les expériences sans ossature et sans obstruction ont permis de mettre en évidence que le film PVC servant au confinement initial jouait un rôle sur l'évolution globale de la déflagration en créant un effet de « semi confinement » entraînant une chasse des gaz une fois le film PVC rompu. La propagation du front de flamme est bien hémisphérique dans les premiers temps de propagation et les vitesses de flamme déterminées sont en accord avec la littérature. Cependant, le mélange hydrogène-air à 25 % d'hydrogène n'a pas pu faire l'objet d'une analyse des enregistrements vidéo en raison de sa faible luminosité.

Puis, l'ajout des grilles de type G1, G2 et G3 a permis de valider le processus de détermination de la vitesse de flamme par dérivation du rayon de flamme pour les cas obstrués. La comparaison de tous les types de grilles insérées dans le dispositif expérimental (G1, G2, G3, G4 et G5) a mis en évidence des valeurs de pression plus

élevées dans le cas des grilles de type G4 et G5 dû au taux d'ABR (Area Blocage Ratio) plus important. Les valeurs de pression les plus élevées sont obtenues avec les grilles de type G4 en raison du meilleur taux de turbulence dû aux effets de bord créés par une maille carrée. L'obtention de la vitesse de flamme maximale par la caméra a permis de comparer les résultats de cette étude aux modèles de la littérature existants : i) Dorofeev (2007), et ii) Grune et al. (2003). Une constante k modifiée a été définie pour l'équation de Grune et al. (2003) dans le cas des grilles G4 croisées. Pour la relation de Dorofeev (2007), le coefficient a^2b a pu être adapté à cette étude pour le cas des grilles G1, G2 et G3.

Dans le cas des expériences avec confinement, les obstacles jouent un rôle important aussi bien sur la forme du signal de pression en lui-même que sur les valeurs de pression. En effet, l'ajout d'obstacles dans le confinement fait disparaître le second pic consécutif au pic de pression principal au niveau du capteur 1 (Chao et al. (2010)). De plus cet ajout d'obstacles fait augmenter de façon significative les valeurs de pression obtenues comparées aux cas sans obstacle. En ce qui concerne les comparaisons avec les modèles de calcul de pression en présence d'évent, il apparaît une importante sur-prédiction du modèle NFPA 68 (1998) surtout au niveau du cas du confinement PSLA. Dans le cas de la formule de Molkov et al. (2010), les résultats sous-prédisent nos valeurs expérimentales mais dans des proportions moindres que la sur-prédiction du modèle NFPA 68 (1998). Les confinements PA, PS et PL envisagés ne peuvent pas être considérés comme des cas d'évent, en raison de la trop grande surface non confinée.

Cependant, notre partie sur l'analyse des vitesses reste à prendre avec prudence en raison du processus de traitement des images pour obtenir la vitesse de la flamme.

o Perspectives

Cette étude offre des perspectives intéressantes et nécessaires à développer afin d'accroître les données disponibles et d'étoffer les types de configurations existantes.

L'analyse des résultats sans obstacle et sans ossature montrent que le film PVC a tendance à créer un effet de semi-confinement. Il sera donc utile de modifier le dispositif expérimental utilisé pour permettre le déchirement du film PVC juste avant l'amorçage du mélange gazeux.

De plus, il conviendrait de pouvoir changer la position de la source d'amorçage et de pouvoir la placer en n'importe quel point du dispositif expérimental. Nous avons pu tester deux position de la source : i) au niveau du sol (de la table), et ii) au milieu du dispositif (à 7 cm de la table). Il faudrait pouvoir placer cette source en bordure du dispositif pour que la flamme dispose de plus de distance de propagation. Ceci serait intéressant surtout lors de l'insertion d'obstacles où la flamme pourrait se propager sur le double de distance obstruée qu'à l'heure actuelle. De plus, la source d'amorçage ponctuelle utilisée dans cette étude pourrait être remplacée par une ligne d'amorçage ce qui amènerait à allumer un volume de gaz plus important. L'amorçage pourrait se faire par multipoints synchronisés lors du déclenchement de la source ou par surface chaude.

Dans les premiers essais, il a été envisagé de placer des zones obstruées à l'extérieur des dispositifs expérimentaux avec et sans ossature pour couvrir une plus grande distance de propagation en terme d'obstruction. Cependant, ces tentatives ont été infructueuses en raison du comportement du film plastique qui se plaquait sur les structures obstruées positionnées autour du confinement initial. Il serait assez important de trouver une solution technique à ce problème, ce qui permettrait d'encadrer le confinement initial de plusieurs zones d'obstructions et ainsi de créer plus de turbulences et pourquoi pas d'engendrer une TDD.

Lors des essais avec confinement, les plaques utilisées étaient des plaques pleines et opaques. Nous n'avons donc pas pu suivre la propagation du front de flamme à l'intérieur de la boîte pour plus de la moitié des configurations envisagées. Il serait donc utile de fabriquer des plaques transparentes pour visionner l'ensemble de la propagation de flamme dans les environnements confinés.

Enfin, il serait intéressant d'étudier la propagation de flamme dans un mélange hydrogène-air non uniforme obstrué afin de se rapprocher des scénarii accidentels. Le mélange non uniforme peut être obtenu à partir d'un jet d'hydrogène pur à faible vitesse, pour éviter les zones de fortes turbulences. Le nuage ainsi créé peut alors être amorcé dans les zones d'inflammabilité. Sur le modèle des travaux de Daubech (2008), des gradients de concentration peuvent également être créés à partir de deux zones distinctes dans l'ossature. Chaque zone contient initialement un mélange gazeux hydrogène-air donné, ces zones sont mises ensuite en contact et un amorçage est apporté après un temps de diffusion contrôlé.

ANNEXES

Annexe 1. La propagation de flamme en milieu libre et non confiné	181
Annexe 2. Détails menant à l'expression de la vitesse de Dorofeev	191
Annexe 3. Les méthodes de calcul des explosions à effet d'évent.....	197
Annexe 4. Protocole d'utilisation du banc de déflagration	205
Annexe 5. Caractéristiques des gaz utilisés	207
Annexe 6. Fiches techniques de l'instrumentation de la chaîne d'acquisition	209

Annexe 1. La propagation de flamme en milieu libre et non confiné

Les champs de pression et de vitesse générés par la propagation d'une déflagration sphérique divergente peuvent être précisément calculés dès lors que la célérité du front de flamme et le rapport d'expansion du mélange gazeux considéré sont connus. La variation de la pression par rapport à la pression atmosphérique ambiante P_0 , à une distance supérieure au rayon de la flamme, est de la forme ci-dessous (figure A1.1) :

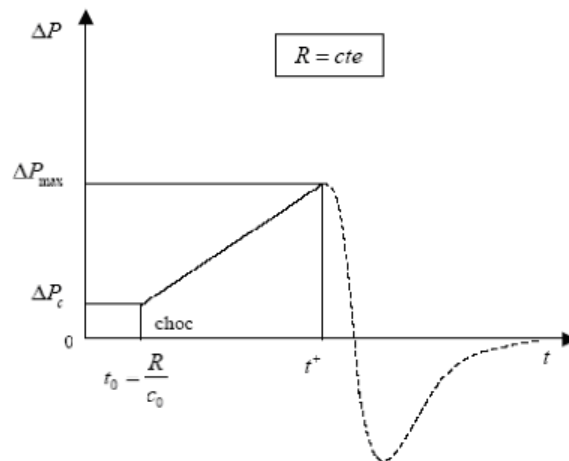


Figure A1.1 : Profil de l'onde de pression produite par une déflagration de célérité D constante en fonction du temps à une distance R fixée.

Dès que l'onde de tête arrive à l'abscisse R (au temps t_0) la pression augmente de façon linéaire jusqu'à l'arrêt de la flamme qui se produit au temps :

$$t^+ = R_0 \alpha^{-1/3} D^{-1} \quad (\text{A1.1})$$

Où : R_0 – rayon initial du mélange gazeux – m

D – célérité de la déflagration – m/s

α - rapport d'expansion – (-)

La flamme atteint son rayon maximal pour :

$$R_{\max} = R_0 \alpha^{-1/3} \quad (\text{A1.2})$$

Où : R_0 – rayon initial du mélange gazeux – m

α - rapport d'expansion (ρ_b / ρ_f) – (-)

Le ralentissement puis l'arrêt de la flamme en fin de propagation entraîne une chute rapide de la pression. L'évolution de la dépression ne peut être modélisée, mais les résultats expérimentaux montrent que l'amplitude de la dépression maximale est du même ordre que celle de la surpression positive.

Si la distribution de la pression est maintenant examinée à un instant t , le profil de la pression devient le suivant (figure A1.2) :

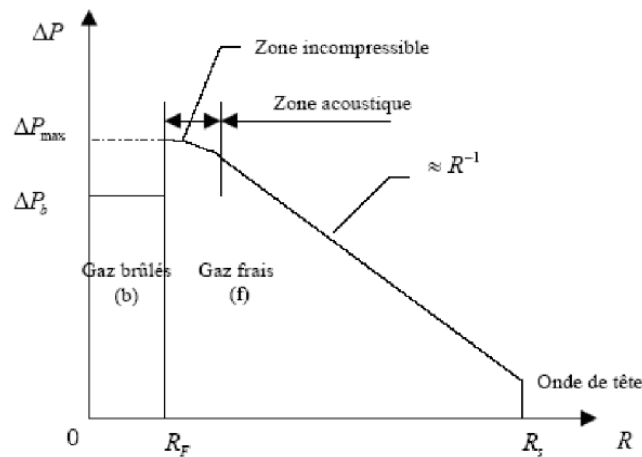


Figure A1.2 : Profil de la variation de pression induite par l'explosion d'une charge sphérique non confinée, amorcée au centre de la charge, en fonction de la distance R à un instant t donné, pour une déflagration de célérité D constante.

Leyer et Deshaies (Leyer (1982), Deshaies (1981)) ont apporté les développements les plus significatifs. Un modèle analytique du premier ordre permettant de prédire la propagation de l'onde de pression dans l'environnement a été développé. Une solution analytique complète a été établie par Deshaies (1981) pour des cas de flammes lentes ($M_F < 0.35$ soit $D < 100$ m/s). Cette solution a été étendue au cas des flammes rapides ($M_F \rightarrow \infty$) par Cambray et al. (1978). Ces solutions ont permis de mettre en évidence trois zones engendrées par l'écoulement généré par une déflagration à célérité constante :

- 1) La région des gaz brûlés délimitée par le front de flamme de rayon R_F ,
- 2) La région des gaz frais délimitée par le front de flamme et l'onde sphérique de tête de rayon R_S ($R_F < R < R_S$). Les gaz frais sont mis en mouvement par l'onde de tête se propageant à la vitesse du son dans les gaz frais.
- 3) Une région de gaz frais au repos au delà de l'onde de tête ($R > c_0 t$).

La zone 2 (gaz frais) peut elle-même être découpée en trois zones :

- 1) Une couche mince voisine du piston ($R \sim R_F$) où l'écoulement est considéré comme incompressible.
- 2) Une zone centrale où les champs hydrodynamiques sont de type acoustique.
- 3) Une zone mince non linéaire (discontinuité) assurant la transition entre les gaz en mouvement et le milieu au repos.

A1.1 Modélisation des déflagrations à vitesse constante

L'écoulement engendré par une flamme peut être assimilé à l'écoulement produit par un piston sphérique semi-perméable P se déplaçant à une vitesse u_p fonction de D (célérité de la déflagration). Dans cette partie, la célérité D de la déflagration est considérée constante, la vitesse du piston est donc aussi considérée comme constante et ces deux vitesses sont reliées par la relation suivante :

$$u_p = D \times (1 - \alpha) \text{ avec } \alpha = \frac{\rho_b}{\rho_f} \quad (\text{A1.3})$$

Où : u_p – vitesse du piston – m/s

D – célérité de la déflagration – m/s

α - rapport d'expansion – (-)

Les expressions de champ de pression et de vitesse établies par Deshaies (1981) sont données ci-dessous :

- o Au voisinage du front de flamme ($R \sim R_F$) : écoulement incompressible

$$\Delta P (R,t) = 2 \rho_0 D^2 (1 - \alpha) \left(\frac{R_F}{R} \right) \left[1 - \frac{1 - \alpha}{4} \left(\frac{R_F}{R} \right)^3 \right] \quad (A1.4)$$

$$u (R,t) = D (1 - \alpha) \left(\frac{R_F}{R} \right)^2 \quad (A1.5)$$

- o Loin du front de flamme ($R \gg R_F$) : écoulement acoustique

$$\Delta P (R,t) = 2 \rho_0 D^2 (1 - \alpha) \left(\frac{R_F}{R} \right) \left[1 - \frac{R}{c_0 \times t} \right] \quad (A1.6)$$

$$u (R,t) = D (1 - \alpha) \left(\frac{R_F}{R} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{R}{c_0 \times t} \right)^2 \right] \quad (A1.7)$$

Où : ρ_0 – densité du mélange initial – kg.m^{-3}

D – célérité de la déflagration – m/s

α - rapport d'expansion – (-)

R_F – rayon de la flamme – m

R –distance à la source d'amorçage – m

c_0 – vitesse du son dans le milieu environnant – m/s

t – temps – s

Remarque 1 : $R = D \times t$ dans les relations précédentes.

Remarque 2 : Pour une flamme sphérique laminaire $\Rightarrow D = \alpha^{-1} \times V_F$.

A1.2 Modélisation des déflagrations à vitesse variable

A1.2.1 Champs de pression et de vitesse

Comme pour le cas où la célérité de déflagration est supposée constante, une solution analytique approchée et de premier ordre a été établie par Deshaies (1981). La déflagration produit toujours un écoulement identique à celui d'un piston sphérique semi-perméable se déplaçant à une vitesse $u_p(t)$. De plus, d'après l'équation de conservation de la masse à travers l'onde de combustion, la vitesse du piston est liée à la célérité de la déflagration par l'expression suivante :

$$u_p(t) = D(t) \times (1 - \alpha) \quad \text{avec} \quad D(t) = \frac{dR_F}{dt} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{\rho_b}{\rho_f} \quad (\text{A1.8})$$

Où : u_p – vitesse du piston – m/s

D – célérité de la déflagration – m/s

α - rapport d'expansion – (-)

Si la flamme se propage à une vitesse variable dans un milieu infini, avec une loi de propagation $R_F(t)$, l'intégration des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement permet d'obtenir la surpression. Les expressions de champ de pression et de vitesse établies par Deshaies (1981) sont données ci-dessous :

o Au voisinage du front de flamme ($R \sim R_F$) : écoulement incompressible

$$\Delta P(R,t) = P(R,t) - P_0 = \frac{\rho_0}{R} (1 - \alpha) \left[2 R_F(t) \left(\frac{dR_F(t)}{dt} \right)^2 R_F^2(t) \left(\frac{d^2 R_F(t)}{dt^2} \right) - \frac{1 - \alpha}{2} \frac{R_F^4(t)}{R^3} \left(\frac{dR_F(t)}{dt} \right)^2 \right]$$
$$u(R,t) = (1 - \alpha) \frac{R_F^2(t)}{R^2} \frac{dR_F(t)}{dt} \quad (\text{A1.9 et A1.10})$$

o Loin du front de flamme ($R \gg R_F$) : écoulement acoustique

$$\Delta P(R, t) = P(R, t) - P_0 = \frac{\rho_0}{R} (1 - \alpha) \left[2 R_F(\tau) \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right)^2 + R_F^2(\tau) \left(\frac{d^2 R_F(\tau)}{d \tau^2} \right) \right]$$

$$u(R, t) = (1 - \alpha) \left\{ \frac{R_F^2(\tau)}{R^2} \frac{d R_F(\tau)}{d \tau} + \frac{1}{R * c_0} \left[2 R_F(\tau) \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right)^2 + R_F^2(\tau) \frac{d^2 R_F(\tau)}{d \tau^2} \right] \right\}$$

(A1.10 et A1.11)

avec : $\tau = t - \frac{R}{c_0}$

Où : ρ_0 – densité du mélange initial – kg.m^{-3}

D – célérité de la déflagration – m/s

α - rapport d'expansion – (-)

R_F – rayon de la flamme – m

R – distance à la source d'amorçage – m

c_0 – vitesse du son dans le milieu environnant – m/s

t – temps – s

A1.2.2 Célérité de la flamme

Les champs de pression générés par la déflagration peuvent être obtenus à partir des enregistrements des capteurs de pression placés à plusieurs distances radiales du centre d'amorçage de la déflagration. En effet, à partir de l'équation du champ de pression en zone acoustique, le rayon de flamme (en fonction du temps) peut être calculé. Pour cela, il suffit de procéder à une double intégration du signal de pression.

$$\Delta P(R, t) = \frac{\rho_0}{R} (1 - \alpha) \left[2 R_F(\tau) \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right)^2 + R_F^2(\tau) \left(\frac{d^2 R_F(\tau)}{d \tau^2} \right) \right]$$

$$\text{Or : } \frac{d}{dt} \left[R_F^2(\tau) \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right) \right] = 2 R_F(\tau) \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right)^2 + R_F^2(\tau) \frac{d^2 R_F(\tau)}{d \tau^2}$$

De plus, à l'instant initial (t = 0 ms), le rayon de flamme est nul, et la distance, R, entre la source d'amorçage et le capteur reste constante. Donc, le rayon R est fixe.

$$\int \Delta P(R, t) dt = \frac{\rho_0 (1 - \alpha)}{R} \int_0^t \frac{d}{dt} \left[R_F^2 \left(\frac{d R_F(\tau)}{d \tau} \right) \right] dt = \frac{\rho_0 (1 - \alpha)}{R} R_F^2(t) \left(\frac{d R_F(t)}{dt} \right)$$

$$\int \left(\int \Delta P(R, t) dt \right) dt = \frac{\rho_0 (1 - \alpha)}{R} \int_0^t \left(R_F^2(t) \left(\frac{d R_F(t)}{dt} \right) \right) dt$$

$$\text{Soit : } R_f(t) = \sqrt[3]{\frac{3 R \left(\int_0^t \left(\int_0^t \Delta P(R, t) dt \right) dt \right)}{\rho_0 (1 - \alpha)}} \quad (\text{A1.12})$$

Où : ρ_0 – densité du mélange initial – kg.m⁻³

α - rapport d'expansion – (-)

R –distance à la source d'amorçage –m

Le calcul du rayon de flamme ayant été effectué, la célérité de la flamme peut être déterminée en dérivant la formule (A1.12). Pour cela, un simple schéma explicite des différences finies suffit

$$D(t) = \frac{R_F(t+1) - R_F(t-1)}{2 \times \Delta t} \quad (\text{A1.13})$$

Cette méthode d'obtention de la vitesse de flamme par le rayon de flamme a été utilisée dans de nombreux travaux. Nous pouvons notamment citer les travaux de Bavoil (1997) avec le dispositif de la charge hémisphérique et différentes richesses de mélanges (de 0,5 à 4). Les valeurs de vitesses obtenues varient en fonction de la richesse du mélange d'environ 3 m/s pour une richesse de 0,5 à environ 20 m/s pour une richesse de 1,6. Pour un mélange à la stœchiométrie, la vitesse de flamme trouvée est d'environ 15 m/s. Pour un mélange riche (richesse de 4), la vitesse est d'environ 8,5 m/s. Guelon (2003) a aussi appliqué ce processus en mélange hydrogène-oxygène présentant un gradient de concentration. Cette mesure de la vitesse de flamme donne des valeurs d'environ 50 m/s pour un nuage uniforme de 0,04 m à des valeurs d'environ 140 m/s pour un rayon initial de 0,08 m. Il a aussi été constaté que les valeurs de la vitesse de flamme diminuent avec l'augmentation du délai de diffusion du mélange gazeux initial dans l'air.

Annexe 2. Détails menant à l'expression de la vitesse de Dorofeev

L'amplitude des ondes de pression générées par les explosions de gaz dépend essentiellement de la vitesse de flamme maximale atteinte durant le processus de combustion. Il est donc important d'avoir une estimation fiable pour la vitesse de flamme prenant en compte la distance de propagation et la géométrie des obstacles.

Le modèle de Dorofeev (2007) se base sur la propagation d'une flamme initialement sphérique vers une zone obstruée. La vitesse relative de la flamme est donnée par :

$$V_f = \sigma S_T \frac{A_f}{A_R} \quad (\text{A2.1})$$

Où : V_f – vitesse de flamme – m/s

σ - rapport d'expansion ($1 / \alpha = \rho_f / \rho_b$) – (-)

S_T – vitesse turbulente de la flamme – m/s

A_f – surface de flamme effective du front de flamme – m²

A_R – surface de flamme parfaitement sphérique – m²

La vitesse de la flamme augmente d'une part en raison de l'augmentation de la surface de flamme dans un champ d'obstacles et d'autre part en raison de l'augmentation du taux de combustion turbulente durant la propagation de la flamme.

Les effets d'étirements de la flamme peuvent être approximativement décrits (équation A2.2) en appliquant une simple considération géométrique établie par Veser et al. (2002) dans le cas d'une propagation dans un tube.

$$A_f = \pi R X + b \pi R X ABR \quad (A2.2)$$

Où : A_f – surface de flamme effective du front de flamme – m²

R – rayon du tube – m

X – distance considérée du front de flamme – m

ABR – rapport de blocage – %

b – constante – (-)

Si un champ uniforme d'obstacles est caractérisé par la distance entre deux obstacles x , la taille caractéristique de ces obstacles y , les considérations suivantes peuvent être faites. Chaque obstacle dans le cône contribue par $4xy$ à la surface totale de flamme (la flamme voit 4 côtés de l'obstacle). Au-dessus d'une certaine distance à partir du point d'ignition R_0 , la largeur du cône de flamme déformée est égale au rayon de la flamme R . Cela donne :

$$\frac{A_f}{A_R} = 1 + \frac{4}{3} \frac{y R}{x^2} \quad (A2.3)$$

Où : A_f – surface de flamme effective du front de flamme – m²

A_R – surface de flamme parfaitement sphérique – m²

y – taille caractéristique des obstacles – m

x – distance entre chaque obstacle – m

R – rayon de la flamme parfaitement sphérique – m

La propagation de la flamme à $R > R_0$ correspond à une situation où la largeur du cône de flamme déformée est plus petite que le rayon de la flamme R . La largeur du cône de flamme déformée peut être estimée comme σx , donc, pour $R \gg R_0$, cela donne :

$$\frac{A_f}{A_R} = 1 + \frac{4 \sigma y}{x} \quad (\text{A2.4})$$

Où : A_f – surface de flamme effective du front de flamme – m^2

A_R – surface de flamme parfaitement sphérique – m^2

y – taille caractéristique des obstacles – m

x – distance entre chaque obstacle – m

σ - rapport d'expansion – (-)

Si l'équation (A2.3) est valable pour $R = R_0 = \sigma x$, l'équation (A2.4) est valide pour $R = n\sigma x$; où $n \gg 1$, et donc l'augmentation de la surface de la flamme avec la distance peut être décrit par ce qui suit :

$$\frac{A_f}{A_R} = 1 + A R^\alpha$$

Avec : $AR^\alpha = \frac{4}{3} \frac{yR}{x^2}$

$$A = \frac{4}{3} \frac{yR}{x^2} R^{-\alpha}$$

$$A = \frac{4}{3} \frac{y}{x^2} (\sigma x)^{1-\alpha}$$

$$A = \frac{4}{3} \frac{\sigma y}{x(\sigma x)^\alpha} \quad (\text{A2.5})$$

Où : A_f – surface de flamme effective du front de flamme – m^2

A_R – surface de flamme parfaitement sphérique – m^2

R – rayon de la flamme parfaitement sphérique – m

σ - rapport d'expansion – (-)

x – distance entre chaque obstacle – m

α – une constante – (-)

En remplaçant le rapport de surface A_f / A_r , l'équation (A2.1) devient :

$$V_f = \sigma S_T \left(1 + \frac{4}{3} \frac{\sigma y}{x} \frac{R^\alpha}{(\sigma x)^\alpha} \right) \quad (\text{A2.6})$$

Où : V_f – vitesse de flamme – m/s

S_T – vitesse turbulente de flamme – m/s

σ - rapport d'expansion – (-)

x – distance entre chaque obstacle – m

y – taille caractéristique des obstacles – m

α – une constante – (-)

R – rayon de la flamme parfaitement sphérique – m

L'effet de la turbulence peut être expliqué en appliquant la corrélation de Bradley pour la vitesse de combustion turbulente S_T :

$$\frac{S_T}{S_L} = a \left(\frac{u'}{S_T} \right)^{1/2} \left(\frac{L_T}{\delta} \right)^{1/6} \quad \text{avec} \quad u' = bV = bV_F \frac{\sigma-1}{\sigma}$$

Où : u' – fluctuation de la vitesse turbulente – m

b – une constante – (-)

V_f – vitesse de flamme – m/s

σ - rapport d'expansion – (-)

En remplaçant dans l'équation (A2.6), on obtient :

$$V_f = a^2 b \sigma (\sigma - 1) S_L \left(1 + \frac{4}{3} \frac{\sigma y}{x} \frac{R^\alpha}{(\sigma x)^\alpha} \right)^2 \left(\frac{L_T}{\delta} \right)^{1/3} \quad (\text{A2.7})$$

Où : V_f – vitesse de flamme – m/s

a , b et α – des constantes – (-)

σ - rapport d'expansion – (-)

S_L – vitesse laminaire de flamme – m/s

x – distance entre chaque obstacle – m

y – taille caractéristique des obstacles – m

R – rayon de la flamme parfaitement sphérique – m

L_T – échelle intégrale de turbulence – m

δ – épaisseur de flamme laminaire – m

L'équation (A2.7) donne une description approximative de la vitesse de flamme comme une fonction de la distance dans une surface avec et sans obstacle. Une augmentation significative de la vitesse de flamme avec la distance peut seulement être prévue dans un système avec obstacles.

Annexe 3. Les méthodes de calcul des explosions à effet d'évent

Plusieurs corrélations ont été proposées pour le calcul de la surpression interne en se basant sur la forme générique suivante (Cubbage et al. (1995), Rabah et al. (1969) et Yao et al. (1974)) :

$$P_{red} = a \left(\frac{\bar{A}}{\bar{S}_0} \right)^b \quad (\text{A3.1})$$

$$\text{Avec : } \bar{A} = \frac{C_d A_v}{A_s} \quad \bar{S}_0 = \frac{S_0 (E_0 - 1)}{c_0} \quad (\text{A3.2 et A3.3})$$

Où : $\bar{A}$ - rapport des surfaces ventilées – (-)

A_s – aire du sol de l'enceinte – m^2

A_v – aire de l'évent – (m^2)

C_d – coefficient de décharge de l'évent – (-)

$\bar{S}_0$ - rapport de la vitesse du gaz en avant du front de flamme sur la vitesse du son dans les gaz non brûlés – (-)

S_0 – vitesse de combustion laminaire – m/s

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

c_0 – vitesse du son dans les gaz non brûlés – m/s

Les valeurs des constantes a et b sont prises pour correspondre au mieux aux expériences entreprises.

Parmi les travaux existants, ceux de Cubbage et al. (1995) menés avec le gaz de ville conduisent à des valeurs de $a = 0,365$ et $b = -1$.

Rabash (1969) a proposé une autre équation se basant sur des données expérimentales produites pour du propane. Cette équation diffère de l'équation proposée par Cubbage et al. (1995) dans le sens où elle prend en compte la pression d'ouverture par le biais de l'ajout du terme $1,48 P_v$ (P_v pression d'ouverture de l'événement) à l'équation A3.1, les constantes a et b restant les mêmes.

Yao (1974) a proposé une équation qui prend en considération les caractéristiques de la rupture de l'événement en intégrant un « facteur de turbulence » χ fonction du mouvement des gaz frais induit par l'événement. Dans ce cas, la constante b a été définie comme valant -2 et le coefficient a par la relation suivante :

$$a = \left[\frac{0,375 \chi^{0,675} E_0^{7/6}}{E_0 - 1} \right]^2 \quad (A3.4)$$

Où : χ - facteur de turbulence – (-)

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

Plus récemment de nouveaux modèles se différenciant de la formule de base (équation A3.1) ont été établis. Bartknecht (1993) propose une corrélation applicable pour des volumes de 1 m^3 à 60 m^3 et pour les types de gaz suivants : méthane, propane, gaz de ville et hydrogène. Cette équation (équation A3.5) est préconisée par le Guide NFPA 68 (1998) et la norme européenne EN 14994 (2007) et s'applique dans les conditions suivantes : $K_g \leq 550 \text{ bar.m/s}$, $0,1 \leq P_v \leq 0,5$, $P_{red} \leq 0,5$ et $1 \text{ m}^3 \leq V \leq 1000 \text{ m}^3$.

$$A_v = \left[\frac{0,1265 \log K_g - 0,0567}{P_{red}^{0,5817}} + \frac{0,1754(P_v - 0,1)}{P_{red}^{0,5722}} \right] V^{2/3} \quad (A3.5)$$

$$\text{Avec: } K_g = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} . V^{1/3} \quad (\text{A3.6})$$

Où : A_v – aire de l'évent – m^2

V – volume de l'enceinte -

p – pression observée dans une enceinte de 20 L pour un mélange hydrogène-air - bar

P_{red} – surpression interne maximale – kPa

P_v – pression d'ouverture de l'évent – kPa

Molkov et al. (1997 – 2010) ont établi une corrélation pour calculer la surface d'évent pour le cas d'une enceinte non obstruée ou obstruée. Le processus de calcul est le suivant :

- 1) Calculer la valeur de la surpression adimensionnée réduite de l'explosion

$$\pi_{\text{red}} = \frac{P_{\text{red}}}{P_i} \quad (\text{A3.7})$$

- 2) Déterminer la valeur de la pression adimensionnée d'ouverture de l'évent

$$\pi_v = \frac{(P_{\text{stat}} + P_i)}{P_i} \quad (\text{A3.8})$$

- 3) Calculer le rapport des pressions adimensionnée avec : $\frac{\pi_{\text{red}}}{\pi_v^{2,5}}$

- 4) Calculer la valeur du nombre de Bradley turbulent Br_t en utilisant une des deux équations suivantes :

$$\text{Si } \frac{\pi_{\text{red}}}{\pi_v^{2,5}} < 1 \text{ et } Br_t \geq 2, \quad \frac{\pi_{\text{red}}}{\pi_v^{2,5}} = 5,6 \times Br_t^{-2,5} \quad (\text{A3.9})$$

$$\text{Si } \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} \geq 1 \text{ et } Br_t < 2, \quad \frac{\pi_{red}}{\pi_v^{2,5}} = 7,9 - 5,8 \times Br_t^{0,25} \quad (A3.10)$$

5) Choisir les valeurs adéquates des paramètres thermodynamiques (σ , E_0 et c_0) et thermocinétique (S_0),

6) Déterminer la surface d'évent approprié en appliquant la corrélation suivante :

$$\frac{Br_t \cdot \sqrt[3]{36\pi} \cdot V^{2/3}}{c_0 \cdot \sqrt{\frac{E_0}{\gamma_u}}} = \frac{A_v (1 + \pi_v)^{0,4} \left[1 + 0,5 \left(\frac{A_v}{V^{2/3}} \frac{c_0}{S_0 (E_0 - 1)} \right)^{0,8} \right]^{-0,4}}{(1 + 2V^{0,94})^{0,4} S_0 (E_0 - 1)} \quad (A3.11)$$

Où : π_{red} - surpression adimensionnée réduite de l'explosion – (-)

P_{red} – surpression interne maximale – barg

P_i – pression atmosphérique – bara

π_v - pression adimensionnée d'ouverture de l'évent – (-)

P_{stat} – pression statique d'ouverture de l'évent - barg

Br_t – nombre de Bradley turbulent – (-)

V – volume de l'enceinte – m³

c_0 – vitesse du son dans les gaz frais – m/s

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

γ_u – rapport des chaleurs spécifiques – (-)

A_v – surface de l'évent – m²

S_0 – vitesse de combustion laminaire – m/s

Si la surface de l'évent est connue, la pression interne maximale de l'explosion est calculée à partir du nombre de Bradley turbulent Br_t . Ce dernier est déterminé par le nombre de Bradley Br , et le nombre DOI (Deflagration-Outflow Interaction) χ/γ .

$$Br = \frac{A_v}{V^{2/3}} \times \frac{c_0}{S_0 (E_0 - 1)} \quad (A3.12)$$

$$\frac{\chi}{\gamma} = \left[\frac{(1 + e \times V_{\neq}^g) \times (1 + 0,5 \times Br^{0,8})}{1 + \pi_v} \right]^{0,4} \quad (A3.13)$$

$$Br_t = \frac{\sqrt{E_0 / \gamma_u}}{\sqrt[3]{36 \times \Pi}} \times \frac{Br}{\chi / \gamma} \quad (A3.14)$$

Où : A_v – surface de l'évent – m²

V – volume de l'enceinte – m³

c_0 – vitesse du son dans les gaz frais – m/s

S_0 – vitesse de combustion laminaire – m/s

E_0 – coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

e et g – constante ($e = 10$ et $g = 0,33$) – (-)

$V_{\neq}^g$ - volume de l'enceinte adimensionnée – (-)

γ_u – rapport des chaleurs spécifiques – (-)

Il reste ensuite à appliquer les équations A3.9 et A3.10 en utilisant les conditions sur le nombre de Bradley turbulent.

Chao et al. (2010) ont proposé une corrélation intégrant la présence d'obstacles dans l'enceinte de confinement. Cette corrélation se base sur une série d'expériences menée pour des mélanges méthane-air et hydrogène-air à 18 % dans une enceinte cubique de 63,7 m³ (4,6 x 4,6 x 3 m) avec un évent de surface 4,5 m² positionné sur un mur de l'enceinte. Huit obstacles (0,4 x 0,4 x 3 m) sont insérés dans l'enceinte de confinement de façon à créer deux îlots de quatre obstacles. La surpression maximale est définie de la façon suivante :

$$\frac{P}{P_i} = \frac{P_{ext}}{P_i} \left(1 - G \left(\frac{S_u A_f (\sigma - 1)}{a_{cd} A_v} \right)^2 \right)^{-1} \quad (A3.15)$$

$$\text{Avec : } G = \left(\frac{(\gamma + 1)}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \text{ et } a_{cd} = c_d \left(\frac{R T_v \gamma (\gamma + 1)}{2 M_v} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A3.16 \text{ et } A3.17)$$

Où : P_i – pression atmosphérique – bar

P_{ext} – pression générée par l'explosion externe – bar

S_u – vitesse laminaire de combustion – m/s

A_f – surface de la flamme – m²

σ - coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

A_v – surface de l'évent – m²

γ - rapport des chaleurs spécifiques – (-)

c_d – coefficient de décharge – (-)

R – constante des gaz parfaits – J/mol.K

T_v – température – K

M_v – masse molaire des gaz ventilés – kg/mol

La prise en compte des obstacles se fait par l'intermédiaire du terme A_f avec l'équation suivante (Dorofeev (2007)) :

$$\frac{A_f}{A_{f0}} = \left(1 + \frac{4}{3} \sigma^{1-\alpha} \left(\frac{y}{x} \right) \left(\frac{R}{x} \right)^{\alpha} \right)^2 \quad (A3.18)$$

Où : A_{f0} – aire de la flamme sans obstacle – m²

σ - coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

α - constante (0,63) – (-)

y – dimension caractéristique de l'obstacle – m

x – distance entre obstacles – m

R – rayon de la flamme – m

Dans cette corrélation pour obtenir la surpression maximale dans l'enceinte, la surpression générée par l'explosion extérieure doit être connue. Celle-ci est déterminée par la corrélation suivante :

$$\frac{P_{ext}}{P_i} - 1 = \frac{20 \gamma (\sigma - 1) \sigma S_u Re \sqrt{k_T a}}{a_0^2} \quad (A3.19)$$

$$\text{Avec : } a = \frac{2 (\sigma - 1) \sigma S_u^2}{\sqrt{A_v}} \frac{A_f}{A_v} \left(\sqrt{\frac{\sigma \gamma_p (\gamma_p - 1)}{\gamma_r (\gamma_r - 1)}} - 1 \right) \quad (A3.20)$$

Où : P_i – pression atmosphérique – bar

γ - rapport des chaleurs spécifiques (p, produits et r, réactifs) – (-)

σ - coefficient d'expansion (ρ_f / ρ_b) – (-)

S_u – vitesse laminaire de combustion – m/s

R_e – rayon du nuage – m

k_T – constante (3,23 moyenne des expériences) – m^{-1}

a_0 – vitesse du son dans les gaz frais – m/s

A_f – surface de la flamme – m^2

A_v – surface de l'évent – m^2

Annexe 4. Protocole d'utilisation du banc de déflagration

- 1) Afficher la pancarte d'occupation du laboratoire « Danger Essais en cours Ne pas entrer ».
- 2) Vérifier que toutes les vannes $\frac{1}{4}$ de tour de l'arrivée des gaz soient fermées.
- 3) Ouvrir les bouteilles de gaz (azote et hydrogène) de l'extérieur à environ 1 bar.
- 4) Contrôler les régulateurs de pression de l'air comprimé (6 bar et 2 bar).
- 5) Mettre la table sous tension (voyant vert allumé), vérifier que le voyant du coupe circuit est éteint (voyant du haut, rouge), allumer les amplificateurs de charge, alimenter les photodiodes et mettre sous tension la source d'amorçage (voyant rouge de la source d'amorçage allumé) et brancher la caméra.
- 6) Allumer le PC d'acquisition des données et démarrer les logiciels utiles : LabVIEW (programme MAIN pour les deux cartes synchronisées), Smart Control (pour les débitmètres) et le logiciel de la caméra.
- 7) Positionner le film plastique sur la structure.
- 8) Ouvrir la vanne $\frac{1}{4}$ de tour de sortie du mélange inflammable sur la table.
- 9) Mettre sous tension le boîtier de contrôle des débitmètres.
- 10) Ouvrir les vannes d'arrivée des gaz sur le plateau des débitmètres.
- 11) Démarrer le logiciel Smart Control :
 - o Ouvrir les commandes DFMC1, DFMC2 et DFMC3 (déjà enregistrées dans le logiciel).
 - o Faire un premier remplissage de la boîte avec uniquement de l'azote pour vérifier l'étanchéité de la structure (environ à 10 % de la plage de mesure).

- o Régler les commandes DFMC2 et DFMC3 avec les pourcentages adéquats pour obtenir la richesse de mélange souhaitée.
- 12) Appuyer sur les déclencheurs pour faire le mélange de gaz.
- 13) Remplir la structure avec le mélange durant 6 min à partir de la stabilisation du débit.
- 14) Couper l'arrivée de l'air et de l'hydrogène (déclencheurs).
- 15) Fermer la vanne de sortie du mélange inflammable sur la table avec le port du bracelet électro-statique.
- 16) Fermer les vannes d'arrivée des gaz sur le plateau des débitmètres.
- 17) Mettre les équipements de protection auditive, et alerter de l'imminence d'un tir.
- 18) Pousser la tirette de connexion de la source s'amorçage au circuit électrique.
- 19) Lancer les différents logiciels d'acquisition (LabView et logiciel d'acquisition de la caméra) et amorcer le mélange avec le port du bracelet électro-statique.
- 20) Tirer la tirette et éteindre l'alimentation.

Dès que l'on est amené à manipuler la vanne de sortie du mélange inflammable sur la table, le port du bracelet antistatique est obligatoire.

Annexe 5. Caractéristiques des gaz utilisés

Gaz	Impuretés (ppm mole)			Puretés (%)
	H2O	O2	CnHm	
Azote U	< 3	< 2	< 0,5	99,999
Hydrogène U	< 3	< 2	< 0,5	99,999

Annexe 6. Fiches techniques de l'instrumentation de la chaîne d'acquisition

A6.1 Système de débitmètres

A6.1.1 Régulateur de débit massique thermique numérique BROOKS modèle 5850S

Conditions de services :

- o Fluide : Air, Azote
- o Pression amont (bar) : 3
- o Pression aval (bar) : 1
- o Débit (ln/min) : possible jusqu'à 30
- o Température ambiante

Spécifications techniques :

- o Type : 0,5 % Pts $\pm$ 0,1 % % PE
- o Température d'utilisation (°C) : 0 à 65
- o Pression maximale (bar) : 100
- o Rangeabilité : 50 : 1

A6.1.2 Régulateur de débit massique thermique numérique BROOKS modèle MF50S ATEX zone 2

Conditions de services :

- o Fluide : Hydrogène
- o Pression amont (bar) : 3
- o Pression aval (bar) : 1

- o Débit (ln/min) : possible jusqu'à 30
- o Température ambiante

Spécifications techniques :

- o Type : 0,5 % Pts $\pm$ 0,1 % % PE
- o Température d'utilisation (°C) : 0 à 65
- o Pression maximale (bar) : 100
- o Rangeabilité : 50 : 1

A6.2 Capteurs de pression Kistler 603 B

- o Gamme de mesure (bar) : 0 à 200
- o Surcharge (bar) : 200
- o Sensibilité (pC/bar) : $\sim$ 5,5
- o Temps de montée (μ s) : 1
- o Fréquence propre (kHz) : $\sim$ 400
- o Sensibilité aux accélérations (bar/g) : $< 0,0001$
- o Gamme de température d'utilisation (°C) : - 196 à 200

A6.3 Photodiodes

- o Tension de rupture Capteur – Emetteur (V) : 30
- o Tension de rupture Emetteur – Collecteur (V) : 5 V
- o Intensité maximale (mA) : 100
- o Temps de montée/descente (μ s) : 3
- o Tension de saturation Capteur – Emetteur (V) : 0,8

A6.4 Amplificateurs de charge Kistler 5011 B

- o Gamme de mesure (pC) : ± 10 à ± 999000
- o Sensibilité du capteur (pC/M.U.) : 0,01 à 9990 (M.U. = Unités Mécaniques)
- o Gamme de fréquence (- 3db) (kHz) : 0 à 200
- o Erreur (%) :
 - $< \pm 100$ pC FS (max./typ.) : $< \pm 3 \%$ / $< \pm 2 \%$
 - $> \pm 100$ pC FS (max./typ.) : $< \pm 1 \%$ / $< \pm 0,5 \%$

A6.5 Cartes d'acquisition

- o 8 voies échantillonnées simultanément
- o Fréquence d'échantillonnage temps réel de 60 Mech/s
- o Résolution verticale de 12 bits
- o Bande passante analogique de 60 MHz
- o Mémoire embarquée jusqu'à 512 Mo
- o Gamme d'entrée de 50 mV à 30 v

A6.6 Caméra rapide

- o Résolution maximale (pixels) : 800 x 600
- o Sensibilité (ISO) : 4800 à 100000
- o Temps d'exposition minimum standard (μ s) : 1
- o Mode standard : 6688 images/seconde en résolution maximale à 190000 images/seconde pour une résolution en 32 x 32 pixels
- o Dynamique réelle (bit) : 14

BIBLIOGRAPHIE

Alekseev V.I., Kuznetsov M.S., Yankin Yu.G. & Dorofeev S.B., Experimental study of flame acceleration and the deflagration-to-detonation transition under conditions of transverse venting, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 14, pp. 591 – 596, 2001

Baker Q.A., Tang M.J, Scheier E.A., & Silva G.J., Vapor Cloud Explosion Analysis, *Process Safety Progress*, vol. 15 (2), pp.106-109, 1996

Bartknecht W., *Explosions – Schtz: Grundlagen und Anwendung*, 1993

Bauer P., Experimental investigation on flame and detonation quenching: applicability of static flame arresters, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 18, pp. 63 – 68, 2005

Bauwens C.R., & Dorofeev S.B., Effect of the external explosion on vented deflagrations, 8th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Japon, 2010

Bauwens C.R., Chaffee J., & Dorofeev S.B., Effect of ignition location, vent size and obstacles on vented explosion overpressures in propane-air mixtures, *Combustion Science Technology*, 2010

Bauwens C.R., Chaffee J., & Dorofeev S.B., Vented explosion overpressures from combustion of hydrogen and hydrocarbon mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010

Bavoil E., Etude expérimentale de l'influence de la diminution de la température initial (jusqu'à 100 K) sur les déflagrations des mélanges H₂ / air, Thèse de l'Université de Poitiers, 1997

Bradley D., Lau K.C., & Lawes M., Flame stretch rate as a determinant of turbulent burning velocity, *Proc R Soc London A*, 1992

Bradley D., Gaskell P.H., & Gu X.J., Burning velocities, Markstein lengths and flame quenching for spherical methane-air flames: a computational study, *Combustion and Flame*, vol. 104, pp. 176 – 198, 1996

Bychkov V., Valiev D., Akkerman V., Eriksson L.E., & Law C.K., Ultra-fast mechanism of flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in tubes with obstacles, 8th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama, Japon, 2010

Cambray P., & Deshaies B., Ecoulement engendré par un piston sphérique. Solution analytique approchée, *Acta Astronautica*, vol. 5, pp. 611 – 617, 1978

Chao J., Bauwens C.R., & Dorofeev S.B., An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2010

Chao J., Bauwens C.R., & Dorofeev S.B., Peak overpressures in vented gas explosions, 8th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama, Japon, 2010

Ciccarelli G., & Dorofeev S., Flame acceleration and transition to detonation in ducts, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 34, pp. 499 – 550, 2008

Cleaver R.P., & Robinson C.G., An analysis of the mechanisms of overpressure generation in vapour cloud explosions, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 45, pp. 27 – 44, 1996

Cleaver R.P., Humphreys C.E., Morgan J.D., & Robinson C.G., Development of a model to predict the effects of explosions in compact congested regions, vol. 53, pp. 37 – 55, 1997

Cracknell R.F., Alcock J.L., Rowon J.J., Shirvill L.C., & Ungut A., Safety considerations in retailing hydrogen, H₂NET meeting, Basingstoke, Angleterre, 2002

Cubbage P.A., & Simmonds W.A., An investigation of explosion relief for industrial drying ovens, *Transactions of Institute of Gas Engineers*, vol. 105, 1995

Daubech J., Contribution à l'étude de l'effet de l'hétérogénéité d'un prémélange gazeux sur la propagation d'une flamme dans un tube clos, Thèse de l'Université d'Orléans, 2008

Deshaies B., Les flammes sphériques : propagation divergente et combustion stationnaire, Thèse de doctorat n°328 de l'Université de Poitiers, 1981

Dorofeev S.B., Sidorov V.P., Dvoinishnikov A.E., Alekseev V.I., & Kuznetsov M.S., Experimental study of air blast parameters from fuel rich mixtures detonation, International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Lisbonne, Portugal, 1993

Dorofeev S.B., Blast effects of confined and unconfined explosions, Proceedings of the 20th International Symposium on Shock Waves, Pasadena, Californie, USA, 1995

Dorofeev S.B., Kuznetsov M.S., Alekseev V.I., Efimenko A.A., Bezmelnitsyn A.V., Yankin YU.G., & Breitung W., Effect of scale and mixture properties on behavior of turbulent flames in obstructed areas, International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Heidelberg, Allemagne, 1999

Dorofeev S.B., Sidorov V.P., Kuznetsov M.S., Matsukov I.D., & Alekseev V.I., Effect of scale on the onset of detonations, Shock Waves, vol. 10, pp. 137 – 149, 2000

Dorofeev S.B., Kuznetsov M.S., Alekseev V.I., Efimenko A.A., & Breitung W., Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 14, pp. 583 – 589, 2001

Dorofeev S.B., Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions, International Journal of Hydrogen, vol. 32, pp. 2118 – 2124, 2007

EN 14994 : 2007, Gas Explosion Venting Protective Systems, 2007

Gaseq, <http://www.c.morley.dsl.pipex.com/>

Geisbrecht H., Hess K., Leuckel W., & Maurer B., Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable gases into the atmosphere, 1981

Groethe M., Colton J., Chiba S., & Sato Y., Hydrogen deflagrations at large scale, Proceedings of the world hydrogen energy conference, Japon, 2004

Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., & Iwabuchi H., Large-scale hydrogen deflagrations and detonations, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, pp. 2125-2133, 2007

Groupeement Français de Combustion, <http://www.gfcombustion.asso.fr>

Grune J., Vesper A., Stern G., Breitung W., & Dorofeev S., Acceleration of unconfined flames in congested areas, Proceedings of 19th International Colloquium of the dynamics of explosions and reactive systems, Hakone, Japon, 2003

Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., & Jordan T., Experimental investigation of hydrogen-air deflagrations and detonations in semi-confined flat layers, 8th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama, Japon, 2010

Guelon F., Déflagration de nuages H₂ / O₂ présentant un gradient de concentration, Thèse de l'Université d'Orléans, 2003

Guibert-Duplantier C., Etude des effets mécaniques des explosions de gaz sur des structures de formes simples, Thèse de l'Université de Poitiers, 1993

Guibert-Duplantier C., Leyer J.C., & Desbordes D., The terminal phase of an unconfined hemispherical deflagration, Shock Waves, vol. 6, pp. 115 – 118, 1996

Kuhl Al., Leyer J.C., Borisov A.A., & Sirignano W.A., Dynamic aspects of explosion phenomena, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 154, pp. 185 – 194, 1973

Kumar R., Dewit W., & Greig D., Vented explosion of hydrogen-air mixtures in a large volume, Combustion and Science Technology, vol. 66, pp. 251 – 266, 1989

Kuznetsov M., Alekseev V., Bezmelnitsyn A., Breitung W., Dorofeev S., Matsukov I., Vesper A., & Yankin YU., Effect of obstacle geometry on behavior of turbulent flames, <http://hdl.handle.net/10068/165782>, 1999

Lee J.H.S., & Moen I.O., The mechanism of transition from deflagration to detonation in vapour cloud explosion, *Progress Energy Combustion Science*, vol. 6 (4), pp. 359 – 389, 1980

Lee J.H.S., Knystautas R., & Chan K., Turbulent propagation in obstacle-filled tubes, 20th Symposium on Combustion, pp. 1663 – 1672, 1984

Lee J.H.S., Knystautas R., & Freiman A., High speed turbulent deflagration and transition to detonation in H₂-air mixtures, *Combustion and Flame*, vol. 56, pp. 227-239, 1984

Leyer J.C., Effets de pression engendrés par l'explosion dans l'atmosphère de mélanges gazeux d'hydrocarbures et d'air, *Revue Générale de Thermique*, pp. 193-208, 1982

Mallet F., Etude expérimentale et numérique de la propagation de flamme prémélangées turbulente dans une atmosphère pauvre en hydrogène et humide, Thèse de l'université d'Orléans, 2005

Merilo E.G., & Groethe M.A., Deflagration safety study of mixtures of hydrogen and natural gas in a semi-open-space, International Conference on Hydrogen Safety, San Sébastien, Espagne, 2007

Molkov V.V., Korolchenko A., & Alexandrov S., Venting of deflagrations in buildings and equipment: universal correlation, *Proceedings of 5th International Symposium on Fire Safety Science*, Melbourne, Australie, 1997

Molkov V.V., Dobashi R., Suzuki M., & Hirano T., Modelling of vented hydrogen-air deflagrations and correlations for vent sizing, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 12 (2), pp. 147 – 156, 1999

Molkov V.V., Dobashi R., Suzuki M., & Hirano T., Venting of deflagrations: hydrocarbon-air and hydrogen-air systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 13 (3), pp. 397 – 409, 2000

Molkov V.V., Makarov D.V., & Schneider H., Hydrogen-air deflagrations in open atmosphere: large eddy simulation analysis of experimental data, Proceedings of First International Conference on Hydrogen Safety, Pise, Italie, 2005

Molkov V., Verbecke F., & Saffers J.B., Uniform hydrogen-air Deflagrations in vented enclosures and tunnels: predictive capabilities of engineering correlations and LES, 8th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Yokohama, Japon, 2010

NFPA 68 Guide for Venting of Deflagrations. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 1998.

Pasman H.J., Groothuisen Th.M., & Gooijer P.H., Design of pressure relief vents, Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp. 185 – 189, 1974

Peraldi O., Knystautas R., & Lee J.H.S., Criteria for transition to detonation in tubes, 21th Symposium on Combustion, Allemagne, vol. 21, pp. 1629 – 1637, 1986

Pierorazio A.J., Thomas J.K., Baker Q.A., & Ketchum D.E., An Update to the Baker-Strelhow-Tang Vapor Cloud Explosion Prediction Methodology Flame Speed Table. Process Safety Progress, vol. 24 (1), 2004

Rasbash D., The relief of gas and vapour explosions in domestic structures, Fire Research Note No. 759, 1969

Rocourt X., Etude de détonabilité des produits gazeux issus de la pyrolyse d'un kerosene, Thèse de l'Université d'Orléans, 2004

Royle M., Shirvill L.C., & Roberts T.A., Vapour cloud explosions from the ignition of methane/hydrogen/air mixtures in a congested region, International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Espagne, 2007

Salzano E., Marra F.S., Russo G., & Lee J.H.S, Numerical simulation of turbulent gas flame in tubes, Journal of Hazardous materials, vol. A95, pp. 233 – 247, 2002

Sato Y., Iwabuchi H., Groethe M., Merilo E., & Chiba S., Experiments on hydrogen deflagration, Journal of Power Sources, vol. 159, pp. 144-148, 2006

Schneider H., & Pfortner H., Prozeßgasfreisetzung-Explosion in der Gasfabrik und Auswirkungen von Druckwellen auf das Containment, PNP-Sicherheitssofortprogramm, 1983

Shepherd J.E., & Lee J.H.S., On the transition from deflagration to detonation, 1992

Shirvill L.C., Royle M., & Roberts T.A., Hydrogen releases ignited in a simulated vehicle refueling environment, International Conference on Hydrogen Safety, 2007

Sorin R., Etude et optimisation de la transition déflagration-détonation en tube des mélanges stœchiométriques H₂/O₂/N₂ et (CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₃H₈)/O₂/N₂ et de sa transmission à un espace de plus grande dimension, Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, 2005

Strehlow R.A., Savage L.D., & Vance G.M., On the measurement of energy release rates in vapor cloud explosions, Combustion Science and Technology, vol. 6, pp. 307 – 312, 1973

Strehlow R.A., & Ricker R.E., The Blast Wave from a Bursting Sphere, Loss Prevention, vol. 10, pp. 115-121, 1976

Strehlow R.A., Luckritz R.T., Adamczyk R.T., & Shimpf S.A., The blast wave generated by spherical flame, Combustion and Flame, vol. 35, pp. 297 – 310, 1979

Studer E., Projet HYDROMEL : tâche 2.2 Données expérimentales pour la dispersion et la combustion de mélange H₂ / GN, Rapport DM2S, SFME / LTMF / RT / 07 – 061 / A, 2007

Tang M.J., & Baker Q.A., A New Set of Blast Curves from Vapor Cloud Explosion, Process Safety Progress, vol. 18 (3), pp. 235-240, 1999

Teodorczyk A., Lee J.H.S., & Knystautas R., Propagation mechanism of quasi-detonation, 22th Symposium on Combustion, pp. 1723 – 1731, 1989

Teodorczyk A., Lee J.H.S., & Knystautas R., Photographic study on the structure and propagation mechanisms of quasi-detonations in rough tubes, AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 133, pp. 223 – 240, 1991

Van Den Berg A.C., The multi-energy method: a framework for vapor cloud explosion blast prediction, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 12 (1), pp. 1-10, 1985

Van Wingerden C.J.M., Van Den Berg A.C., & Opschoor G., Vapor Cloud Explosion Blast Prediction, *Plant and Operations Progress*, vol. 8 (4), pp. 234-238, 1989

Veser A., Breitung W., & Dorofeev S.B., Run-up distances to supersonic flames in obstacle-laden tubes, 4th International Symposium on Hazards Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bourges, France, pp. 333-340, 2002

Yao C., Explosion venting of low-strength equipment and structures, *Loss Prevention*, vol. 8, 1974

Laure MELANI

Accélération d'une flamme Hydrogène-Air en milieu Obstrué et/ou Confiné

Résumé :

L'intérêt grandissant suscité par l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique a mis en évidence un besoin de données fiables concernant les explosions de mélanges hydrogène-air dans des milieux obstrués et/ou confinés. C'est pourquoi, après une analyse poussée de la littérature, le travail de thèse présenté dans ce mémoire s'est focalisé sur l'accélération de flamme hydrogène-air dans de tels milieux. L'objectif est de proposer une base de données concernant la surpression maximale et la vitesse de flamme maximale dans le cas d'une déflagration de mélange hydrogène-air. Pour parvenir à cet objectif, différentes séries d'expériences menées à l'échelle du laboratoire ont été réalisées.

Les séries d'essais entreprises se sont ainsi déroulées selon trois phases : i) validation du dispositif d'acquisition des mesures en utilisant une charge hémisphérique hydrogène-air, ii) essais en milieu obstrué et non confiné, et iii) essais en milieu confiné et obstrué. Les obstacles choisis pour cette étude se présentent sous la forme de couches de grillage ou de plaque. Dans les structures obstruées ainsi créées, la taille de maille, la forme de la maille, la position des différentes couches et l'espace entre couches varient. Ces essais ont notamment montré que des mailles carrées engendraient une surpression plus importante que des mailles rondes dans le cadre d'obstacles de type plaque. Une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux obtenus par application des modèles de la littérature a été établie. Cette comparaison porte sur le calcul de la vitesse de flamme maximale en milieu obstrué et le calcul de la surpression maximale en milieu confiné.

Mots clés : Hydrogène, Déflagration, Vitesse de Flamme, Surpression, Obstruction, Confinement

Hydrogen-Air Flame Acceleration in Obstructed and/or Confined Area

Summary:

The increasing interest created by the use of hydrogen as an energy carrier has underlined a need of reliable data concerning hydrogen-air explosions in obstructed and/or confined area. That's why, after a detailed literature review, the study presented in this dissertation focused on hydrogen-air flame acceleration in obstructed and/or confined area. The aim of this study is to propose a data base concerning maximal overpressure and maximal flame speed in the case of hydrogen-air deflagration. To achieve this goal, different series of laboratory scale experiments have been realised.

The experiments have been performed in three steps: i) validation of measurement set up with hemispherical hydrogen-air charge, ii) experiments in obstructed and unconfined area, and iii) experiments in confined area. The obstacles chosen in this study are layers of wire mesh or plate. In this obstructed structure, the mesh size, the mesh shape, the place of two consecutive layers and the pitch between two consecutive layers can vary. These experiments have notably shown that the square meshes generated more important overpressures than circular meshes in the case of plate obstacles. A comparison has been performed between experimental measurements and results given by the use of analytical models found in literature relations. The comparison was done for the maximal flame speed in obstructed area, and the maximal overpressures in confined area.

Keywords: Hydrogen, Deflagration, Flame Speed, Overpressure, Obstruction, Confinement

Institut PRISME équipe RES, ENSI de Bourges
88 bd Lahitolle – 18020 BOURGES cedex

