

## Etude expérimentale de la propagation du front de flamme et de la vitesse de combustion d'une explosion de poussières d'aluminium

Clément Chanut

### ▶ To cite this version:

Clément Chanut. Etude expérimentale de la propagation du front de flamme et de la vitesse de combustion d'une explosion de poussières d'aluminium. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2018. Français. NNT : 2018EMAL0008 . tel-02006015

## HAL Id: tel-02006015 https://theses.hal.science/tel-02006015

Submitted on 4 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR D'IMT MINES ALES

En Mécanique des fluides, Energétique, Thermique, Combustion, Acoustique

## École doctorale 583 Risques et Société

Unité de recherche Laboratoire de Génie de l'Environnement Industriel

## ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME ET DE LA VITESSE DE COMBUSTION D'UNE EXPLOSION DE POUSSIERES D'ALUMINIUM

## Présentée par Clément CHANUT Le 13 Décembre 2018

Sous la direction de Frédéric HEYMES

### Devant le jury composé de

Sophie SAUVAGNARGUES, Professeure, IMT Mines Alès
Philippe GILLARD, Professeur, IUT de Bourges
Jean-Michel DESSE, Docteur Ingénieur HDR, Laboratoire de Mécanique des Fluides de Lille
Sophie TRELAT, Directrice de Recherches, CEA Fontenay-aux-Roses
Fabien DUVAL, Ingénieur de Recherches, IRSN Cadarache
Pierre SLANGEN, Professeur, IMT Mines Alès
Pierre LAURET, Maître-Assistant, IMT Mines Alès
Serge FORESTIER, Ingénieur de Recherches, TUEV-SUED

Représentante de l'ED Rapporteur Rapporteur Examinateur Examinateur Encadrant de thèse Encadrant de thèse Invité



# TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GENERALE	9
PARTIE A : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	
I) LES EXPLOSIONS DE POUSSIERES	
I.1) Généralités	
I.2) L'explosivité d'une poudre	
II) ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE EXPERIMENTALE DE	LA PROPAGATION DE LA FLAMME LORS D'UNE EXPLOSION DE POUSSIERES . 31
II.1) Généralités sur l'étude de la propa	gation d'une flamme
II.2) Etude de l'état initial de la suspens	sion
II.3) Résultats de propagation de flamr	nes
II.4) Autres études	
CONCLUSIONS DE LA PARTIE A	
PARTIE B : ETUDE DE LA MISE EN SUSPENSION	DES PARTICULES
1) IVIATERIEL	
1.1) La pouare etudiee	
1.2) Wise en place experimentale	
II) INTETHODES OPTIQUES UTILISEES	
II.1) Mesure de la concentration par al	fusion de Mie
II.2) Mesure de la turbulence par Partic	1e Image Velocimetry (PIV)
II.3) Mesure de la turbulence par Laser	Doppler Anemometry (LDA)
II.4) Etude preliminaire : Influence de la	taille de la zone d'étude sur les résultats PIV
III) RESULTATS	
III.1) La mise en suspension des particul	es
III.2) Etude de la concentration (diffusio	n de Mie)
III.3) Etude de l'évolution de la turbulen	ce
CONCLUSIONS DE LA PARTIE B	
PARTIE C: ETUDE DE LA PROPAGATION DE LA F	LAMME 113
INTRODUCTION	
I) MATERIEL	
I.1) Les prototypes d'étude de la propo	gation
I.2) Le générateur d'arcs electriques	
I.3) Les capteurs de pression utilisés	
II) METHODES MISES EN PLACE POUR L'ETUDE DE L	A PROPAGATION
II.1) Méthodes optiques utilisées	
II.2) Méthode de détermination de la v	itesse de combustion 125
III) RESULTATS	
III.1) Etude générale du phénomène de	propagation
III.2) Etude de l'influence de la turbulen	ce sur la propagation du front de flammes
III.3) Etude de la vitesse de combustion	
III.4) Perspective : Nouvelle méthode de	détermination de la vitesse de combustion
CONCLUSIONS DE LA PARTIE C	
CONCLUSION GENERALE	

RÉFÉRENCES	182
ANNEXE	187
RESUME	195
SUMMARY	196

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: HEXAGONE DES EXPLOSIONS DE POUSSIERES	15
FIGURE 2: ETAPES DE LA COMBUSTION D'UNE PARTICULE D'ALUMINIUM(PURI, 2008)	17
FIGURE 3: SCHEMA DU TUBE DE HARTMANN MODIFIE (KAHLILI, 2012)	20
FIGURE 4: SCHEMA DE LA SPHERE D'EXPLOSION (KAHLILI, 2012)	21
FIGURE 5: SCHEMA DU FOUR DE GODBERT-GREENWALD (KAHLILI, 2012)	22
FIGURE 6: EXEMPLE DE DETERMINATION DE LA SURPRESSION MAXIMALE ET DE LA VITESSE MAXIMALE DE MONTEE EN	
PRESSION(KAHLILI, 2012)	23
FIGURE 7: PRESSION MAXIMALE ET VITESSE DE MONTEE EN PRESSION MAXIMALE EN FONCTION DE LA GRANULOMETRIE (TRAORE,	
2007)	25
FIGURE 8: EVOLUTION DE LA PRESSION MAXIMALE ET DE LA VITESSE DE MONTEE EN PRESSION MAXIMALE EN FONCTION DE LA	
CONCENTRATION EN ALUMINIUM(TRAORE, 2007)	26
FIGURE 9: ILLUSTRATION DE LA CASCADE DE KOLMOGOROV (GALMICHE, 2014)	27
FIGURE 10: EXPLICATION DU CALCUL DE L'ECHELLE INTEGRALE(GALMICHE, 2014)	28
FIGURE 11: EVOLUTION DE LA PRESSION MAXIMALE ET DE LA VITESSE DE MONTEE EN PRESSION MAXIMALE EN FONCTION DU DELA	۹I
D'INFLAMMATION (ECKHOFF, 2003)	30
FIGURE 12: SCHEMA D'UN BRULEUR UTILISE POUR L'ETUDE DES EXPLOSIONS DE POUSSIERES (MASON AND WILSON, 1967)	32
FIGURE 13: SCHEMA DE PRINCIPE D'UN TUBE OUVERT (D'AMICO, 2016)	33
FIGURE 14: STRUCTURE D'UNE FLAMME LAMINAIRE(GALMICHE, 2014)	34
FIGURE 15: SCHEMA EXPLICATIF DES FLAMMES TURBULENTES (GALMICHE, 2014)	34
FIGURE 16: SCHEMA EXPLICATIF DU PROTOTYPE UTILISE PAR (WANG ET AL., 2006)	37
FIGURE 17: RESULTATS DE CONCENTRATION OBTENUS PAR(WANG ET AL., 2006)	37
FIGURE 18: SCHEMA DE PRINCIPE DE L'EXTINCTION LUMINEUSE (VISSOTSKI ET AL., 2012)	39
FIGURE 19: RESULTATS DE CONCENTRATION PAR DIFFUSION DE MIE (PAQUET, 2012)	40
FIGURE 20: SCHEMA EXPLICATIF DU PROTOTYPE UTILISE PAR (BOZIER, 2004)	41
FIGURE 21: TUBE DE PITOT MODIFIE UTILISE POUR LA MESURE DE LA TURBULENCE (SCHNEIDER AND PROUST, 2007)	42
FIGURE 22: RESULTATS DE VECTEURS VITESSES OBTENUS PAR PIV (BOZIER, 2004)	43
FIGURE 23: EVOLUTION DE LA VITESSE TURBULENTE EN FONCTION DU TEMPS (WANG ET AL., 2006)	44
FIGURE 24: SCHEMA DE PRINCIPE DU PROTOTYPE DEVELOPPE PAR L'EQUIPE PETALE DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE (CUERVO, 20	015)
	45
FIGURE 25: REPRESENTATION DES DEFLECTEURS UTILISES DANS LA SPHERE (DAHOE, 2000)	46
FIGURE 26: PROTOTYPE D'ETUDE DE LA PROPAGATION UTILISE PAR (CHEN AND FAN, 2005)	49
FIGURE 27: IMAGES DE VISUALISATION DIRECTE DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME DE TITANE (GAO ET AL., 2014)	50
FIGURE 28: IMAGES DE VISUALISATION DIRECTE DE PROPAGATION DE FLAMMES D'ALUMINIUM (BAUDR Y, 2007)	51
FIGURE 29: COMPARAISON DES METHODES UTILISEES POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION (BAUDRY, 2007	7). 51
FIGURE 30: IMAGES DE VISUALISATION DIRECTE DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME DE MELANGE 10.5% DE METHANE ET 30 M	IG DE
CORAX N550 (HAUT) ET LA DETECTION DE CONTOURS OBTENUE (BAS)(TORRADO ET AL., 2017A)	52
FIGURE 31: RESULTATS DE DETERMINATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION NON ETIREE (TORRADO ET AL., 2017A)	53
FIGURE 32: COMPARAISON DES IMAGES OBTENUES PAR VISUALISATION DIRECTE ET SCHLIEREN DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMM	ME DE
ZIRCONIUM(DING ET AL., 2010)	54
FIGURE 33: IMAGES D'OMBROSCOPIE OBTENUES LORS DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME DE FECULE DE MAÏS (WANG ET AL.,	
2006) : flamme laminaire (a) et turbulente (b)	55
FIGURE 34: IMAGES DE PIV OBTENUES EN AMONT D'UNE FLAMME DE LYCOPODIUM (HAN ET AL., 2001)	56
FIGURE 35: RESULTATS DE LA CONCENTRATION EN AMONT D'UNE FLAMME DE LYCOPODIUM (HAN ET AL., 2001)	56

FIGURE 36: IMAGES PAR TOMOGRAPHIE LASER DES PARTICULES EN AMONT D'UNE FLAMME DE FLEURS DE SOUFRE(PROUST, 200	)6). 57
FIGURE 37: SCHEMA D'UN PROTOTYPE DE HARTMANN PERMETTANT DE LIMITER L'EFFET DES PAROIS (YU ET AL. 2016)	58
FIGURE 38: RESULTATS DE LA VISUALISATION DU MOUVEMENT DES PARTICULES EN AMONT D'UNE FLAMME D'ALUMINIUM AVEC	LE
PROTOTYPE SEMI-OUVERT(GAO ET AL. 2015)	58
FIGURE 39: IMAGES OBTENUES PAR VISUALISATION DIRECTE (GAUCHE) ET SCHLIEREN (DROITE) DE LA PROPAGATION D'UNE FLAM	<b>IME</b>
D'ALUMINIUM(SUN ET AL., 2006)	59
FIGURE 40: PROPAGATION D'UNE FLAMME D'ALUMINIUM AU SEIN D'UN BALLON EN LATEX (JULIEN ET AL., 2015B)	59
FIGURE 41: PROPAGATION D'UNE FLAMME D'ALUMINIUM EN CHAMP LIBRE(JULIEN ET AL., 2015B)	60
FIGURE 42: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA POUDRE ETUDIEE.	66
FIGURE 43: IMAGES DE LA POUDRE D'ALUMINIUM ETUDIEE (GRANDISSEMENT 2500X)OBTENUES PAR MEB: POUDRE A (A GAUC	сне) ет
POUDRE B (A DROITE)	67
FIGURE 44: IMAGES DE LA POUDRE D'ALUMINIUM ETUDIEE (40000x)OBTENUES PAR MEB: POUDRE A (A GAUCHE) ET POUDRE	В (А
DROITE)	67
FIGURE 45: RESULTATS D'UNE ANALYSE CHIMIQUE EFFECTUEE PAR LE MEB	68
FIGURE 46: SCHEMA DU PROTOTYPE ELABORE	70
FIGURE 47: SCHEMA DU PRINCIPE DE L'ETUDE DE LA CONCENTRATION PAR DIFFUSION DE MIE	71
FIGURE 48: EXPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE DES IMAGES OBTENUES PAR DIFFUSION DE MIE	72
FIGURE 49: IMAGES $I0$ (A GAUCHE) ET $Ibg$ (A droite) utilisees pour l'analyse de la concentration	73
FIGURE 50: SCHEMA DE LA NAPPE DIVERGENTE AVEC LES NOTATIONS EXPLICITEES	74
FIGURE 51: EXEMPLES D'IMAGES OBTENUES AVANT (A GAUCHE) ET APRES (A DROITE) ANALYSE	74
FIGURE 52: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PIV (EXTRAIT DE WWW.DANTECDYNAMICS.COM)	75
FIGURE 53: EXPLICATION DE L'ACQUISITION D'IMAGES POUR LA PIV	76
FIGURE 54: EXEMPLE D'IMAGE OBTENUE APRES ANALYSE A L'AIDE DU LOGICIEL DYNAMICSTUDIO (UN VECTEUR SUR QUATRE AFF	ICHE)
	76
FIGURE 55: EXPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE UTILISEE EN PIV	77
FIGURE 56: PRINCIPE DU LDA (EXTRAIT DE WWW.DANTECDYNAMICS.COM)	78
FIGURE 57: EXPLICATION DE LA DETERMINATION DU SIGNE DE LA VITESSE : SANS (A GAUCHE) ET AVEC (A DROITE) CELLULE DE BE	≀AGG
	80
FIGURE 58: SCHEMA D'EXPLICATION DE LA METHODE D'ANALYSE DES DONNEES LDA	81
FIGURE 59: TRANSFORMEE DE FOURIER DU SIGNAL LDA	82
FIGURE 60: LIEN ENTRE LA TAILLE DE LA ZONE D'ETUDE ET LES STRUCTURES TOURBILLONNAIRES ACCESSIBLES PAR PIV (ADAPTE	
de(Galmiche, 2014) )	83
FIGURE 61: SCHEMA EXPLICATIF DES MESURES PIV MULTI-ECHELLES ET LDA EN SIMULTANEE	84
FIGURE 62: IMAGES OBTENUES 0,4 SECONDES APRES LA FIN DE L'INJECTION AVEC: LE LARGE (A GAUCHE), L'INTERMEDIAIRE (AU	
MILIEU) ET LE RESTREINT (A DROITE) CHAMPS DE VUE	85
FIGURE 63: CONVERGENCE DE LA VITESSE MOYENNE EN FONCTION DU NOMBRE D'ESSAIS: POUR LE CHAMP ZOOME (A), LE CHAM	1P
INTERMEDIAIRE (B) ET LE CHAMP LARGE (C)	86
FIGURE 64: EVOLUTION DE LA CONVERGENCE DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE EN FONCTION DU NOMBRE D'ESSAIS AVEC PLUS	SIEURS
TEMPS APRES L'INJECTION OBTENUE AVEC LE CHAMP INTERMEDIAIRE (TEMPS ENTRE CHAQUE COURBE: 200 MS)	87
FIGURE 65: CARTES DE L'EVOLUTION DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE AU COURS DU TEMPS POUR CHAQUE CHAMP DE VUE: LA	RGE
(A), INTERMEDIAIRE (B) ET RESTREINT (C)	88
FIGURE 66: EVOLUTION DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE MOYENNE POUR CHAQUE CHAMP DE VUE	88
FIGURE 67: EVOLUTION DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE MOYENNE POUR CHAQUE CHAMP DE VUE AVEC LA MEME ZONE D'ET	UDE <b>89</b>
FIGURE 68: COMPARAISON DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE OBTENUE PAR LDA ET AVEC LES DIFFERENTS CHAMPS DE VUE DE	PIV 90
FIGURE 69: EVOLUTIONS DES TEMPERATURES ET DE LA PRESSION LORS DE L'INJECTION DE LA POUSSIERE	93
FIGURE 70: EVOLUTION DE LA DISPERSION DES PARTICULES AU SEIN DU PROTOTYPE	94
FIGURE 71: RESULTATS OBTENUS AVANT (EN HAUT) ET APRES (EN BAS) TRAITEMENT NUMERIQUE	96
FIGURE 72: EVOLUTION DE L'ECART-TYPE SPATIAL DE L'INTENSITE LUMINEUSE ADIMENSIONNEE	96
FIGURE 73: EVOLUTION DU DEGRE D'HOMOGENEITE DE LA SUSPENSION	97
FIGURE 74: EVOLUTION DU DEGRE D'HOMOGENEITE DE LA SUSPENSION SUR LA HAUTEUR DU PROTOTYPE	98
FIGURE /5: EVOLUTION DE L'ECART-TYPE SPATIALE DE L'INTENSITE LUMINEUSE POUR DIFFERENTES MASSES INITIALES	99
FIGURE /6: EVOLUTION DU DEGRE D'HOMOGENEITE DE LA SUSPENSION SUR LA HAUTEUR DU PROTOTYPE POUR DIFFERENTES MA	ASSES
INITIALES (T=1S)	100

FIGURE 77: IMAGES OBTENUES AVANT (A GAUCHE) ET APRES (A DROITE) TRAITEMENT NUMERIQUE (MASSE INITIALE=3 G/TUBE, 1	. S
APRES LA FIN DE L'INJECTION)	. 101
FIGURE 78: EVOLUTION DU DEGRE D'HOMOGENEITE DE LA SUSPENSION SUR LA HAUTEUR DU PROTOTYPE POUR UNE MASSE INITIAI	LE DE
5  G/IUBE	101
FIGURE 79. EVOLUTION DE L'ECART-TYPE SPATIAL DE L'INTENSITE LUMINEUSE AVEC UNE INJECTION À 48/ SUUMS	. 102
4B/300Ms	. 103
FIGURE 81: EVOLUTION DE LA VITESSE MOYENNE EN FONCTION DU TEMPS	. 105
FIGURE 82: EVOLUTION DES FLUCTUATIONS DE VITESSE EN FONCTION DU TEMPS (ECHELLE DES ORDONNEES LOGARITHMIQUE)	. 106
FIGURE 83: EVOLUTION DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE EN FONCTION DU TEMPS	. 107
FIGURE 84: EVOLUTION DE LA VITESSE INSTANTANEE OBTENUE PAR LDA	. 108
FIGURE 85: EVOLUTION DES FLUCTUATIONS DE VITESSE OBTENUES PAR LDA	. 108
FIGURE 86: EVOLUTION DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE OBTENUE PAR LDA	. 109
FIGURE 87: COMPARAISON DES INTENSITES DE LA TURBULENCE OBTENUES PAR PIV ET PAR LDA	. 110
FIGURE 88: ATTENUATION DES VARIATIONS DE L'ECOULEMENT EN FONCTION DU NOMBRE DE STOKES DE LA PARTICULE (MENDEZ E AL., 2018)	ет . 111
FIGURE 89: SCHEMA DU DEROULEMENT D'UN ESSAI DE PROPAGATION	. 116
FIGURE 90: SCHEMA DU PROTOTYPE MULTI-ETAGES	. 117
FIGURE 91: SCHEMA EXPLICATIF DU PRINCIPE DE L'INFLAMMATEUR	. 119
FIGURE 92: EVOLUTION DE LA TENSION ET DE L'INTENSITE DANS L'ARC ELECTRIQUE	. 119
FIGURE 93: SCHEMA DE LA MISE EN PLACE DES CAPTEURS DE PRESSION : POUR LE PROTOTYPE A 1 ETAGE (A GAUCHE) ET POUR LE	
PROTOTYPE MULTI-ETAGES (A DROITE)	. 120
FIGURE 94: SCHEMA EXPLICATIF DU PRINCIPE DE L'EDR	. 122
FIGURE 95: SCHEMA DE PRINCIPE DE L'OMBROSCOPIE	. 123
FIGURE 96: SCHEMA DE PRINCIPE DU SCHLIEREN	. 124
FIGURE 97: MONTAGE EN Z UTILISE POUR LES TECHNIQUES D'OMBROSCOPIE ET DE SCHLIEREN	. 125
FIGURE 98: CONTOUR DE FLAMME DETECTE PAR L'ALGORITHME	. 126
FIGURE 99: METHODE D'APPROXIMATION DE LA SURFACE 3D DE LA FLAMME, EXTRAIT DE (KAHLILI, 2012)	. 127
FIGURE 100: IMAGES SATUREES OBTENUES PAR VISUALISATION DIRECTE DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME DE ZIRCONIUM (DIN	IG ET
AL., 2010)	. 128
FIGURE 101: INFLUENCE DE LA QUALITE DES IMAGES SUR L'ANALYSE	. 128
FIGURE 102: IMAGES PAR VISUALISATION DIRECTE DE LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME (TEMPS ENTRE LES IMAGES : 10 M	is):
a) Images non saturees b) Images saturees numeriquement	. 129
FIGURE 103: INFLUENCE DE LA SATURATION DES IMAGES SUR L'EVOLUTION DE LA POSITION DU FRONT DE FLAMME	. 130
FIGURE 104: INFLUENCE DE LA SATURATION DES IMAGES SUR L'EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION	. 130
FIGURE 105: INFLUENCE DE LA SATURATION DES IMAGES SUR L'EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMBUSTION	. 131
FIGURE 106: SCHEMA DU MONTAGE MIS EN PLACE POUR LA VISUALISATION PAR LES 3 TECHNIQUES OPTIQUES EN SIMULTANEE	. 133
FIGURE 107: VISUALISATION DE LA PROPAGATION AUTOUR DES ELECTRODES: A) PAR VISUALISATION DIRECTE, B) PAR OMBROSCOP	PIE ET
C) PAR SCHLIEREN	. 134
FIGURE 108: VISUALISATION DE LA PROPAGATION DANS LA PARTIE SUPERIEURE: A) PAR VISUALISATION DIRECTE, B) PAR	
OMBROSCOPIE, C) PAR SCHLIEREN	. 135
FIGURE 109: EVOLUTION DE LA HAUTEUR DE LA FLAMME EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMPLOYEE AUTOUR DES ELECTRODES	. 136
FIGURE 110: EVOLUTION DE LA HAUTEUR ET DE L'INTENSITE LUMINEUSE DE LA FLAMME EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMPLOYE	E 136
FIGURE 111: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMPLOYEE AUTOUR DES ELECTRODES	137
FIGURE 112: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMPLOYEE DANS LA PARTIE SUPERIEURI	F138
FIGURE 112: EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMPLISTION EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMILOTE DANS ELL'ANTE SU ENTENDES	138
FIGURE 114: EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMBUSTION EN FONCTION DE LA TECHNIQUE EMPLOYEE DANS LA PARTIE SUDERIEURE	139
FIGURE 115: SCHEMA DES ZONES DE VISUALISATION UTILISEES POUR L'ETUDE COMPARATIVE	. 140
FIGURE 116: IMAGES ORTENUES SELON DEUX PLANS DE VISUALISATION: PERPENDICULAIRE (EN HALIT) ET PARALLELE (EN BAS)	. 141
FIGURE 117: EVOLUTION DE LA HAUTEUR DE LA FLAMME EN FONCTION DU PLAN DE VISUAL ISATION	. 142
FIGURE 118: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DU PLAN DE VISUALISATION	. 142
FIGURE 119: EVOLUTION DU RAPPORT DES FACTEURS CORRECTIFS DE LA SURFACE DE LA FLAMME OBTENUS POUR CHAQUE PI AN D	)E
VISUALISATION	. 143

FIGURE 120: EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMBUSTION EN FONCTION DU PLAN DE VISUALISATION	144
FIGURE 121: EVOLUTION DE LA PRESSION DANS L'ENCEINTE (CAPTEUR HAUT)	146
FIGURE 122: IMAGES DE PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME	147
FIGURE 123: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DE LA FLAMME	148
FIGURE 124: COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION, DE L'INTENSITE LUMINEUSE DE LA FLAMME ET	DE LA
SURPRESSION	149
FIGURE 125: REPETABILITE DES ESSAIS EN TERMES DE PROPAGATION DU FRONT DE FLAMME	150
FIGURE 126: REPETABILITE DES ESSAIS EN TERMES DE SURPRESSION	151
FIGURE 127: OBSERVATION DE L'EXPLOSION D'UNE PARTICULE D'ALUMINIUM (TEMPS ENTRE IMAGES = 0.133 MS)	152
FIGURE 128: OBSERVATION DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME AUTOUR DES ELECTRODES	153
FIGURE 129: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DE LA POUDRE APRES EXPLOSION	154
FIGURE 130: IMAGES DE LA POUDRE APRES EXPLOSION OBTENUES PAR MEB GRANDISSEMENT: 10000x (A GAUCHE) ET 5000 DROITE).	)0x (A 155
FIGURE 131: EVOLUTION DE LA PRESSION DANS LE PROTOTYPE MULTI-ETAGES	156
FIGURE 132: IMAGES DE PROPAGATION DU FRONT DE FLAMMES DANS LE PROTOTYPE MULTI-ETAGES	157
FIGURE 133: COMPARAISON DES EVOLUTIONS DE LA SURPRESSION. DE L'INTENSITE LUMINEUSE DE LA FLAMME ET DE SA VITES	SE DE
PROPAGATION	158
FIGURE 134: EVOLUTION DE LA PRESSION ET DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME LORS D'UN ESSAI REALISE SANS DISQUE DE RI	UPTURE
·	159
FIGURE 135: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION EN FONCTION DE LA HAUTEUR DU FRONT DE FLAMME LORS D'ESSAIS	5
REALISES AVEC OU SANS DISQUE DE RUPTURE	160
FIGURE 136: EVOLUTION DE LA PRESSION DANS L'ENCEINTE EN FONCTION DU NOMBRE DE PAROIS EN ALUMINIUM	161
FIGURE 137: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DE LA FLAMME EN FONCTION DU NOMBRE DE PAROIS EN ALUMINIU	м 162
FIGURE 138: EVOLUTION DES PARAMETRES DE COMPARAISON EN FONCTION DU NOMBRE DE PAROIS EN ALUMINIUM	163
FIGURE 139: IMAGES DE PROPAGATION DE FLAMME OBTENUES PAR VISUALISATION DIRECTE	166
FIGURE 140: IMAGES DE PROPAGATION DE LA FLAMME OBTENUES PAR OMBROSCOPIE SUR LA PARTIE SUPERIEURE DU PREMIEF	R ETAGE
(TEMPS ENTRE IMAGES: 9,78MS)	166
FIGURE 141: IMAGES DE PROPAGATION DE LA FLAMME OBTENUES PAR OMBROSCOPIE SUR LA PARTIE SUPERIEURE DU DEUXIEN	/IE ETAGE
(TEMPS ENTRE IMAGES: 1,87MS)	167
FIGURE 142: COMPARAISON DE LA PROPAGATION OBTENUE PAR VISUALISATION DIRECTE ET PAR OMBROSCOPIES	167
FIGURE 143: EVOLUTION DE LA VITESSE DE PROPAGATION OBTENUE PAR VISUALISATION DIRECTE	168
FIGURE 144: EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMBUSTION OBTENUE SUR LES DEUX ZONES DE VISUALISATION PAR OMBROSCOPI	e 168
FIGURE 145: IMAGES ILLUSTRANT UNE LIMITE DE L'UTILISATION DE LA METHODE DU TUBE OUVERT (AUGMENTATION DE L'EPAI	SSEUR
DE LA FLAMME)	170
FIGURE 146: SCHEMA DE LA MISE EN PLACE DE LA PIV EN AMONT DU FRONT DE FLAMME	172
FIGURE 147: IMAGES OBTENUES PAR LA TECHNIQUE DE PIV EN AMONT DU FRONT DE FLAMME AVANT (A GAUCHE) ET APRES (	A
DROITE) TRAITEMENT NUMERIQUE	173
FIGURE 148: EXPLICATION DE LA METHODE DIRECTE D'EVALUATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION	174
FIGURE 149: COMPARAISON DE LA VITESSE DE PROPAGATION ET DE LA VITESSE DE L'ECOULEMENT EN MONT DU FRONT DE FLA	MME
	175
FIGURE 150: EVOLUTION DE LA VITESSE DE COMBUSTION OBTENUE PAR LA METHODE DE PIV EN AMONT DU FRONT DE FLAMM	1E 175
FIGURE 151: LIMITE DE LA METHODE DE PIV EN AMONT DU FRONT DE FLAMME	176

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: TEMPERATURES DE FUSION ET D'EBULLITION DE L'ALUMINIUM ET DE L'ALUMINE	16
TABLEAU 2: GRANULOMETRIE DE LA POUDRE	56
TABLEAU 3: RESULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE EFFECTUEE AU MEB	58
TABLEAU 4: SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES OPTIQUES DES CAMERAS UTILISEES	84
TABLEAU 5: ETUDE DE LA VARIATION DE VOLUME AU SEIN DU PROTOTYPE EN FONCTION DE LA CONFIGURATION EXPERIMENTALE	93

TABLEAU 6: REPRODUCTIBILITE EN TERMES DE CONCENTRATION EN FONCTION DE LA MASSE INITIALE	94
TABLEAU 7: VALEURS DE L'EXPOSANT N DE LA LOI DE DECROISSANCE DE LA TURBULENCE OBTENUE POUR CHAQUE FLUCTUATION	DE
VITESSE	106
TABLEAU 8: RECAPITULATIF DE LA SENSIBILITE DES CAPTEURS UTILISES	120
TABLEAU 9: SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES OPTIQUES DES CAMERAS UTILISEES	133
TABLEAU 10: ETUDE DE LA REPETABILITE DES ESSAIS A 1 ETAGE	151
TABLEAU 11: DIAMETRES CARACTERISTIQUES DE LA POUDRE APRES INFLAMMATION	154
TABLEAU 12: RESULTATS DE L'ANALYSE CHIMIQUE EFFECTUEE AU MEB SUR LA POUDRE APRES EXPLOSION	155
TABLEAU 13: INFLUENCE DU DISQUE DE RUPTURE SUR LES PARAMETRES DE COMPARAISON	160
TABLEAU 14: CONFIGURATIONS DES ESSAIS D'INFLUENCE DE L'EMISSIVITE DES PAROIS	161
TABLEAU 15: RESULTATS DE PRESSION ET DE VITESSE DE PROPAGATION OBTENUS POUR LES DIFFERENTS ESSAIS REALISES	164
TABLEAU 16: INFLUENCE DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE SUR LES PARAMETRES DE COMPARAISON	164
TABLEAU 17: SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES OPTIQUES DES CAMERAS UTILISEES	165
TABLEAU 18: RECAPITULATIF DE QUELQUES ETUDES DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME	187

## INTRODUCTION GENERALE

Les installations industrielles présentent des risques d'accidents pouvant avoir des conséquences majeures pour les humains ou pour l'environnement. Ces risques sont liés à l'utilisation et au stockage de substances dangereuses sur site : substances inflammables, toxiques, explosives... De nombreux accidents se sont produits sur des installations industrielles de différents domaines. Les principaux risques redoutés sur ces installations industrielles sont : l'explosion, l'incendie et la dispersion de substances toxiques (dans l'air ou dans le milieu aquatique). Une directive européenne, sur les risques d'accidents industriels majeurs, a été adoptée suite à l'accident de Seveso (en Italie le 10 juillet 1976) : cette directive est généralement appelée directive SEVESO. Les installations Classées pour la Protection de l'Environnement), sont notamment soumises à cette directive.

Cette directive SEVESO impose aux ICPE de quantifier le risque présent au sein de leurs sites industriels. Cette quantification s'effectue en deux temps : une quantification de la probabilité et une quantification des conséquences. Ainsi, afin de pouvoir quantifier ces deux éléments, il est indispensable à l'industriel de connaître la physique du phénomène redouté (explosion, dispersion de polluants...). De plus, si le risque (combinaison de la probabilité d'occurrence d'un phénomène et de ses conséquences potentielles) est jugé trop important, l'industriel doit alors proposer des moyens afin que ce dernier soit à un niveau acceptable. Ces moyens s'appuient notamment sur des barrières de prévention, permettant d'éviter l'apparition du phénomène dangereux (diminution de la probabilité) et des barrières de protection, permettant de limiter les conséquences en cas d'accident (diminution de la gravité). Une nouvelle fois la mise en place de telles barrières nécessite la connaissance du phénomène redouté : ses conditions d'apparition ainsi que la physique (et la dynamique) du phénomène.

L'explosion est l'un des phénomènes les plus redoutés dans les industries. Les explosions rencontrées dans les industries peuvent être divisées en deux catégories : les explosions physiques et chimiques. Une explosion physique est une explosion sans réaction chimique. Un exemple d'explosion physique est l'explosion d'un réservoir de gaz pressurisé. Un autre type d'explosion concerne le changement de phase rapide d'un gaz liquéfié : ce type d'explosion est nommé BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) et concerne par exemple les réservoirs de GPL. Au contraire, lors d'une explosion chimique une réaction chimique a lieu : généralement la réaction de combustion avec l'oxygène présent dans l'air. Un cas particulier d'explosions chimiques concerne les substances de type TNT pour lesquelles une réaction de décomposition provoque l'explosion.

Les explosions chimiques peuvent être subdivisées en trois catégories principales dépendant du combustible provoquant l'explosion : les explosions de gaz, les explosions de poussières et les explosions hybrides (mélange de poussières et de gaz inflammables). Il est connu du grand public que les industries pétrochimiques présentent des risques d'explosion, notamment d'explosions de gaz. Cependant, un grand nombre d'industries présente un risque d'explosion de poussières. En effet, toutes les poussières combustibles si elles sont suffisamment fines, et si elles sont en suspension dans l'air, sont susceptibles de provoquer une explosion. Or, une très grande variété de poudres est combustible : les composés organiques tels que le charbon, le sucre, la farine par exemple ou encore les métaux tels que l'aluminium ou encore le magnésium. Ainsi, de nombreuses industries de différents domaines peuvent être confrontées à ce risque.

De nombreuses études se sont intéressées au phénomène d'explosion de gaz. L'état actuel des connaissances permet de prévoir et de modéliser assez précisément ce phénomène. Cependant, l'état des connaissances sur les explosions concernant des particules solides combustibles est plus restreint. Comme nous le verrons par la suite, ceci est notamment dû à la plus grande difficulté à réaliser des essais d'explosions de poussières répétables et comparables sur différentes installations expérimentales. Cependant, une connaissance du phénomène est indispensable afin que les études à réaliser dans le cadre de la directive SEVESO puissent être réalisées. Afin d'obtenir une première compréhension du phénomène, des données concernant la sensibilité de la poudre et la sévérité de l'explosion sont déterminées expérimentalement. La sensibilité d'une poudre représente la capacité de cette dernière à provoquer une explosion. Cette donnée est utile afin de quantifier la probabilité d'occurrence de l'explosion dans un contexte industriel. De plus, cette donnée permet de proposer et de dimensionner des mesures de prévention. La sévérité de l'explosion représente les conséquences potentielles engendrées par l'explosion de la poudre étudiée. Ce paramètre est utilisé pour quantifier la gravité d'une explosion potentielle. Il est aussi utile afin de proposer et de dimensionner des mesures de protection. Pour certaines études des conséquences de l'explosion potentielle, une étude détaillée du phénomène redouté est nécessaire. Dans ce cas l'explosion peut par exemple être modélisée numériquement à partir de logiciels de CFD (Computationnal Fluid Dynamics). La modélisation numérique nécessite alors une compréhension détaillée des phénomènes physiques de propagation en jeu lors d'une explosion. Des modèles ont été élaborés, et sont aujourd'hui utilisés dans de nombreuses études, pour les explosions de gaz. Ces derniers sont alors adaptés afin d'être utilisés pour modéliser des explosions de poussières. Ces modèles semblent être adaptés au cas des explosions de poussières organiques. Cependant, comme nous le verrons par la suite, l'adaptation de ces modèles au cas des explosions de poussières métalliques semble inappropriée. Ainsi, la compréhension et la modélisation des explosions de poussières métalliques ne semblent pas actuellement possibles.

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein de l'Institut des Sciences des Risques de l'IMT Mines Alès. Ils entrent dans le cadre d'un projet en collaboration avec le Laboratoire d'Incendie et d'Explosion (LIE) de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) de Cadarache. Une problématique rencontrée par ce laboratoire est la modélisation numérique de la propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières métalliques. En effet, lors du démantèlement de centrales nucléaires, un tel risque est présent. Par exemple, lors de la section de canalisations métalliques, des poussières issues de la canalisation mais aussi présentes au sein de cette dernière (notamment métalliques) peuvent alors être mises en suspension et provoquer une explosion. La propagation de cette dernière, notamment au sein de canalisations, peut avoir des conséquences catastrophiques sur les installations voisines (effets dominos). Afin de mettre en place des modèles numériques, une étude expérimentale préalable de ce phénomène est nécessaire. Cette étude doit alors permettre de comprendre la physique de propagation de la flamme à modéliser.

Lors de ces travaux de thèse, la propagation de la flamme au sein d'une suspension de poussières métalliques est étudiée. La poussière métallique étudiée est l'aluminium. L'aluminium est choisi car cette substance a été étudiée dans différents domaines, permettant ainsi la comparaison des résultats obtenus avec d'autres études. En effet, les explosions de poussières d'aluminium ont été principalement étudiées dans trois domaines : le domaine militaire (bombes thermobariques), le domaine de l'aérospatial (réacteurs de fusées) et le risque industriel (limiter le risque).

Le but de ce travail est d'observer et de comprendre le phénomène de propagation d'une flamme de poussières métalliques, en vue de sa modélisation numérique. Pour cette étude expérimentale, des prototypes ont spécialement été conçus puis améliorés au cours des différents tests réalisés. Ceci a représenté une première, et importante, partie des travaux de thèse : l'équipe n'ayant jusqu'alors jamais étudié cette problématique d'explosion de poussières. De nombreux moyens métrologiques, notamment des capteurs de surpression et des moyens optiques, ont été mis en place afin de réaliser cette étude. Ce manuscrit, présentant les travaux réalisés au cours de cette thèse, est composé de trois parties.

La première partie de ce manuscrit correspond à une analyse bibliographique des études, essentiellement expérimentales, portant sur la compréhension du phénomène d'explosion de poussières. Cette partie permet dans un premier temps de présenter des généralités sur le phénomène étudié, ainsi que de présenter les études permettant la détermination des paramètres de sensibilité et de sévérité. Par la suite, une synthèse des principaux travaux expérimentaux d'étude de ces explosions est présentée. Pour ces travaux, les différents prototypes élaborés, ainsi que les moyens métrologiques employés, sont notamment exposés. Cette synthèse permet de mettre en évidence une étape préliminaire primordiale dans l'étude de la propagation de la flamme lors d'une telle explosion : l'étude de la mise en suspension des particules dans le prototype considéré. En effet, la mise en suspension de la poussière, notamment l'homogénéité en termes de concentration de la suspension formée et le niveau de turbulence, influe grandement sur le phénomène de propagation de la flamme.

La deuxième partie de la thèse porte sur la mise en suspension de la poudre dans le prototype élaboré pour ces travaux. Tout d'abord, le prototype, ainsi que la mise en place expérimentale associée à un test, est exposé. Le prototype présenté est le prototype final utilisé pour l'étude présentée par la suite. Cependant, l'élaboration de ce dernier a nécessité la conception et l'élaboration d'autres prototypes préalables : ces prototypes ont par la suite été améliorés afin d'obtenir une suspension de poussières homogène en termes de concentration. Par la suite, les méthodes optiques permettant l'étude de la concentration en poussières de la suspension formée (méthode de diffusion de Mie), ainsi que l'étude de la turbulence au sein de l'écoulement (méthode Particle Image Velocimetry (PIV) et Laser Doppler Anemometry (LDA)), sont présentées. Les méthodes d'analyse des résultats obtenus pour quantifier l'homogénéité et le niveau de turbulence sont aussi détaillées. De plus, une étude préliminaire permet d'optimiser les mesures PIV effectuées par la suite. Enfin, les résultats de concentration et de turbulence obtenus lors de la mise en suspension de la poudre dans le prototype sont analysés. Cette partie permet alors de faire des recommandations pour l'étude de la propagation de la flamme ainsi que pour l'étude de l'influence de la turbulence sur cette propagation.

La troisième, et dernière, partie de ce manuscrit concerne la propagation de la flamme lors de l'explosion de la poussière d'aluminium étudiée. Dans un premier temps, les deux prototypes permettant l'étude de la propagation à deux échelles différentes sont exposés. Par la suite, les méthodes optiques employées pour la visualisation de cette propagation sont exposées (visualisation directe, ombroscopie et schlieren). La vitesse de propagation, correspondant à la vitesse de propagation de la flamme dans le référentiel du laboratoire, peut directement être déterminée à partir des images obtenues lors de différents essais. Cependant, cette vitesse dépend fortement du prototype et des conditions expérimentales utilisés : ainsi, des valeurs de vitesses de propagation sont difficilement comparables. Une méthode permettant la détermination de la vitesse de combustion (vitesse de consommation des réactifs par le front de flamme) à partir de cette vitesse de propagation est abordée : la méthode dite du tube ouvert. A ce moment les résultats d'études préliminaires sont présentés. Ces dernières permettent de présenter les limites de cette méthode et de proposer des recommandations pour les essais présentés dans la suite de ce manuscrit. Enfin, l'étude du phénomène de propagation, au sein des deux prototypes de dimensions différentes élaborés, est présentée. Une partie de cette étude porte sur l'influence du niveau de turbulence initiale sur la propagation du front de flamme. Cette partie de l'étude s'appuie donc sur les résultats de mise en suspension préalablement présentés afin de connaître le niveau de turbulence au moment de l'ignition de la suspension formée. Par la suite, l'étude de la vitesse de combustion sur le prototype de plus grande dimension est présentée. Certaines limites potentielles d'utilisation de cette méthode sont alors évoquées. Enfin, une nouvelle méthode de détermination de cette vitesse de combustion est proposée en perspectives.

# PARTIE A : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

I)	S EXPLOSIONS DE POUSSIERES	14
I.1	Generalites	
	.1) Les poussières combustibles	14
	.2) Le phénomène d'explosion de poussières	14
	.3) Comparaison aux explosions de gaz	17
	.4) Accidents d'explosions de poussières	18
1.2	L'EXPLOSIVITE D'UNE POUDRE	19
	2.1) Etude de l'explosivité	19
	I.2.1.1) Etude de la sensibilité	19
	L'Energie Minimale d'Inflammation (EMI)	19
	La Concentration Minimale d'explosion (CME)	20
	La Température Minimale d'Inflammation (TMI)	21
	I.2.1.2) Etude de la sévérité	
	2.2) Les facteurs influents	
	I.2.2.1) Taille des particules	
	1.2.2.2) La concentration	
	1.3) L'Importance de la turbulence	
	(2.2.3.1) Generalites sur la turbuience	20
	Grandeurs caractéristiques	27 28
	1.2.3.2) Influence de la turbulence sur les caractéristiques de l'explosivité	
II) EXPL	AT DE L'ART SUR L'ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME LORS D'UN ION DE POUSSIERES	E 31
П.	GENERALITES SUR L'ETUDE DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME	
	1.1) Les prototypes généralement utilisés	31
	<ul> <li>Rôle de la turbulence sur la propagation du front de flammes</li> </ul>	33
	II.1.2.1) Flammes laminaires et turbulentes	33
	II.1.2.2) L'influence de la turbulence sur la propagation du front de flammes	35
П.	ETUDE DE L'ETAT INITIAL DE LA SUSPENSION	
	2.1) Etude la concentration	36
	II.2.1.1) Par pesée	36
	II.2.1.2) Par extinction lumineuse	38
	II.2.1.3) Par diffusion de Mie	39
	2.2) Etude de la turbulence	41
	II.2.2.1) Méthodes intrusives	
	II.2.2.2) Particle Image Velocimetry - PIV	
	11.2.2.5) Laser Doppier Alternometry - LDA	
п.		
п.	RESULIAIS DE PROPAGATION DE FLAMMES	
	2.2) Viewalisation directo	
	<ul> <li>D.21 Visualisation des gradients d'indice de réfraction</li> <li>21 Visualisation des gradients d'indice de réfraction</li> </ul>	
	<ul> <li>visualisation de l'ácoulement en amont du front de flamme</li> <li>Visualisation de l'ácoulement en amont du front de flamme</li> </ul>	
	איז איזטענווטון עב ד בנטעובווובוון בוו עוווטוון עע זוטוון עב זענווווווב	ככ רי
11.4	AUTRES ETUDES	
	<ul> <li>4.1 Suns ejjets de purois</li> <li>4.2) Etudo quos dos obstaclos</li> </ul>	
	+.2) Lluue uvel ues obstucies	
CON	JSIONS DE LA PARTIE A	61

### I) LES EXPLOSIONS DE POUSSIERES

Cette première partie présente quelques généralités sur les études des explosions de poussières. Dans un premier temps le phénomène mis en jeu est défini ainsi que la spécificité de telles explosions. Les tests normés permettant de caractériser une poudre ainsi que les facteurs influents sur son explosivité sont explicités dans une seconde partie.

#### I.1) GENERALITES

Une explosion de poussières peut être décrite comme une réaction exothermique rapide entre une poussière combustible et un gaz comburant. Dans le cadre de cette étude, le comburant est l'oxygène présent dans l'air. Cette première partie va s'attacher à définir les poussières susceptibles d'engendrer de telles explosions, avant de décrire ce phénomène. Par la suite, ces explosions seront comparées aux explosions de gaz afin de montrer en quoi ces deux phénomènes bien qu'étant proches sur certains points, présentent des différences nécessitant une modélisation différente. Enfin, quelques exemples d'accidents liés aux explosions de poussières seront présentés, montrant ainsi la diversité des domaines dans lesquels de telles explosions peuvent survenir.

#### I.1.1) LES POUSSIERES COMBUSTIBLES

Une poussière est un matériau finement divisé qui répond à différentes normes selon plusieurs critères. La norme BS 2955 est une norme britannique qui distingue les poudres des poussières. Les poudres sont des matériaux avec des tailles de particules inférieures à 1 mm et les poussières des matériaux avec des tailles de particules inférieures à 76  $\mu$ m. La norme NFPA 68, issue de la « National Fire Protection Association », définit une poussière comme tout solide finement divisé ayant des tailles de particules inférieures ou égales à 420  $\mu$ m. Le code français du travail dans l'article R4222-3 propose une définition différente du terme de poussières : « toute particule solide dont le diamètre aérodynamique est au plus égal à 100  $\mu$ m ou dont la vitesse limite de chute, dans les conditions normales de température, est au plus égale à 0,25 mètre par seconde ».

Par ailleurs, toute poussière si elle est suffisamment fine sera susceptible de donner lieu à une explosion si elle est combustible, c'est-à-dire si elle peut réagir de façon exothermique avec un gaz comburant qui est généralement l'air. Les poudres combustibles, peuvent être divisées en plusieurs catégories. On peut citer à titre d'exemple quelques poussières organiques naturelles : blé, charbon, sucre...; des poussières organiques synthétiques : pigments, plastiques...; et des poussières métalliques telless que l'aluminium, ou encore le fer. Au vu de la grande variété de types de poussières susceptibles d'engendrer une explosion, ce risque est présent dans un grand nombre d'industries : agroalimentaires, sidérurgiques, chimiques...

#### I.1.2) LE PHENOMENE D'EXPLOSION DE POUSSIERES

Les effets potentiels des explosions de poussières sont redoutés dans le cadre du risque industriel, à cause des effets thermiques, des effets de surpression (essentiellement en présence de confinement) et des effets missiles.

Les différents facteurs nécessaires pour qu'une explosion de poussières puisse avoir lieu sont représentés sur l'hexagone des explosions de poussières (Figure 1). Tout d'abord, il faut la présence d'un comburant (généralement l'air dans le cadre du risque industriel), d'un combustible finement divisé (la poussière combustible) et d'une source d'inflammation: ces trois conditions représentent le triangle du feu. Cependant, afin qu'une explosion puisse avoir lieu, trois autres conditions sont nécessaires :

- La poussière doit être en suspension : en condition industrielle, la poussière peut soit être initialement en suspension de par le procédé mis en jeu, soit être mise en suspension par une première explosion, engendrant ainsi une nouvelle explosion généralement appelée explosion secondaire. Ce point est crucial dans l'étude des explosions de poussières puisque la mise en suspension des particules, et donc la concentration et le niveau de turbulence du nuage, aura une influence importante sur la sévérité de l'explosion.
- La concentration en poussière doit être comprise dans son domaine d'explosivité. La limite basse de l'intervalle est appelée concentration minimale d'explosion (CME).
- Le confinement. Cette dernière condition n'est pas toujours citée, car des explosions de poussières ont été observées en l'absence de confinement. Cependant, les effets de pression sont généralement plus importants en présence de confinement : sans confinement, il y a le plus souvent une combustion sans effets de pression.



Figure 1: Hexagone des explosions de poussières

Différents types de réactions sont observés, dépendant notamment du type de poussière mise en jeu (Kahlili, 2012) :

- La première possibilité est une réaction d'oxydation directement à la surface des particules et concerne les poussières métalliques. C'est une réaction hétérogène entre le gaz comburant et le combustible solide.
- La réaction peut également avoir lieu en phase gazeuse. Dans ce cas, le mécanisme se décompose en deux temps : dans un premier temps, la poussière est partiellement transformée en phase gazeuse. Ensuite une réaction a lieu entre la poussière en phase gazeuse et l'oxygène présent dans l'air : la réaction est ainsi homogène. Le soufre et le polyéthylène réagissent selon ce mécanisme.
- Le troisième type de réaction est une combinaison des deux précédents. Dans un premier temps, une partie du combustible devient gazeux en amont du front de flamme (zone de préchauffage). Ensuite, ce combustible gazeux réagit en phase homogène avec l'oxygène. Cette combustion va alors permettre à la partie de combustible restée solide

de réagir à son tour : cette fois-ci en phase hétérogène. Ce mécanisme concerne la plupart des poussières, notamment organiques.

Les types d'explosion tels que présentées précédemment sont une vision simplifiée du phénomène se produisant réellement au cours d'une explosion d'un nuage de particules. En effet, la phénoménologie peut aussi dépendre de la granulométrie des particules, comme par exemple avec les particules d'aluminium. La Figure 2 représente les étapes du mécanisme de combustion d'une particule d'aluminium (Puri, 2008). Généralement, les particules d'aluminium sont oxydées en surface sous forme d'alumine ( $Al_2O_3$ ). Afin de comprendre ce mécanisme, il est important de connaître les températures de fusion et d'ébullition de l'aluminium et de l'alumine. Ces températures sont indiquées dans le Tableau 1.

	Température de fusion	Température d'ébullition
Aluminium	933 K – 660 °C	2791 K – 2518 °C
Alumine	2327 K – 2054 °C	4000 K – 3727 °C

Tableau 1: Températures de fusion et d'ébullition de l'aluminium et de l'alumine

Dans un premier temps (Stage 1), la particule est chauffée : des transformations de phase ont alors lieu au sein de la couche d'oxyde présente en surface. La réaction entre l'oxygène et l'aluminium est hétérogène et limitée par la diffusion de l'aluminium, ou de l'oxygène, à travers la couche d'oxyde. Lorsque la température de fusion de l'aluminium est atteinte (933 K), des éclatements partiels de la couche d'oxyde sont observés dus aux contraintes mécaniques sur cette couche solide jusqu'à 2328 K (Stage 2). L'oxygène peut alors réagir directement en phase hétérogène avec l'aluminium liquide sans être limité par la diffusion au travers de la couche d'oxyde (Stage 3).

Pour des particules de taille nanométrique, tout l'aluminium présent dans la particule aura réagi en phase hétérogène avant que la température de fusion de l'alumine ne soit atteinte. Pour des particules de taille micrométrique, et pour une température supérieure à 2328 K, l'oxyde va fondre et former un « capuchon » liquide, ne recouvrant plus l'intégralité de la poussière d'aluminium. (Stage 4).

Pour ces particules micrométriques, la réaction va se poursuivre en phase homogène avec un front de flamme détaché de la surface de la particule. En effet, lorsque l'aluminium atteindra son point d'ébullition (2792 K), l'aluminium sous forme gazeux réagira avec l'oxygène présent dans l'air avec un front de flamme détaché de la surface de la particule (Stage 5).

Ainsi, les particules nanométriques réagiront en phase hétérogène : réaction complète avant d'atteindre la température de fusion de l'oxyde et la température d'ébullition de l'aluminium. Les particules micrométriques réagiront elles aussi dans un premier temps en phase hétérogène. Cependant, après avoir atteint la température d'ébullition de l'aluminium, la réaction aura lieu en phase homogène selon un front de flamme détaché de la surface de la particule.



*Figure 2: étapes de la combustion d'une particule d'aluminium (Puri, 2008)* 

#### I.1.3) COMPARAISON AUX EXPLOSIONS DE GAZ

Les explosions de poussières ont de nombreuses similarités avec les explosions de gaz. En effet, les mélanges, que ce soit gaz combustible/air ou poussières/air, doivent être dans des proportions appropriées pour que l'explosion ait lieu (domaine d'explosivité). De même que pour les explosions de gaz, la turbulence initiale du milieu ainsi que son encombrement vont modifier la violence de l'explosion. Les explosions de poussières peuvent aussi engendrer des phénomènes de détonation sous certaines conditions (Liu et al., 2009). Une déflagration est une explosion au cours de laquelle le front de combustion (front de flamme) se déplace à une vitesse moins élevée que l'onde de surpression créée. Au contraire, lors d'une détonation, ces deux fronts sont confondus et se déplacent à la même vitesse. Les effets d'une détonation sont alors plus importants que ceux provoqués par une déflagration. Pour des conditions données, il existe des Energie Minimale d'Inflammation (EMI) et des Température Minimale d'Inflammation (TMI) pour les explosions de gaz tout comme pour les explosions de poussières.

Cependant, les modèles numériques permettant de prédire les conséquences d'une explosion, existants pour les explosions de gaz, ne peuvent être appliqués aussi facilement au cas des explosions de poussières car ces phénomènes présentent tout de même des différences. Tout d'abord, les explosions de poussières mettent en jeu des particules de tailles plus importantes que les molécules présentes lors des explosions de gaz. Cela entraine pour ces particules un mouvement contrôlé par les forces inertielles. De plus, les particules solides présentes dans les explosions de poussières peuvent s'agglomérer ou stagner au sol pouvant ainsi être la source d'une deuxième explosion si elles sont mises en suspension par une première explosion. Une autre différence entre ces deux types d'explosion est l'épaisseur de la flamme : en effet, dans le cas des explosions de poussières, les flammes sont plus épaisses puisque la zone de réaction est plus grande. Enfin, le mode de transfert de la chaleur est aussi différent : pour les explosions de poussières, la part de rayonnement peut être plus importante, et même devenir le moteur de l'explosion (Houim and Oran, 2015). En effet, les poussières en amont du front de flammes sont susceptibles d'absorber une partie du rayonnement émis par la flamme. Cette absorption va alors entraîner un échauffement des particules en amont du front de flamme, pouvant ainsi entraîner une accélération de la flamme.

La transposition du mécanisme de propagation des flammes dans le cas des prémélanges gazeux au cas des mélanges poussières - gaz comburant est donc controversée dans la littérature. Une telle transposition semble adaptée, et essentiellement utilisée, lorsque le mécanisme de combustion est amorcé par une étape permettant la production de matières volatiles gazeuses. Cependant, cette théorie ne semble pas adaptée au cas des poussières métalliques où la combustion consiste en une réaction d'oxydation à la surface des particules (Kahlili, 2012).

Les mécanismes concernant la propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières, essentiellement dans le cas de réactions en surface comme par exemple pour les explosions de poussières métalliques, restent moins connus que dans le cadre des explosions de gaz. Une des raisons expliquant cette différence est due aux difficultés expérimentales pour obtenir des essais en nombre suffisant et comparables, par exemple en termes de turbulence (Paquet, 2012). En effet, la turbulence initiale du mélange va fortement influer sur le phénomène, modifiant les caractéristiques d'explosivité et la propagation même de la flamme. Or, le phénomène d'explosion de poussières intervient lorsque des particules sont en suspension dans l'air. Cette caractéristique nécessite donc un niveau initial de turbulence non nul. Ainsi, contrairement au cas des flammes de pré-mélanges gazeux, il sera difficile, voire impossible, d'obtenir une propagation de flamme dans un mélange initialement non turbulent. Or dans un tel mélange dans le cas de mélanges gazeux, la vitesse de flamme laminaire obtenue est une donnée intrinsèque utilisée dans les modèles afin de prévoir la vitesse des flammes en conditions turbulentes. Ainsi, le niveau de turbulence initial explique notamment pourquoi les explosions de poussières sont plus difficilement étudiables comparées aux explosions de prémélanges gazeux.

#### I.1.4) ACCIDENTS D'EXPLOSIONS DE POUSSIERES

Comme cela a été montré dans la partie I.1.1, de nombreuses poussières sont susceptibles d'engendrer une explosion. Ce risque est rencontré dans un très grand nombre de sites industriels, et les accidents touchent des industries très variées (agroalimentaires, sidérurgiques, chimiques...).

Les explosions de poussières sont un phénomène rencontré depuis longtemps : le premier accident recensé est une explosion de farine qui a eu lieu le 14 décembre 1785 à Turin dans une boulangerie (Traoré, 2007). En s'appuyant sur la base de données ARIA du Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (BARPI), (Kahlili, 2012) a recensé 118 explosions de poussières en France entre 1980 et 2005.

Les paragraphes suivants détaillent quelques exemples d'accidents:

- Compagnie des Mines de Courrières (France, 10 mars 1906) : une explosion de poussières a fait suite à une première explosion de grisou, se propageant à travers 110kms de galerie et faisant 1099 morts. Cet accident, la plus importante catastrophe minière en Europe, illustre la violence potentielle des explosions secondaires : en effet, des explosions se sont produites de proche en proche après mise en suspension de la poussière par le souffle.

- Silo de Blaye (France, 20 août 1997) : 28 cellules cylindriques en béton sur les 44 constituant le silo de céréales de 37 150 tonnes ont explosé alors qu'un camion transférait du maïs dans le silo. L'explosion fit alors 11 morts et 1 blessé grave.

- Imperial Sugar Company (Etats-Unis, 7 février 2008): deux explosions se sont produites dans une raffinerie de sucre. Une boule de feu s'est alors élevée au-dessus de la raffinerie, entraînant un important incendie. Il a fallu 7 jours aux secours pour éteindre ce dernier:, 14 employés décédèrent et 39 furent gravement blessés. La première explosion aurait par son souffle mis en suspension le sucre présent dans l'usine, entraînant alors une explosion secondaire très violente.

- Formosa Fun Coast (Taïwan, 27 juin 2015) (Chang et al., 2016). Une explosion a eu lieu dans un parc aquatique suite à l'envoi sur la foule de fécule de maïs colorée, cette dernière s'est alors enflammée brûlant grièvement de nombreuses personnes. Le bilan fut de 499 blessés, dont plus de 200 blessés graves et 15 personnes décédèrent suite à leurs blessures.

#### I.2) L'EXPLOSIVITE D'UNE POUDRE

Un premier type d'étude des explosions de poussières consiste à caractériser le phénomène au travers de tests normalisés. Les résultats de ces tests sont nécessaires à l'implémentation de mesures de protection et de prévention au sein des industries : ces données sont les caractéristiques d'explosivité d'une poudre. Dans cette partie, l'étude de l'explosivité d'une poudre sera présentée, avec notamment les différents tests normalisés permettant de la caractériser. Ensuite, l'influence de paramètres spécifiques sera détaillée. Enfin, un focus sera mis sur l'importance particulière de la turbulence initiale du mélange sur ces caractéristiques.

#### I.2.1) ETUDE DE L'EXPLOSIVITE

L'étude de l'explosivité d'une poudre se décompose en deux études, la sensibilité à l'inflammation et la sévérité de l'explosion. Par analogie avec les études de danger, la sensibilité se rapproche de la détermination de la probabilité d'inflammation et la sévérité est comparable à l'étude de la gravité de l'explosion potentielle. Ces données s'obtiennent à l'aide de tests normalisés, présentés dans ce paragraphe.

#### I.2.1.1) ETUDE DE LA SENSIBILITE

L'étude de la sensibilité permet notamment, dans un cadre industriel, de mettre en place des mesures de prévention contre les explosions. En effet, elle permet de définir les situations pour lesquelles une explosion de ce type peut avoir lieu : quelle est la concentration minimale en poussières ? Quelle est l'énergie minimale de la source d'inflammation nécessaire pour amorcer l'explosion ? A partir de quelle température de paroi, la poudre à son contact risque de s'enflammer ? La sensibilité de la poudre à l'explosion se définit notamment à l'aide de trois caractéristiques : la concentration minimale d'explosion (CME), l'énergie minimale d'inflammation (EMI), et la température minimale d'inflammation (TMI).

#### L'ENERGIE MINIMALE D'INFLAMMATION (EMI)

L'EMI correspond à la plus faible énergie électrique capacitive permettant par décharge d'enflammer facilement un nuage de poussières à température et pression ambiante (Kahlili, 2012). Cette donnée permet donc de quantifier la facilité de la poudre à s'enflammer au contact d'une étincelle.

L'EMI est généralement déterminée à l'aide d'un prototype normalisé tel que le tube de Hartmann modifié représenté sur la Figure 3. Ce prototype est un tube de Pyrex d'un volume de 1,2L. A sa base une buse d'injection est présente. Avant un essai, la poudre est déposée au niveau de la buse d'injection. Pour améliorer la qualité de la suspension, un disperseur en forme de champignon est placé au niveau de la buse. Un réservoir d'air comprimé, de volume 50 cm<sup>3</sup> et à une pression de 7 bars, va alors se décharger au niveau de la buse afin de mettre en suspension la poudre. L'ignition du mélange est réalisée par un arc électrique formé entre deux électrodes, dont les caractéristiques sont détaillées dans la norme. Le délai d'inflammation, c'est-à-dire le délai entre la fin de l'injection de poudre et l'ignition du mélange, est déterminé par l'utilisateur afin d'initier la combustion en fonction de l'état initial du mélange étudié. L'énergie présente dans l'arc est modifiable: entre 1mJ et 1J. Un couvercle pouvant pivoter est situé en haut du prototype. Ce dernier permet d'évacuer la surpression engendrée par l'explosion. Un mélange est considéré comme s'étant enflammé, lorsqu'une flamme est observée ou lorsque le couvercle s'est ouvert. Pour déterminer l'EMI, plusieurs tests doivent être réalisés en faisant notamment varier la masse, le délai d'inflammation, et l'énergie de l'arc électrique.



Figure 3: Schéma du tube de Hartmann modifié (Kahlili, 2012)

#### LA CONCENTRATION MINIMALE D'EXPLOSION (CME)

La CME représente la plus faible concentration de poussières dans l'air entraînant la propagation de la flamme dans le nuage suite à son allumage. Cette donnée est elle-aussi importante dans un contexte industriel car elle va déterminer à partir de quelle quantité de poussières présente dans l'air le risque d'explosion est présent.

La CME est généralement étudiée soit à partir d'un tube de Hartmann, soit à partir d'une sphère d'explosion elle-aussi normalisée de 20L ou de 1m<sup>3</sup>. La sphère de 1m<sup>3</sup> a été élaborée en 1966. Par la suite une autre sphère a été développée : la sphère de 20L. La seconde étant plus petite, elle nécessite une quantité de poudre par essai plus faible et est moins onéreuse. Le schéma d'une sphère d'explosion est représenté sur la Figure 4.

Dans le cadre d'un essai au sein de la sphère de 20L, un vide initial est créé dans la sphère (400 mbar) afin qu'après la mise en suspension des poussières la pression à l'intérieur corresponde à la pression atmosphérique. La poussière est déposée dans un réservoir de 0.6L pouvant être pressurisé à 20 bars. La décharge de ce réservoir au travers d'un disperseur situé à

la base de la sphère va permettre la mise en suspension la poudre. L'allumage peut être réalisé par décharge électrique entre des électrodes ou par des inflammateurs pyrotechniques. L'allumage est réalisé avec un délai de 60 ms après la fin de l'injection de la poussière.



Figure 4: Schéma de la sphère d'explosion (Kahlili, 2012)

#### LA TEMPERATURE MINIMALE D'INFLAMMATION (TMI)

La TMI représente la température minimale à laquelle le nuage s'enflamme au contact d'une surface chaude ayant cette température. Dans l'industrie, cette valeur est importante car elle donne par exemple la température maximale admissible pour la surface d'un moteur. La mesure de cette valeur s'effectue à l'aide de four comme par exemple le four Godbert-Greenwald, essai normalisé par la norme CEI 1241-2-1. Ces fours sont utilisés pour définir la TMI en nuage c'est-à-dire la TMI lorsque la poudre est en suspension. Il est aussi possible de définir une TMI en couche correspondant à la température d'une plaque chauffante permettant l'inflammation de la poudre placée en couche sur cette dernière.

Le four Godbert-Greenwald est composé d'un tube vertical en silice (Figure 5). La poudre est initialement placée dans une nacelle dans la partie supérieure du four, les parois de ce dernier étant chauffées électriquement. La décharge d'un réservoir d'air comprimé va alors permettre la mise en suspension de la poussière dans le tube, l'inflammation de la poudre d'un test est alors observée visuellement. La présence de particules incandescentes n'est pas considérée comme étant représentative d'une inflammation.



Figure 5: Schéma du four de Godbert-Greenwald (Kahlili, 2012)

Le bureau des mines des Etats-Unis a proposé un indice de sensibilité à l'inflammation en prenant comme référence le charbon de Pittsburgh :

$$I_{sens} = \frac{(EMI \ x \ TMI \ x \ CME)_{Charbon \ de \ Pittsburgh}}{(EMI \ x \ TMI \ x \ CME)_{Poussière \ étudiée}}$$
(A1-1)

Cet indice permettant de comparer les différentes poudres en termes de sensibilité à l'inflammation.

#### I.2.1.2) ETUDE DE LA SEVERITE

L'étude de la sévérité de l'explosion s'intéresse aux conséquences lorsque l'explosion a lieu. Ainsi, dans un contexte industriel, la connaissance de la sévérité à l'explosion d'une poudre permet de mettre en place des mesures protection et d'évaluer les conséquences potentielles. Une première donnée importante est la surpression maximale engendrée par une telle explosion ( $P_{max}$ ). Ce paramètre doit permettre à l'exploitant de dimensionner son installation industrielle. En effet, cela donne une information sur la pression maximale susceptible d'être appliquée aux parois de l'enceinte. Cependant, dans certains cas, il est très difficile, au vu des niveaux de surpression en jeu, de construire une enceinte pouvant résister à une telle charge. C'est pourquoi une stratégie répandue pour limiter la surpression appliquée aux parois est de mettre en place des évents ou des disques de rupture. Cependant, le dimensionnement de tels dispositifs nécessite une deuxième donnée essentielle : la vitesse de montée en pression ( $(dP/dt)_{max}$ ). En effet, il faut que l'évent, ou le disque de rupture, permette d'évacuer suffisamment rapidement la pression au vu de la vitesse de montée en pression.

La sphère, de 20L ou de 1m<sup>3</sup>, est généralement utilisée pour mesurer la pression maximale et la vitesse de montée en pression maximale. Pour déterminer ces valeurs plusieurs tests sont réalisés à des concentrations différentes. La mesure de l'évolution de la pression au sein de l'enceinte permet de connaître le maximum de pression et la vitesse de montée en pression maximale correspondant à cette concentration. La Figure 6 présente les résultats obtenus avec de la niacine.



Figure 6: Exemple de détermination de la surpression maximale et de la vitesse maximale de montée en pression(Kahlili, 2012)

La vitesse de montée en pression maximale dépend, entre autres, du volume de l'enceinte utilisée. C'est pourquoi la donnée de vitesse de montée en pression est généralement remplacée par une donnée appelée indice d'explosivité (*Kst*), relié à la vitesse de montée en pression et au volume de la chambre par la loi dite « loi cubique » :

$$Kst = \left(\frac{dP}{dt}\right)_{max} V^{1/3} \tag{A1-2}$$

Cet indice permet de classer les poudres selon leur violence lors d'une explosion en 4 classes (St0, St1, St2 et St3).

De même que pour la sensibilité, il existe un indice de sévérité prenant comme référence le charbon de Pittsburgh:

$$I_{s\acute{v}v} = \frac{(P_{max} x (dP/dt)_{max})_{Charbon \ de \ Pittsburgh}}{(P_{max} x (dP/dt)_{max})_{Poussière \ \acute{e}tudi\acute{e}}}$$
(A1-3)

A partir des indices de sévérité et de sensibilité, un indice d'explosivité a été défini par le Bureau des Mines:

$$I_{exp} = I_{sens} x I_{sév} \tag{A1-4}$$

Il faut noter que ces différents indices (sévérité et sensibilité) sont remis en question et peu utilisés de nos jours car les données relatives aux conditions expérimentales ayant permis de définir la référence (le charbon de Pittsburgh) sont incomplètes.

#### I.2.2) LES FACTEURS INFLUENTS

Le phénomène d'explosion est dépendant de paramètres pouvant dépendre de la poudre (granulométrie, concentration) ou bien du milieu environnant (turbulence, température, pression, humidité) (Sabard, 2013). Il est donc important de quantifier ces influences afin d'adapter les mesures de protection et de prévention aux situations présentes au sein de l'industrie. Dans cette partie, seule l'importance de la taille des particules et de la concentration sont présentées. Par la suite un focus est réalisé sur l'importance de la turbulence.

#### I.2.2.1) TAILLE DES PARTICULES

Un premier facteur influençant la violence d'une explosion est la taille des particules. Globalement, une diminution de la granulométrie de la poudre va entrainer une augmentation de la sensibilité et de la sévérité (Traore, 2007). Comme nous l'avons déjà remarqué dans la partie I.1.2), un changement de granulométrie peut aussi entraîner un changement de mécanisme de réaction. La Figure 7 montre l'évolution de la pression et de la vitesse de montée en pression pour des explosions de poudre d'aluminium. Les particules étudiées sont micrométriques (de 7 µm à 42 µm). D'après le mécanisme présenté par (Puri, 2008) sur la Figure 2, ces particules régissent donc en phase hétérogène (réaction de surface) puis en phase homogène (réaction en phase gazeuse). On observe bien une augmentation de la sévérité de l'explosion lorsque les particules sont plus petites. Cela s'explique par le fait que des particules plus petites présenteront une surface spécifique plus importante : ces particules plus petites seront donc plus réactives. Une hausse de la vitesse de montée en pression est également observée lors de la diminution de la taille des particules, celle-ci étant directement liée à la réactivité des poudres. Nous observons aussi sur la Figure 7 une augmentation de la pression maximale pour des particules de faible diamètre. Pour les métaux, cela s'explique par le fait que, pour des particules plus grosses, le temps de combustion sera plus important : les pertes radiatives et convectives aux parois de la sphère seront alors plus importantes (Traoré, 2007). Pour les composés organiques, cela s'explique lors de la phase de pyrolyse. Pour des particules plus grosses, la fraction de composé non volatilisée lors de la phase de préchauffage sera plus importante. Ainsi, la quantité de composé réagissant en phase homogène sera plus faible. La fraction de composé encore solide ne réagira pas, et absorbera une partie de l'énergie libérée par la réaction. Ainsi, la pression maximale sera plus faible pour les particules de granulométrie plus grande. Cependant, des essais réalisés avec des particules nanométriques montrent que des poudres trop fines vont s'agglomérer modifiant ainsi la surface spécifique disponible : la baisse de la taille des particules au-delà d'un certain seuil n'entrainera donc plus une augmentation de la sévérité de l'explosion.





Figure 7: Pression maximale et vitesse de montée en pression maximale en fonction de la granulométrie(Traoré, 2007)

#### I.2.2.2) LA CONCENTRATION

La concentration en particules est aussi un facteur important comme le montre la Figure 8. Pour une concentration en particules inférieure à la stœchiométrie, l'oxygène de l'air est en excès : la surface réactive de la poudre est donc le facteur limitant. Une augmentation de la concentration en particules entrainera une surface réactive plus importante. Ainsi, la pression maximale et la vitesse de montée en pression augmenteront avec la concentration en particules. Le maximum sera alors atteint pour des concentrations en poussières correspondant à la stœchiométrie. Cependant, le rendement de la réaction étant faible, ce maximum sera atteint pour une stœchiométrie « réelle » supérieure à la stœchiométrie « théorique ». Enfin, pour des concentrations en poussières plus élevées que la stœchiométrie, l'oxygène devient le facteur limitant. Ainsi, la pression maximale et la vitesse de montée en pression diminueront lorsque l'on augmentera la concentration en poussières au-delà d'un certain seuil.

L'EMI évoluera d'une manière opposée (Sabard, 2013). On distingue deux cas :

- Pour des concentrations en poussières inférieures à la stœchiométrie, cette dernière diminue lorsque la concentration en poussières augmente.
- Pour des concentrations en poussières supérieures à la stœchiométrie, l'EMI va augmenter avec la concentration en particules.

Les caractéristiques de la poudre (granulométrie, concentration) influent sur la violence de l'explosion. Cependant, le milieu environnant (pression, température...) influe aussi sur cette phénoménologie. Dans la partie suivante, l'influence de la turbulence sur ce type d'explosion sera présentée.



Figure 8: Evolution de la pression maximale et de la vitesse de montée en pression maximale en fonction de la concentration en aluminium(Traoré, 2007)

#### I.2.3) L'IMPORTANCE DE LA TURBULENCE

Dans un contexte industriel, la poussière doit être mise en suspension pour être susceptible de provoquer une explosion. Cette mise en suspension de la poussière entraîne nécessairement un niveau défini de turbulence au moment de l'explosion. C'est pourquoi il est important d'étudier l'influence de la turbulence sur les caractéristiques d'explosivité de la poudre, notamment afin de ne pas sous-estimer les conséquences potentielles d'une telle explosion. Dans une première partie, quelques notions générales sur la turbulence seront présentées. L'influence de ce niveau de turbulence sur les caractéristiques des explosions de poussières, sensibilité et sévérité, sera ensuite détaillée.

#### I.2.3.1) GENERALITES SUR LA TURBULENCE

Cette partie consistera en de rapides rappels sur la turbulence. Un écoulement turbulent est complexe à étudier, car il présente des tourbillons d'échelles de temps et de tailles très différentes. Un écoulement turbulent semble a priori très désordonné et imprévisible. Cependant il est possible d'isoler une vitesse moyenne ( $\overline{U}$ ) et une composante fluctuante (u) de la vitesse (U) selon la décomposition de Reynolds:

$$U(x, y, z, t) = \overline{U(x, y, z, t)} + u(x, y, z, t)$$
(A1-5)

Avec  $\overline{u(x, y, z, t)} = 0$ 

Les fluctuations permettent alors de définir l'intensité turbulente (IT), selon la formule suivante :

$$IT(x, y, z, t) = \sqrt{\overline{u^2(x, y, z, t)}}$$
(A1-6)

#### CASCADE DE KOLMOGOROV

Une théorie à la base de l'étude de la turbulence est la cascade d'énergie de Richardson, formalisée par les lois de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941). Cette théorie explique l'échange d'énergie cinétique de proche en proche entre les tourbillons au sein de l'écoulement (Figure 9). Cette théorie s'appuie sur les trois hypothèses suivantes :

- l'énergie est essentiellement portée par les grosses structures qui ne sont pas directement influencées par la viscosité du fluide,

- les tourbillons d'une échelle donnée sont issus de l'instabilité des plus gros tourbillons. Les gros tourbillons transmettent ainsi leur énergie aux plus petits,

- la dissipation est essentiellement due à la destruction des petites structures par frottement visqueux.



Figure 9: Illustration de la Cascade de Kolmogorov (Galmiche, 2014)

La figure précédente représente le spectre d'énergie de l'écoulement, c'est-à-dire la distribution de l'énergie au sein des tourbillons de différentes tailles. La taille des tourbillons est définie par son nombre d'onde  $\kappa$  ( $\kappa = \frac{2\pi}{l}$  avec l: taille caractéristique du tourbillon). Ainsi, une valeur importante de  $\kappa$  représente un tourbillon de faible taille. La figure précédente permet de distinguer trois zones. La première correspondant aux gros tourbillons correspond à la production d'énergie par les gradients de vitesse présents dans l'écoulement. La zone intermédiaire correspond à l'échange d'énergie des gros tourbillons vers ceux de tailles plus petites. Cette partie est caractérisée par une loi de la forme :  $E(\kappa) = \kappa^{-5/3}$  (pente caractéristique). Enfin, la troisième zone correspond à la dissipation de l'énergie, par les plus petits tourbillons présents dans l'écoulement, par frottements visqueux.

#### **GRANDEURS CARACTERISTIQUES**

Différentes échelles, spatiales et temporelles, ont été créées afin de définir la turbulence de l'écoulement. Le but de ces différentes échelles est de définir les tailles caractéristiques des tourbillons présents dans l'écoulement.

L'échelle intégrale correspond à la taille des plus gros tourbillons présents dans l'écoulement, ceux porteurs de l'énergie cinétique. L'échelle intégrale temporelle peut être déterminée expérimentalement en étudiant le coefficient d'autocorrélation temporelle :

$$R_{u}(0,0,0,\tau) = \frac{\overline{u(x,y,z,t).u(x,y,z,t+\tau)}}{\sqrt{\overline{u^{2}(x,y,z,t)}}.\sqrt{\overline{u^{2}(x,y,z,t+\tau)}}}$$
(A1-7)

L'étude de l'évolution de ce coefficient permet en effet de déterminer l'autocorrélation temporelle. Pour cela il suffit de calculer l'aire sous la courbe jusqu'à son premier passage à 0 (Figure 10).



Figure 10: Explication du calcul de l'échelle intégrale(Galmiche, 2014)

Pour calculer l'échelle intégrale spatiale, il faut une mesure de la turbulence en deux points au même instant (décalage temporel nul). Il faut alors étudier le coefficient de corrélation spatiale :

$$R_{u}(\xi_{x},\xi_{y},\xi_{z},0) = \frac{\langle u(x,y,z,t).u(x+\xi_{x},y+\xi_{y},z+\xi_{z},t)\rangle}{\sqrt{\langle u^{2}(x,y,z,t)\rangle} \sqrt{\langle u^{2}(x+\xi_{x},y+\xi_{y},z+\xi_{z},t)\rangle}}$$
(A1-8)

Plusieurs échelles peuvent alors être définies selon la composante étudiée et la direction du décalage :

$$L_{U_{x}} = \int_{0}^{\infty} R_{u}(\xi_{x}, 0, 0, 0) d\xi_{x}$$

$$L_{U_{y}} = \int_{0}^{\infty} R_{u}(0, \xi_{y}, 0, 0) d\xi_{y}$$

$$L_{V_{x}} = \int_{0}^{\infty} R_{v}(\xi_{x}, 0, 0, 0) d\xi_{x}$$

$$L_{v_{y}} = \int_{0}^{\infty} R_{v}(0, \xi_{y}, 0, 0) d\xi_{y}$$
(A1-9)

Les échelles  $L_{ux}$  et  $L_{uy}$  sont associées à la vitesse u et représentent respectivement les échelles longitudinales et transversales. Les échelles  $L_{vy}$  et  $L_{vx}$  sont associées à la vitesse v et représentent respectivement les échelles longitudinales et transversales.

Une deuxième échelle pouvant être définie est la micro-échelle de Taylor ( $\lambda$ ). Ce paramètre représente la taille des tourbillons pour laquelle la dissipation visqueuse devient prédominante (troisième partie de la cascade de Kolmogorov). La détermination expérimentale de cette échelle est difficile. C'est pourquoi cette échelle est généralement définie à partir des autres caractéristiques de la turbulence :

$$\lambda \sim \sqrt{15 \frac{L_v}{u'}}$$
(A1-10)  
$$\frac{\lambda}{L} \sim \sqrt{\frac{15}{Re_L}}$$
(A1-11)

Une dernière échelle définie dans la littérature est l'échelle de Kolmogorov ( $\eta$ ). Cette échelle représente la plus petite taille de tourbillons présents dans l'écoulement qui dissipent l'énergie par frottements visqueux. Cette échelle peut aussi être approximée à partir des autres données de la turbulence :

$$\frac{\eta}{L} \sim (Re_L)^{-3/4}$$
 (A1-12)

#### I.2.3.2)INFLUENCE DE LA TURBULENCE SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'EXPLOSIVITE

Comme cela a été précisé, la mise en suspension préalable de la poussière, nécessaire lors des essais d'explosion, entraine inévitablement un état de turbulence initiale présent lors de l'explosion. On distingue généralement deux types de turbulence : la turbulence initiale du mélange et la turbulence induite par l'expansion des gaz de combustion. L'influence de la turbulence initiale du mélange sur la sévérité de l'explosion peut être observée sur la Figure 11 : les résultats étant obtenus avec de la poudre de lycopodium. Ici, le délai entre la dispersion de la poudre et l'ignition (axe des abscisses) est relié à la turbulence initiale du mélange. Plus ce délai sera long et plus le niveau de turbulence sera faible.



Figure 11: Evolution de la pression maximale et de la vitesse de montée en pression maximale en fonction du délai d'inflammation (Eckhoff, 2003)

On observe que plus la turbulence est forte (correspondant à un faible délai entre la fin de la dispersion et l'ignition), plus la surpression et la vitesse de montée en pression le sont également. La turbulence améliore la combustion en favorisant le mélange entre la zone chaude et la zone froide lors de l'expansion de la flamme. Ainsi, la turbulence augmente la vitesse de la flamme donc la vitesse de montée en pression.

Une augmentation de la surpression maximale est observée lorsque le niveau de turbulence est augmenté. A priori, une augmentation de la turbulence ne devrait pas entraîner une augmentation de la surpression maximale. Cependant, la turbulence, entraînant une augmentation de la vitesse de combustion, entraîne une diminution de la durée de combustion. Ainsi, les pertes thermiques aux parois sont diminuées avec la turbulence. La surpression maximale est donc plus importante.

La turbulence a un effet inverse sur la sensibilité à l'inflammation du mélange, cette dernière va dissiper la chaleur de la zone d'ignition et l'EMI va augmenter avec l'intensité de la turbulence (Sabard, 2013).

L'influence de la turbulence sur la propagation de la flamme sera détaillée dans la partie II.1.2).

### II) ETAT DE L'ART SUR L'ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME LORS D'UNE EXPLOSION DE POUSSIERES

Dans cette partie, des études portant sur la propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières sont présentées. Les prototypes, les techniques utilisées ainsi que les résultats sont détaillés. Dans un premier temps, quelques généralités sur l'étude de la propagation du front de flamme sont exposées. Par la suite, nous nous consacrerons aux études portant sur la caractérisation de la suspension au moment de l'ignition : en termes d'homogénéité de la concentration, mais aussi en termes de niveau de turbulence. En effet, comme nous l'avons remarqué dans la partie précédente, la concentration mais aussi la turbulence du mélange influent grandement sur la violence de l'explosion. Par la suite, des études portant sur la visualisation de la propagation de la flamme, notamment avec différentes méthodes optiques, sont exposées. La troisième partie traite d'études réalisées dans des conditions particulières : des prototypes permettant de limiter l'influence des parois, ainsi que des prototypes permettant d'étudier l'influence de la mise en place d'obstacles sur la propagation de la flamme.

En Annexe, un récapitulatif des différentes études, prototypes et méthodes de mesure, est proposé afin de faciliter la lecture et la compréhension des différentes techniques employées.

#### II.1) GENERALITES SUR L'ETUDE DE LA PROPAGATION D'UNE FLAMME

Dans cette partie, quelques généralités sur les études de la propagation de la flamme sont dressées. En effet, la vitesse de la flamme est directement liée à la surpression aérienne de l'explosion (effet redouté). Tout d'abord, les différents types de prototypes permettant l'étude de la flamme sont présentés. Par la suite, le rôle de la turbulence sur la propagation de la flamme est abordé : cette sous-partie traite notamment de flammes de prémélanges gazeux, mais semble a priori adaptée au cas de flammes de poussières.

#### II.1.1) LES PROTOTYPES GENERALEMENT UTILISES

Des études permettent de décrire la propagation de la flamme dans le nuage, notamment en déterminant la vitesse de combustion (vitesse de consommation des réactifs par le front de flamme). Pour quantifier cette vitesse, trois principales techniques ont été mises au point, correspondant à trois types de prototypes et techniques de mesures différents.

La première technique utilise une flamme stationnaire à l'aide d'un prototype de type brûleur. La méthode dite du brûleur a été largement utilisée pour l'étude des explosions de gaz. En effet, cette méthode consiste en la stabilisation d'une flamme stationnaire en sortie du brûleur. L'étude de la flamme obtenue permet d'obtenir une donnée fondamentale sur la flamme : sa vitesse de combustion. Cependant, cette méthode est plus délicate à mettre en place dans le cas d'explosions de poussières. En effet, il devient difficile d'obtenir une flamme stabilisée : il faut pour cela avoir le bon débit de poussières et de comburant. Quelques exemples de tels brûleurs existent tout de même dans la littérature (Mason and Wilson, 1967)



Figure 12: Schéma d'un brûleur utilisé pour l'étude des explosions de poussières (Mason and Wilson, 1967)

L'étude de ces explosions peut aussi utiliser des enceintes fermées : généralement cylindriques ou sphériques. Ces enceintes étant fermées, la montée en pression au sein de ces dernières est importante : ainsi, ces prototypes sont généralement en acier avec seulement de petites fenêtres de visualisation. Ainsi, la mesure principale est l'évolution de la pression au cours du temps lors de ce type d'essai. Contrairement au cas précédent de flamme stationnaire, ici la flamme est une flamme de propagation sphérique. L'enceinte doit toutefois être suffisamment grande afin de minimiser les effets des parois (conditions adiabatiques). Un exemple d'enceinte normalisée pouvant être utilisée pour une telle étude est la sphère, de 20L ou de 1  $m^3$ , utilisée lors de l'étude de l'explosivité de la poudre, et présentée dans la partie I.2.1.1. Ces données permettent tout d'abord d'étudier la sévérité de l'explosion : pression maximale et vitesse de montée en pression maximale. Les enceintes fermées sphériques, au travers de la mesure de l'évolution de la pression, permettent d'obtenir la vitesse fondamentale de la flamme  $S_u$ . Pour ce faire, une équation de la forme suivante est généralement utilisée (Dahoe and de Goey, 2003):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{3(P_{max} - P_0)}{R_{vessel}} \left[ 1 - (\frac{P_0}{P})^{1/\gamma} \frac{P_{max} - P}{P_{max} - P_0} \right]^{2/3} (\frac{P}{P_0})^{1/\gamma} S_u$$
(A2-1)

Enfin, l'étude peut aussi être réalisée en utilisant des enceintes, généralement cylindriques, ouvertes à l'une, voire aux deux, extrémités. Au sein d'un tel prototype, l'augmentation de pression est ainsi plus faible : les parois peuvent donc être transparentes permettant ainsi d'avoir des accès optiques pour visualiser la propagation de la flamme. Lors de ces essais, l'intérêt majeur est l'étude la propagation de la flamme le long du tube. De tels prototypes permettent ainsi l'étude de la vitesse de propagation de la flamme, de la distance de coincement (distance minimale entre deux plans permettant la propagation de la flamme), de l'allure du front de flamme, ou encore du mouvement des particules en amont de la flamme. Un exemple d'un tel prototype est présenté sur la Figure 13. La détermination de la vitesse de combustion à partir de la visualisation de la propagation du front de flamme dans une enceinte de ce type sera expliquée dans la partie C.



Figure 13: Schéma de principe d'un tube ouvert (D'Amico, 2016)

#### II.1.2) ROLE DE LA TURBULENCE SUR LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMMES

Comme nous l'avons déjà remarqué dans la partie I.2.3, la mise en suspension préalable à l'étude de la propagation de la flamme entraîne un niveau de turbulence initial non nul. Or cette turbulence va directement influer sur la propagation de la flamme. Dans cette partie, quelques généralités sur les flammes, laminaires et turbulentes, ainsi que l'influence de la turbulence sur cette propagation sont présentées dans le cadre général de flammes de prémélange gazeux.

#### II.1.2.1) FLAMMES LAMINAIRES ET TURBULENTES

Dans le cas d'une flamme de prémélange gazeux, le combustible et le comburant (l'oxygène de l'air) sont initialement mélangés. Lorsque la réaction se déplace dans le milieu initialement au repos, on parle de flamme de prémélange laminaire. La flamme est une zone délimitant les gaz brûlés des gaz frais, se déplaçant en direction des gaz frais. La Figure 14 représente la structure d'une flamme laminaire. Le front de flamme, la zone séparant les gaz frais (n'ayant pas réagi) des gaz brûlés (qui ont réagi), peut être séparée en deux : la zone de préchauffage et la zone de réaction. Les gaz frais sont chauffés dans la zone de préchauffage sans que la réaction exothermique n'ait encore lieu : le dégagement de chaleur est négligeable dans cette zone. La zone de réaction est la zone où la combustion a lieu entrainant un fort dégagement de chaleur (réaction exothermique). Deux données sont intrinsèques à un mélange en écoulement laminaire: la vitesse de combustion laminaire non-étirée ( $S_u^0$ ) et l'épaisseur de flamme laminaire peut se décomposer en deux épaisseurs, correspondant aux deux zones caractéristiques de la flamme : l'épaisseur de la zone de préchauffage et l'épaisseur de la zone de réaction.



Figure 14: Structure d'une flamme laminaire(Galmiche, 2014)

Comme nous l'avons déjà remarqué, un niveau de turbulence initial est toujours présent lors d'une explosion de poussières : c'est pour cela que les flammes ne se propageront pas dans un milieu au repos mais dans un milieu turbulent. Cette turbulence influence la propagation du front de flammes : en effet cette turbulence va agir sur la flamme notamment en la déformant par les tourbillons présents dans l'écoulement (Figure 15). Ainsi, un front de flamme turbulent est plus difficile à décrire.



FIGURE 15: SCHEMA EXPLICATIF DES FLAMMES TURBULENTES (GALMICHE, 2014)

La vitesse de propagation, notée  $V_p$  dans notre étude, représente la vitesse de propagation de la flamme dans le référentiel fixe du laboratoire. Cette dernière dépend alors de nombreux paramètres, notamment des caractéristiques géométriques de l'enceinte utilisée pour l'étude de la propagation. Ainsi, cette donnée est difficilement exploitable et comparable entre des essais réalisés dans des configurations différentes. Dans le cas des explosions de gaz, une vitesse généralement étudiée, car étant une donnée intrinsèque d'un mélange, est la vitesse de combustion laminaire non étirée, notée  $S_u^0$  dans cette étude. Cette vitesse correspond alors à la vitesse de consommation des gaz frais par le front de flamme. Une méthode permettant la détermination de la vitesse de combustion laminaire non étirée à partir de la vitesse de propagation est la méthode dite du tube ouvert (Di Benedetto et al., 2013). Cette méthode sera détaillée dans la partie C. Dans le cas des explosions de gaz, cette donnée est généralement obtenue à partir d'un brûleur. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, la mise en place d'un brûleur pour l'étude d'une flamme de poussières est plus délicate. C'est notamment la raison pour laquelle la méthode du tube ouvert est généralement préférée dans le cas des explosions de poussières. Comme nous le verrons par la suite cette donnée est utilisée afin de faire le lien entre les caractéristiques de la turbulence du milieu et la vitesse de combustion turbulente de la flamme.

# II.1.2.2)L'INFLUENCE DE LA TURBULENCE SUR LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMMES

Comme nous l'avons vu, la turbulence influe sur la propagation du front de flammes. C'est pourquoi deux vitesses sont généralement définies : la vitesse de combustion laminaire non-étirée ( $S_u^0$ ), qui est une donnée intrinsèque d'un mélange gazeux, et la vitesse turbulente, notée ici  $S_T$  et qui dépend des caractéristiques de la turbulence du mélange. Une première relation (Galmiche, 2014) a été établie afin de comparer les vitesses de combustion turbulente ( $S_T$ ) et laminaire ( $S_u^o$ ) :

$$\frac{S_T}{S_u^o} = \frac{A_T}{A_L} \tag{A2-2}$$

Où  $A_T$  et  $A_L$  sont respectivement les surfaces de front de flamme turbulente et laminaire. Cette relation permet de prendre en compte l'augmentation de la surface de la flamme avec la turbulence. Une autre relation simple permet de relier ces deux vitesses aux caractéristiques du milieu :

$$\frac{S_T}{S_u^{\ o}} = 1 + A \left(\frac{u'}{S_u^{\ o}}\right)^B \tag{A2-3}$$

Où A et B sont des constantes empiriques et u' la vitesse RMS de la turbulence.

Généralement, une augmentation de la turbulence entraine une augmentation de la vitesse de combustion. Cependant, à partir d'un certain niveau de turbulence, une diminution de la vitesse de combustion peut être observée : ce phénomène est connu sous le nom d'effet bending. Cet effet pourrait être expliqué par deux phénomènes. Un étirement trop important entrainerait des extinctions locales de la flamme, principalement dans les zones concaves. De plus, la fusion de plissements de flammes pourrait conduire à une diminution de l'accroissement de la surface.

Le front de flamme lui-même aura aussi une influence sur la turbulence du milieu de propagation : le front de flamme va modifier la turbulence au sein des gaz brûlés. Tout d'abord, le dégagement de chaleur va augmenter la viscosité dynamique entrainant alors une diminution locale du nombre de Reynolds: c'est-à-dire une relaminarisation de l'écoulement au sein des gaz brûlés (Galmiche, 2014). De plus, les fluctuations de masse volumique au sein des gaz brûlés vont pouvoir détruire ou produire de la turbulence.

Une question toujours en suspens est : y a-t-il génération d'une turbulence additionnelle devant le front de flamme? Dans le cas des flammes stationnaires (brûleurs), aucune augmentation significative des fluctuations de vitesse n'a été observée. Cependant, pour les flammes en expansion, aucune observation n'a été réalisée pour conclure sur ce phénomène.
Cela s'explique par la difficile mesure de la turbulence devant le front de flamme en mouvement. Ainsi, pour l'étude de l'influence de la turbulence sur les explosions, les caractéristiques de la turbulence sont uniquement déterminées dans le milieu sans combustion par l'intermédiaire d'expériences menées au préalable, portant seulement sur la caractérisation aéraulique du milieu initial.

#### II.2) ETUDE DE L'ETAT INITIAL DE LA SUSPENSION

Comme nous l'avons vu précédemment, l'état initial de la suspension (concentration et turbulence) a une influence sur la propagation de la flamme. L'étude de l'homogénéité de la suspension est ainsi importante à investiguer. De même le niveau de turbulence au moment de l'ignition est une donnée importante afin de comparer des essais entre eux. L'étude de la turbulence se fait généralement au préalable lors d'essais réalisés sans inflammation. L'étude porte généralement sur la détermination de la loi de décroissance de l'intensité de la turbulence avec le délai d'inflammation (délai entre la fin de l'injection de poudre et l'allumage de la source d'ignition).

#### II.2.1) ETUDE LA CONCENTRATION

La concentration est généralement calculée en divisant la masse injectée par le volume de l'enceinte. Cependant, il est tout de même important de s'assurer de l'homogénéité de concentration au sein de la suspension formée : des gradients de concentrations présents au sein du nuage pourraient a priori accélérer ou ralentir la propagation de la flamme. De plus, pour des comparaisons avec des modèles numériques, il est important de connaître la concentration locale en poussière au moment de l'ignition. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées afin d'avoir une donnée sur le degré d'homogénéité de la suspension au moment de l'ignition : la pesée de la masse sédimentée en plusieurs lieux, l'extinction d'un faisceau laser par la suspension, ou encore la diffusion d'une nappe laser par le nuage.

#### II.2.1.1)PAR PESEE

Une première méthode utilisée pour quantifier l'homogénéité de la suspension formée est par pesée. La poudre est injectée et, après un certain délai, des plaques sont insérées à différentes hauteurs dans le prototype. La poudre ayant alors sédimentée sur chaque plaque est finalement pesée. Ainsi, une idée du degré d'homogénéité de la concentration entre chaque partie du prototype, séparée entre elles par les plaques, est obtenue.

Dans leur étude portant sur la propagation de la flamme dans un nuage de poussières de fécule de maïs, Wang et al. ont évalué à l'aide de cette méthode le degré d'homogénéité de la suspension obtenue (Wang et al., 2006). Leur étude a été réalisée dans un prototype vertical d'une hauteur de 780 mm, et de base carrée de section 160x160 mm. La Figure 16 représente un schéma du tube utilisé pour ces travaux. Nous observons aussi sur cette figure la présence d'un laser et d'une caméra, l'étude des résultats obtenus avec ces moyens métrologiques fera l'objet d'une prochaine partie : partie II.1.2.1 portant sur l'étude de la turbulence par PIV. Le système de génération de la suspension utilise le principe dit du lit fluidisé : la poudre est initialement placée sur la plaque poreuse (représentée à la base du tube de combustion), et le haut du prototype est ouvert. Un écoulement d'air, provenant d'un réservoir sous pression, va alors permettre la mise en suspension des particules, avec un débit réglable. Lorsque le tube est entièrement rempli avec de la poudre, l'injection d'air est stoppée par fermeture de l'électrovanne, le haut du prototype est fermé, et le lit fluidisé est déplacé afin que la flamme puisse se propager dans une enceinte dont la base est ouverte, et dont l'extrémité supérieure est donc fermée. Pour les essais préliminaires visant à caractériser la suspension formée par ce

système, le mélange n'est pas enflammé. Ainsi, pour mesurer l'homogénéité en termes de concentration du nuage, après un certain délai réglable, des plaques sont insérées à différentes hauteurs dans le prototype. Comme expliqué précédemment, la poudre présente entre chaque plaque va alors sédimenter, et sera ensuite pesée. La position de chacune de ces plaques est représentée sur la Figure 16. Les résultats obtenus par ces auteurs (cf. Figure 17) montrent une baisse de la concentration en fonction du temps, comme attendu, mais aussi en fonction de la hauteur : la concentration sur la plaque la plus basse étant environ trois fois plus importante que la concentration sur la plaque la plus haute. Ainsi, le système de mise en suspension ne semble pas permettre une bonne homogénéité de concentration sur toute la hauteur du prototype.



Figure 16: Schéma explicatif du prototype utilisé par (Wang et al., 2006)



Figure 17: Résultats de concentration obtenus par(Wang et al., 2006)

Han et al. ont utilisé un prototype assez proche pour étudier la propagation de flammes de lycopodium (Han et al., 2000). En effet, les auteurs utilisent de même un prototype vertical à base carrée mais de dimensions différentes : 1800mm x150mm x 150mm. Le système de mise en suspension est semblable au système de lit fluidisé présenté précédemment. La même méthode a été utilisée pour la mesure de l'évolution de la concentration selon la hauteur. Une

différence maximale de l'ordre de 10% a été obtenue entre les différentes hauteurs étudiées. La vitesse de propagation de la flamme obtenue est constante sur toute la hauteur du prototype : l'étude de la propagation sera détaillée dans la partie II.2.3. Ainsi, les auteurs en ont conclu qu'une variation de l'ordre de 10% de la concentration sur la hauteur du prototype n'affecte pas la propagation du front de flamme : la suspension semble donc pouvoir être qualifiée d'homogène jusqu'à une variation de 10% sur la hauteur du prototype.

#### **II.2.1.2)PAR EXTINCTION LUMINEUSE**

La méthode précédente donne des informations sur le degré d'homogénéité de la suspension. Cependant, une limitation importante vient du fait que l'évolution temporelle du degré d'homogénéité est difficilement quantifiable. En effet, la mesure est réalisée sur le degré d'homogénéité de la suspension au moment de l'insertion des plaques. Ainsi, pour avoir l'évolution temporelle de l'homogénéité il faut réaliser différents essais en modifiant le délai entre la fin de l'injection de la poudre et la mise en place des plaques : il apparaît ainsi complexe d'obtenir des données avec une résolution temporelle importante. La technique qui va être présentée dans cette partie permet d'obtenir des informations sur l'évolution temporelle de la concentration, en se basant sur le principe de l'extinction lumineuse.

Kalejaiye et al. ont utilisé une sonde basée sur le principe de l'extinction laser afin d'étudier la dispersion des particules dans la sphère de 20L, présentée dans la partie I.2.2.1), et notamment de comparer la dispersion de la poussière avec deux déflecteurs différents (Kalejaiye et al., 2010). Le fonctionnement de la sonde est le suivant : un faisceau lumineux est émis à travers le nuage, la sonde mesure alors la fraction de lumière qui a été transmise à travers le nuage. Ainsi, cette mesure est directement liée à la concentration en poussières : pour un nuage dense, la transmission étant plus faible. Il faut noter que la sonde ne permet pas la mesure directe de la concentration : elle permet plutôt une mesure de l'homogénéité de la suspension. En effet, pour un nuage homogène, la lumière transmise mesurée par la sonde serait la même en tout point de l'écoulement. Les déviations de valeur de lumière transmise obtenues sont donc liées à l'homogénéité en termes de concentration. A l'aide de cette sonde, Kalejaiye et al. ont pu ainsi comparer les degrés d'homogénéité obtenus avec les deux déflecteurs en comparant les valeurs obtenues en différents points pour chaque configuration. De plus, en observant l'évolution de la transmission en fonction du temps, il est possible de caractériser la durée pendant laquelle le nuage reste homogène. Cette technique de mesure de la concentration par extinction lumineuse permet une mesure locale de la concentration. Il faut cependant noter que cette mesure est intégrée tout le long du faisceau laser. En effet, le laser est atténué sur toute sa longueur de pénétration au sein du nuage. Ainsi, cette mesure est locale, intégrant la concentration selon l'axe du faisceau laser.

La sonde précédemment décrite doit être placée au sein de l'écoulement, modifiant potentiellement ce dernier. Cependant, il est tout de même possible d'utiliser le principe d'extinction laser pour mesurer le degré d'homogénéité sans pour autant mettre en place une sonde au sein de l'écoulement. Vissotski et al. ont mis en place une telle méthode, présentée sur la Figure 18 (Vissotski et al., 2012). Une première photodiode mesure l'intensité du faisceau avant son entrée dans le prototype, alors qu'une seconde mesure l'intensité du faisceau en sortie du prototype, atténuée par la suspension. La comparaison de ces deux valeurs donne donc une indication sur la concentration au sein du nuage. Avec cette méthode, la variation de la concentration au cours du temps peut être observée. Cependant, cette valeur de concentration est intégrée sur toute la profondeur du prototype : en effet, cette technique donne une valeur pour la concentration en poussières présentes sur tout le passage du faisceau laser (donnée intégrée sur tout le passage du faisceau). Le prototype de mise en suspension mis au point par Vissotski et al. est plutôt original. Les particules sont initialement installées dans un injecteur afin d'être injectées dans une première enceinte. Quand le nuage est globalement homogène dans cette enceinte, une vanne s'ouvre permettant alors au mélange poussières-air de remplir l'enceinte au sein de laquelle l'explosion aura lieu. Ainsi, l'injection se fait en deux temps : remplissage de la première enceinte par la poussière puis remplissage de l'enceinte prévue pour l'explosion avec le mélange issu de la première enceinte.



Figure 18: Schéma de principe de l'extinction lumineuse (Vissotski et al., 2012)

Cette technique d'extinction laser a aussi été utilisée dans la thèse de (Sabard, 2013) pour étudier la suspension obtenue dans des sphères fermées de 8 et 56L. Ce dernier a utilisé le même principe d'atténuation d'un faisceau laser à travers la suspension formée. Avec cette technique, il a observé que la suspension gardait une concentration globalement constante pendant une durée importante.

#### II.2.1.3) PAR DIFFUSION DE MIE

La méthode décrite précédemment permet d'avoir des données en un point de l'écoulement, ou du moins une donnée intégrée sur la longueur du faisceau : c'est donc une donnée locale. Or il est intéressant lorsque l'on veut étudier un degré d'homogénéité d'avoir des données en plusieurs points de l'espace. Ceci peut être réalisé en utilisant plusieurs sondes comme celles présentées précédemment. Il existe cependant une autre méthode permettant d'obtenir directement des données sur un plan de l'écoulement : cette technique est basée sur la diffusion de la lumière. Cette technique sera décrite plus en détails dans la partie B. Il est important de noter pour la compréhension de cette partie que la méthode permet d'avoir une carte du degré d'homogénéité en termes de concentration dans un plan de l'écoulement : les zones lumineuses représentant les zones de fortes concentration, et les zones sombres celles de faible concentration (Figure 19). Ainsi, avec cette méthode, nous avons directement accès à des données sur l'homogénéité de la concentration spatiale et temporelle dans un plan de l'écoulement.



Figure 19: Résultats de concentration par diffusion de Mie (Paquet, 2012)

Dans sa thèse, (Bozier, 2004) étudie l'homogénéité de la suspension formée au sein de son prototype à l'aide de cette méthode. Deux enceintes sont utilisées. L'étude de la mise en suspension est réalisée dans une enceinte en plexiglas verticale à base octogonale d'un volume de 20L et d'une hauteur de 500mm. Cette première enceinte est réalisée en plexiglas pour avoir des faces transparentes : ainsi, il est possible d'étudier par des méthodes optiques la suspension formée en termes de concentration mais aussi de turbulence. Une deuxième enceinte résistant à la pression et de forme cylindrique est utilisée pour les essais d'explosion. Cette dernière n'est pas munie de fenêtres de visualisation. La première enceinte est à base octogonale afin d'être au plus proche de la géométrie cylindrique de l'enceinte utilisée pour les explosions, tout en ayant des faces parallèles, facilitant la mise en place des méthodes optiques utilisées. Le système de mise en suspension utilisé dans cette étude, représenté sur la Figure 20, est le suivant : initialement la poudre est insérée dans un tube d'injection relié à un réservoir d'air comprimé séparé par une électrovanne. Lors de son ouverture, la décharge du réservoir entraîne les particules présentes dans le tube d'injection. Le tube d'injection est un tube vertical, de la hauteur du prototype, ayant des trous sur la hauteur permettant à la poudre d'être expulsée dans l'enceinte sur toute la hauteur du prototype. Afin d'améliorer l'homogénéité de la suspension formée, des déflecteurs sont placés devant les tubes de dispersion : ces déflecteurs sont des tubes métalliques permettant de casser la directivité du jet en sortie des trous des tubes d'injection. Avec la technique de mesure de la concentration par diffusion de Mie, l'auteur a ainsi pu observer l'évolution de l'intensité lumineuse, mesurée par la caméra, en différents points de l'écoulement après avoir corrigé cette dernière. L'influence de la pression initiale du réservoir sur l'homogénéité de la concentration et l'évolution temporelle du degré d'homogénéité ont notamment été étudiées au cours de cette étude. Une stabilisation de l'intensité lumineuse est atteinte à partir de 450 ms après le début de l'injection. La pression initiale n'a que peu d'influence sur cette phase de la dispersion.

Dans sa thèse, (Paquet, 2012) a utilisé la même enceinte pour l'étude de la dispersion des particules dans l'enceinte avec différents types d'injecteurs, qui remplaçaient alors les tubes d'injection utilisés par (Bozier, 2004). Un exemple d'image obtenue est représenté sur la Figure 19. Dans cette étude, l'homogénéité en termes de concentration a été analysée qualitativement et comparée à une étude numérique de la dispersion des particules au sein de l'enceinte.



Figure 20: Schéma explicatif du prototype utilisé par (Bozier, 2004)

Ce principe de mise en suspension, à partir de la décharge de réservoirs d'air comprimé à travers des tubes de dispersion, avait déjà été étudié dans ses travaux de thèse par Pu (Pu, 1988). En effet, une première partie de ses travaux à consister en l'étude de l'influence de différents paramètres sur la suspension formée : notamment la taille et l'espacement des trous du tube perforé utilisé. La qualité de la suspension en termes d'homogénéité de concentration a été étudiée par le principe de transmission lumineuse alors que la turbulence est mesurée par anémométrie fil chaud : méthode décrite dans la partie suivante. En plus de cette étude détaillée de la turbulence, l'auteur a aussi étudié la propagation de la flamme, notamment l'influence de la mise en place d'obstacles : voir partie II.4.2).

#### **II.2.2) ETUDE DE LA TURBULENCE**

De même que la concentration de la suspension formée, le niveau de turbulence au moment de l'ignition est une donnée importante afin de comparer des essais entre eux, la turbulence influençant grandement la propagation de la flamme. En effet, un niveau de turbulence élevé est généralement associé à une sévérité d'explosion élevée. C'est pour cela que de nombreuses études, dont certaines sont citées par la suite, portent sur la caractérisation de la turbulence au moment de l'ignition. De plus, la connaissance du niveau de turbulence du mélange est aussi nécessaire pour des comparaisons à des études numériques. L'étude expérimentale de la turbulence se fait généralement au préalable lors d'essais réalisés sans inflammation. Les études portent notamment sur la détermination de la loi de décroissance temporelle de l'intensité de la turbulence. En effet, avec la connaissance de cette loi, il est possible de choisir le délai d'inflammation (délai entre la fin de l'injection de poudre et l'allumage de la source d'ignition) pour qu'il corresponde à l'état initial de la turbulence requis. Dans cette partie, les différentes techniques permettant la mesure de la turbulence au moment de l'ignition seront présentées. Celles-ci ne permettent pas une mesure directe de la turbulence, mais seulement une mesure de la vitesse de l'écoulement. Comme nous l'avons vu dans la partie I.2.3.1, la turbulence est définie à partir de variations de vitesse par rapport à une valeur moyenne. Selon les techniques, cette valeur moyenne peut être calculée différemment : moyenne temporelle, moyenne d'ensemble ou encore moyenne spatiale. Ces différentes méthodes de détermination de la moyenne seront décrites dans la partie B.

#### **II.2.2.1) METHODES INTRUSIVES**

Un premier type de mesures de la turbulence, présenté dans cette partie, nécessite la mise en place, au sein de l'écoulement d'une sonde mesurant la vitesse de ce dernier, dans une ou plusieurs directions: ces mesures sont donc intrusives, et susceptibles de perturber l'écoulement. Deux types de sondes vont être présentés dans cette partie: la première étant une adaptation du tube de Pitot, et la deuxième étant la technique de l'anémométrie par fil chaud.

Un premier appareil de mesure, utilisé notamment par (Schneider and Proust, 2007) a été mis au point en s'appuyant sur le principe du tube de Pitot. Cette sonde est un tube de longueur 2cm et de diamètre 1cm, représentée sur la Figure 21. La sonde mesure la différence de pression entre les deux côtés. Les auteurs ont ainsi pu mesurer l'intensité de la turbulence au sein de leur prototype conçu pour étudier la vitesse de propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières. L'enceinte est de base carrée (30 cm de côté), pour une hauteur de 180 cm, une face étant transparente afin de pouvoir observer la propagation de la flamme. La mise en suspension est semblable à celle utilisée par (Bozier, 2004): un réservoir pressurisé, en se déchargeant, va entraîner la poudre dans des cannes d'injections. Dans ce prototype, les cannes d'injection sont des tubes de 8mm de diamètre intérieur comprenant des trous (1 mm de diamètre), orientés vers le centre de l'enceinte, sur toute la hauteur. La propagation se fait de la base, qui est ouverte, vers le haut du prototype, qui est fermé. Ce même tube a été utilisé par (Proust, 2017) pour mesurer la turbulence dans des enceintes plus grandes : 1  $m^3$ , 10  $m^3$  et 100  $m^3$ . Ce dernier a utilisé plusieurs sondes par essais pour plusieurs raisons : tout d'abord, pour mesurer l'homogénéité de la turbulence. De plus, avoir plusieurs sondes permet d'avoir, en plus des données sur l'intensité de la turbulence, des données sur l'échelle de la turbulence par corrélation spatiale. Une sonde similaire, mais de dimension différente (longueur : 4cm et diamètre : 2cm), a été utilisée pour la mesure de la vitesse de l'écoulement dans une enceinte de  $1 m^3$  (Dyduch et al., 2016).



Figure 21: Tube de Pitot modifié utilisé pour la mesure de la turbulence (Schneider and Proust, 2007)

La vitesse de l'écoulement peut aussi être mesurée à partir d'un anémomètre fil chaud. Le principe de base est le suivant : un fil chauffé est placé dans l'écoulement, ce dernier va alors refroidir le fil, modifiant ainsi sa résistance. La mesure de cette variation de résistance permet ainsi de déterminer la vitesse de l'écoulement. Zhen et Leuckel ont utilisé un anémomètre fil chaud afin de mesurer la vitesse au sein de leur sphère de 1  $m^3$  (Zhen and Leuckel, 1996). Pu et al. ont utilisé cette technique afin de déterminer la turbulence dans différents prototypes de dimensions différentes : 6L, 26L et 950L (Y. kang Pu et al., 1988). Dans une autre étude, Pu et al. ont aussi étudié la turbulence au sein de leur prototype : une enceinte cylindrique de 7L (diamètre 16 cm et hauteur de 36 cm), avec un système d'injection par décharge de réservoir d'air comprimé au travers de tubes de dispersion perforés (Pu et al., 1998). Dans cette étude, les auteurs ont comparé les données de sévérité obtenues sous gravité normale et sous microgravité.

Ces deux techniques permettent ainsi de mesurer la vitesse de l'écoulement, et d'en déduire des caractéristiques de la turbulence. Cependant, un inconvénient majeur de ces techniques est qu'elles sont intrusives et donc susceptibles de modifier l'écoulement dont on veut mesurer la turbulence. Il existe cependant des techniques optiques, non intrusives, qui seront présentées dans les deux prochaines parties : la PIV (Particle Image Velocimetry) et la LDA (Laser Doppler Anemometry).

#### II.2.2.2) PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY - PIV

La Particle Image Velocimetry (PIV) est une technique optique utilisée ici afin de connaître le niveau de turbulence au moment de l'ignition. Cette technique sera présentée plus en détails dans la partie B. Cependant, pour la compréhension de cette partie, il est important de noter que cette technique permet l'obtention des champs de vitesse (deux composantes) dans un plan de l'écoulement : un exemple de champs de vitesse obtenu est représenté sur la Figure 22. Ainsi, le point intéressant de cette méthode est l'obtention simultanée de la vitesse en différents points de l'écoulement (dans un plan).



Figure 22: Résultats de vecteurs vitesses obtenus par PIV (Bozier, 2004)

Wang et al. ont mis en place cette technique afin de quantifier le niveau de turbulence dans leur système au moment de l'ignition (Wang et al., 2006). Le prototype utilisé par ces auteurs a déjà été présenté dans la partie précédente (étude de la concentration par pesée). La mesure PIV a été réalisée sur un plan de l'écoulement de dimensions 40mm x 30mm, avec une mesure de la vitesse à une fréquence de 100 images par seconde. Comme nous l'avons dit précédemment, cette technique permet seulement la mesure de la vitesse dans un plan de l'écoulement et non directement d'un niveau de turbulence, il faut alors définir une vitesse moyenne à partir de laquelle cette turbulence pourra être définie. Au vue du caractère transitoire de l'écoulement, une moyenne temporelle ne semble pas adaptée, une moyenne d'ensemble a donc été préférée : ainsi 90 tests identiques ont été menés. Le calcul de la moyenne d'ensemble pour la détermination des fluctuations de vitesse sera explicité dans la partie B. L'évolution temporelle des fluctuations de vitesse, horizontales et verticales, en différents points de l'écoulement, contenus dans le plan d'étude, a été obtenue. Les valeurs de fluctuations semblent proches en différents points de l'écoulement (représentées par différentes formes sur la Figure 23) : la turbulence semble donc globalement homogène. Une loi de décroissance a ainsi pu être déterminée pour chaque composante, de la forme :

$$u' = a. (1+t)^n$$
 (A2-4)



Figure 23: Evolution de la vitesse turbulente en fonction du temps (Wang et al., 2006)

De plus, les auteurs ont aussi déterminé la valeur de l'échelle intégrale de la turbulence à partir de ces mesures PIV. Pour rappel, l'échelle intégrale est la taille caractéristique des plus gros tourbillons présents dans l'écoulement (ceux porteurs de l'énergie cinétique), et se calcule à partir des coefficients de corrélation (spatiale dans ce cas). Ces longueurs calculées avec les composantes verticales et horizontales sont assez proches. Une augmentation de l'échelle intégrale avec le temps est aussi observée.

L'équipe PETALE de l'université de Lorraine étudie aussi les explosions de poussières, ainsi que de mélanges hybrides poussières-gaz inflammables, en ayant notamment élaboré un prototype permettant d'observer la propagation du front de flamme (Cuervo, 2015). Le prototype est vertical, d'une hauteur de 100 cm, à base carrée de dimension 70mm x 70mm : ce prototype est schématisé sur la Figure 24. Deux parois sont transparentes pour permettre la visualisation du front de flamme, alors que les deux autres sont en métal. L'injection se fait par décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers une buse, la poudre étant placée initialement à la base du prototype autour de la buse : le système d'injection est proche de celui utilisé dans le tube de Hartmann. De plus, une soupape est placée en haut du prototype afin d'évacuer la surpression engendrée par l'explosion. Les travaux de Cuervo ont notamment porté sur l'étude de l'influence de la turbulence sur les explosions de mélanges poussières – gaz inflammables. Ainsi, pour étudier la turbulence engendrée par la mise en suspension de la poussière, un second prototype a été utilisé. Ce dernier utilise le même système d'injection, ainsi qu'une enceinte transparente, afin de pouvoir visualiser la suspension formée, semblable à la précédente : verticale à base carrée de 70mm de côté. Cependant, ce deuxième prototype a une hauteur de 40 cm, contrairement aux 100 cm de hauteur du prototype utilisé pour l'étude de la propagation. Le niveau de turbulence a été déterminé par PIV. Comme nous l'avons dit précédemment, afin de pouvoir quantifier la turbulence il faut définir une valeur moyenne, à partir de laquelle les fluctuations sont alors déterminées. Cuervo a étudié théoriquement le phénomène de décharge des particules à travers un orifice afin de déterminer la loi de décroissance de la vitesse verticale moyenne. A partir de cette évolution de la moyenne de la vitesse verticale, et par mesure de la vitesse verticale instantanée, par la technique PIV, les fluctuations de vitesse verticale ont ainsi pu être calculées. Pour la composante horizontale, l'auteur a pris une valeur moyenne nulle et déterminé les fluctuations directement par la mesure de la vitesse instantanée, par la technique de PIV. A partir de cette étude, la turbulence au moment de l'ignition était ainsi connue, et modifiable à travers le réglage du délai entre la fin de la dispersion et l'allumage de l'arc électrique.



Figure 24: Schéma de principe du prototype développé par l'équipe PETALE de l'Université de lorraine (Cuervo, 2015)

Paquet, dont l'étude a déjà été présentée dans le paragraphe précédent sur la mesure de concentration par diffusion de Mie, a aussi utilisé la technique de PIV pour étudier la suspension formée par différents systèmes de mise en suspension. Cependant, l'auteur a quantifié la vitesse de l'écoulement, sans déterminer de niveau de turbulence. A partir de ces données de PIV, ses résultats expérimentaux (données de vitesse) ont alors été comparés à des résultats numériques obtenus par le code EFAE.

#### II.2.2.3) LASER DOPPLER ANEMOMETRY - LDA

La Laser Doppler Anemometry (LDA) est une autre méthode optique, complémentaire, utilisée afin d'obtenir le niveau de turbulence au moment de l'ignition. Cette technique sera expliquée plus en détail dans la partie B. Cependant, pour la compréhension de cette partie, il est important de noter que cette technique permet d'obtenir les fluctuations de vitesse en un point de l'écoulement avec une grande résolution temporelle. Il faut aussi noter que les données obtenues ne sont pas équi-réparties dans le temps, puisqu'en effet la sonde mesure une vitesse à chaque fois qu'une particule passe dans son volume de mesure.

La sphère de 20L a été fréquemment utilisée lors d'études portant sur la sévérité de telles explosions comme nous l'avons vu précédemment. Une question fréquente était alors l'influence de la turbulence sur les paramètres de sévérité : pression maximale et vitesse de montée en pression maximale. Ainsi, de nombreuses études ont porté sur la caractérisation de la turbulence dans cette sphère. Dans ses travaux de thèse, Dahoe a notamment quantifié ce niveau de turbulence à l'aide de la LDA (Dahoe, 2000). Par manque d'accès optiques, les mesures LDA n'ont pas pu être réalisées sur la sphère normalisée de 20L. Ainsi, une nouvelle sphère a été construite en plastique transparent: les mesures LDA étant alors possibles. Le système

d'injection est semblable à celui utilisé dans la sphère normalisée de 20L. Cependant, trois différents types de déflecteurs ont été étudiés (voir Figure 25). Des essais ont été réalisés avec différentes masses injectées et en différents points de mesure au sein de la sphère. Comme mentionné précédemment, une vitesse moyenne a besoin d'être définie afin de pouvoir déterminer la turbulence : la moyenne utilisée ici est une moyenne temporelle. Pour chaque point du signal (correspondant à une valeur de vitesse à un instant donné), une régression polynomiale est effectuée en prenant en compte les points situés dans une fenêtre autour de ce point d'intérêt. Enfin, la valeur du polynôme de régression au point d'intérêt sera considérée comme étant la valeur moyenne de la vitesse à l'instant correspondant. La méthode d'analyse du signal obtenu sera plus détaillée dans la partie B. Deux paramètres sont importants dans une telle analyse : le degré du polynôme et la taille de la fenêtre d'intérêt. L'auteur a utilisé pour son étude un polynôme de degré 2 avec une fenêtre de 71 points : 35 avant le point d'intérêt et 35 après. A partir de cette définition de la valeur moyenne, les fluctuations de vitesse peuvent être calculées. Afin de déterminer le niveau de turbulence, l'auteur a décidé de calculer la valeur de la vitesse rms par intervalles de 4 ms :

$$v'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} {v'_{i}}^{2}}$$
(A2-5)

avec  $v'_i = v_i - \overline{v}_i$ 

*v*<sub>*i*</sub>: la vitesse instantanée mesurée

et  $\overline{v_l}$ : la vitesse moyenne calculée au point considéré

La décroissance du niveau de turbulence au cours du temps a alors été approximée par des lois de la forme :



Figure 25: Représentation des déflecteurs utilisés dans la sphère (Dahoe, 2000)

Une analyse de la décroissance de la turbulence au sein de la sphère de 20L a aussi été menée par LDA par Skjold dans ses travaux de thèse (Skjold, 2003). Ce dernier a étudié les données issues du LDA avec deux méthodes : la première étant celle décrite précédemment, la seconde étant la méthode LOESS (acronyme pour « Locally weighted Scatterplot Smoother »). La méthode LOESS est utilisée, comme la première méthode, pour obtenir l'évolution de la vitesse moyenne à partir des données issues du LDA. Cette méthode est proche de la première méthode présentée. Pour un point d'intérêt donné (correspondant à une valeur de vitesse mesurée à un

instant donné), tous les autres points auront un poids assigné, selon leur distance au point d'intérêt: les points les plus proches du point d'intérêt ayant ainsi un poids plus important. Généralement, la loi permettant le calcul des poids est de la forme :

$$w(x) = \begin{cases} (1 - |x|^3)^3 \ pour \ |x| < 1 \\ 0 \ pour \ |x| > 1 \end{cases}$$
(A2-7)

Une régression polynomiale va alors être effectuée sur tous les points voisins du point d'intérêt, pondérés par le poids précédemment calculé. La valeur moyenne au point considéré est alors la valeur du polynôme en ce point. Ainsi, comme précédemment, deux paramètres sont importants : le degré n du polynôme et le facteur de lissage f qui est directement lié au nombre de points utilisés pour la régression polynômiale (taille de la fenêtre : n. f). Skjold a approximé la décroissance de la turbulence par le même type de lois que Dahoe. Mercer et al. ont aussi étudié la turbulence dans la sphère de 20L (Mercer et al., 2001). L'intensité de la turbulence a été calculée par ces derniers en utilisant la méthode LOESS : ils ont alors proposé une méthode pour la détermination du facteur de régression f.

Dahoe et al., après avoir mesuré la turbulence au sein de la sphère de 20L et approximé la décroissance de la turbulence par un même type d'équation que présenté précédemment, ont discuté des normes utilisées pour les essais d'explosivité avec les sphères de 1  $m^3$  et de 20L (Dahoe et al., 2001a). En effet, au moment de l'ignition, en suivant les standards des normes en vigueur, les taux de turbulence sont différents entre ces deux prototypes. Pour obtenir un même taux de turbulence au moment de l'ignition, il faudrait avoir un délai avant ignition de 200ms dans la sphère de 20L, au lieu de 60ms actuellement explicité dans les normes. Ainsi, la validation d'une loi cubique, via l'utilisation du facteur  $K_{st}$  (voir partie I.2.1.2), à partir de ces tests réalisés avec des sphères de 20L et de 1  $m^3$  semble poser problème. En effet, les valeurs de K<sub>st</sub> obtenus avec l'un ou l'autre des deux dispositifs semblent difficilement comparables car déterminés pour des intensités de turbulence initiale différentes, la turbulence ayant une importante influence sur les paramètres de sévérité de l'explosion (voir partie I.2.3.2). Or, cette donnée de K<sub>st</sub> est utilisée dans les calculs d'ingénierie afin d'évaluer la violence des explosions dans des conditions industrielles (volumes plus importants) à partir des données expérimentales réalisées avec des prototypes de dimensions plus faibles. Ainsi, ces auteurs préconisent l'abandon de l'utilisation de cette donnée, en la remplaçant par des données basées sur une approche plus fondamentale.

Les deux méthodes optiques présentées auparavant (PIV et LDA) sont complémentaires (Bozier, 2004). En effet, dans son travail de thèse, Bozier a étudié le niveau de turbulence au sein de son prototype (décrit dans la partie II.1.1.3 et représenté sur la Figure 20) par des mesures de PIV et de LDA. La PIV permet en effet d'obtenir un champ 2D de vecteurs vitesse dans un plan de l'écoulement : ainsi des données sur l'homogénéité spatiale de la turbulence peuvent être obtenues (grande résolution spatiale). Les données LDA, quant à elles, permettent d'obtenir des données locales sur l'évolution temporelle de la vitesse (grande résolution temporelle).

#### II.2.3) ETUDE NUMERIQUE DE LA MISE EN SUSPENSION

A partir de ces essais expérimentaux, il est possible d'élaborer des modèles numériques afin de modéliser la dispersion des particules au sein de l'enceinte : c'est le domaine de la CFD (Computational Fluid Dynamics), c'est-à-dire la modélisation de la mécanique des fluides assistée par ordinateurs. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques permet alors de qualifier la validité d'un modèle. Quelques exemples d'études numériques de la dispersion des particules, en vue de l'étude de leur explosivité, sont présentés dans cette partie.

Tout d'abord, certaines études numériques portent sur l'étude de la dispersion dans les prototypes normalisés, utilisés notamment pour l'étude des paramètres d'explosivité (sensibilité et sévérité). La sphère de 20L a notamment fait l'objet de nombreuses études numériques, afin de connaître l'état de la suspension au moment de l'ignition (60 ms après la fin de l'injection d'après la norme). Murillo et al. se sont intéressés à cette problématique, leur étude visant notamment à connaître le niveau de répétabilité des essais et les conditions permettant une meilleure représentativité des essais (Murillo et al., 2016). Ils ont modélisé la géométrie de la sphère : réservoir d'air comprimé, sphère de 20L et buse d'injection. Ils ont ensuite utilisé le logiciel de CFD Star CCM+ avec une approche Euler-Lagrange. Les résultats obtenus sont comparés aux mesures expérimentales par PIV. L'évolution de la concentration en poudre au sein de l'enceinte est notamment étudiée. Cette étude leur a ainsi permis de déterminer le délai d'ignition permettant a priori une meilleure reproductibilité des essais : à partir de 80ms, une part importante de la poudre est en suspension dans la sphère et le caractère fluctuant du nuage (associé à un niveau de turbulence élevé) a diminué. Di Benedetto et al. ont aussi modélisé le phénomène de dispersion au sein de la sphère de 20L (Di Benedetto et al., 2013): ils ont également modélisé la sphère de 20L, le réservoir d'air comprimé et la buse. Le logiciel utilisé pour la modélisation numérique était ANSYS Fluent. La validation du modèle a notamment été faite en comparant l'évolution de la pression dans l'enceinte obtenue numériquement et au cours de différents essais. Les évolutions de la distribution de la vitesse et de la distribution de l'énergie cinétique au sein de la sphère sont notamment obtenues : l'influence de la présence des particules sur l'écoulement étant étudiée. La fragmentation de la poudre pendant l'injection a aussi été modélisée.

La modélisation numérique peut aussi être utilisée pour étudier la dispersion dans des prototypes autres que les prototypes normalisés. Par exemple, le prototype utilisé par l'équipe PETALE à l'Université de Lorraine a notamment fait l'objet de diverses études numériques. Pour rappel, ce prototype, décrit dans la partie II.1.2.2 et représenté sur la Figure 24, est vertical à base carré, avec une injection du type tube de Hartmann (décharge d'un réservoir d'air comprimé, au travers d'une buse située à la base du prototype). Murillo et al. ont notamment étudié la mise en suspension avec le logiciel ANSYS Fluent et une approche Euler-Lagrange (Murillo et al., 2013). A partir de données, expérimentales, un modèle de fragmentation a été ajusté et utilisé dans le code CFD afin de prendre en compte la variation de la distribution granulométrique au cours du temps. Le délai d'ignition permettant la réalisation d'essais avec une meilleure répétabilité a été déterminé. Cuervo et al. ont aussi étudié la dispersion au sein de ce prototype par CFD (Cuervo et al., 2014). Des essais expérimentaux (étude de la turbulence par PIV) ont alors été mis en place afin de comparer les résultats numériques à ces derniers. A partir de cette étude, des recommandations ont été établis sur la hauteur des électrodes et le délai d'ignition, afin d'obtenir une meilleure reproductibilité entre les essais.

D'autres auteurs ont étudié la dispersion de la poudre au sein de leur propre prototype. Par exemple, Krause et Kasch se sont intéressés dans un premier temps à l'étude de la suspension et de la propagation de la flamme expérimentalement, avant de comparer ces résultats de propagation à des résultats obtenus par CFD, avec le logiciel ANSYS Fluent (Krause and Kasch, 2000). Leur prototype d'étude de la flamme turbulente est un tube cylindrique (hauteur : 1m et diamètre : 30cm) avec un système de mise en suspension de type lit fluidisé. Par la suite, les auteurs ont simulé numériquement la dispersion de la poussière lors du remplissage d'un silo à échelle réelle. Cela permet alors de connaître le cas le plus défavorable potentiellement rencontré au sein du silo. Cette donnée est importante en vue de l'analyse des risques : le cas le plus défavorable doit ainsi être pris en compte pour l'évaluation des conséquences potentielles en situation accidentelle. Dans ses travaux de thèse, Paquet a aussi fait une modélisation numérique de l'injection de particules dans son prototype avec les différents systèmes d'injection utilisés expérimentalement (prototype décrit dans la partie II.1.1.3). Ces résultats numériques ont alors été comparés qualitativement aux résultats obtenus par diffusion de Mie (concentration) et par PIV (vecteurs vitesse). Par la suite, la dispersion a aussi été étudiée numériquement avec une géométrie plus complexe, plus proche de celle rencontrée dans un moteur à explosion.

#### **II.3) RESULTATS DE PROPAGATION DE FLAMMES**

Les méthodes présentées précédemment permettent de s'assurer de l'homogénéité, à la fois en termes de concentration et de turbulence, de la suspension formée, mais aussi de quantifier le niveau de turbulence au moment de l'ignition. Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux études portant sur la propagation de la flamme : cette propagation étant bien évidemment directement liée au niveau de turbulence au sein de l'enceinte. Ces études s'appuient notamment sur des méthodes optiques de visualisation du front de flamme.

#### II.3.1) DETECTEURS DE FLAMME

Afin d'étudier la propagation de la flamme au sein d'une enceinte, une sonde peut être utilisée. Le détecteur de flamme permet alors de déterminer la présence ou non de flamme dans son axe de positionnement. Ainsi, en utilisant plusieurs sondes, la vitesse de propagation de la flamme peut être déterminée. Une telle sonde a été utilisée par Zhang et al. afin de déterminer cette vitesse dans leur enceinte fermée (Zhang et al., 2012). L'accélération de la flamme a alors été observée pour des tailles de particules différentes.

Chen et Fan ont également, à l'aide de sondes, étudié la propagation de la flamme dans une enceinte fermée (Chen and Fan, 2005) : l'enceinte permet l'étude de la combustion dans un tube de 14cm de diamètre et de 12m de long. La dispersion de particules est réalisée à l'aide de 20 systèmes de dispersion disposés sur toute la longueur du tube sous la forme de réservoirs d'air pressurisé se déchargeant à travers une sphère d'injection composée de trous. Un réservoir de 10  $m^3$  est disposé du côté opposé à l'ignition afin d'absorber l'explosion. Des sondes de détection de flammes ont été disposées le long du tube, ainsi que des capteurs piézoélectriques (mesure de la pression). L'accélération de la flamme a ainsi été observée, avec la formation d'une onde de choc. Un modèle numérique permettant de modéliser l'explosion dans cette enceinte est aussi présenté.



Figure 26: Prototype d'étude de la propagation utilisé par (Chen and Fan, 2005)

Pu et al. ont également étudié la propagation de la flamme au sein de leur enceinte notamment à partir de photodiodes (Pu et al., 1995). Ce prototype est un tube horizontal de 14cm de diamètre divisé en deux parties : une partie « initiation » d'une longueur de 3m avec un système de mise en suspension de la poudre à partir de décharge de réservoirs d'air comprimé, et une partie « test » d'une longueur de 2m. Dans un premier temps, la mise en suspension de la poudre est étudiée : la turbulence étant étudiée par anémométrie fil chaud, et la concentration

par visualisation de la poudre sédimentée couplée à des mesures par transmission lumineuse. Par la suite, la propagation d'une flamme d'aluminium est étudiée à partir de photodiodes et de mesures de pression : une accélération constante de la flamme est alors reportée.

#### **II.3.2) VISUALISATION DIRECTE**

La méthode précédente permet de connaître la vitesse de propagation de la flamme, cependant elle ne permet pas de visualiser la forme du front de flamme. La visualisation directe, c'est-à-dire la visualisation de la propagation de la flamme à l'aide d'une caméra, est une méthode permettant de visualiser la forme de la flamme, ainsi que sa vitesse de propagation.

Cette méthode a été utilisée par Proust et Veyssière afin d'observer la propagation de flammes dans un nuage de particules d'amidon au sein de leur enceinte : hauteur de 3m et section carrée de 20cm x 20cm, avec un système d'injection à lit fluidisé (Proust and Veyssiere, 1988). L'ignition de la poudre est réalisée par un fil de tungstène chauffé. L'observation de la flamme est effectuée avec une caméra, ayant un temps de pause inférieur à 2ms, à une fréquence de 3 fps (fps : frames per second – images par seconde). Plusieurs configurations de flammes ont ainsi pu être observées, en modifiant notamment la concentration du nuage, mais aussi le sens de la propagation (ascendante ou descendante).

Cette méthode a aussi été utilisée par Gao et al. afin d'étudier la propagation de la flamme dans un nuage de particules de titane (Gao et al., 2014). Le tube utilisé est proche de celui de Hartmann, avec une hauteur de 50cm et une base carrée de 80mm x 80mm, le haut du tube étant ouvert. L'ignition est réalisée par un arc électrique (transformateur haute-tension de 30kV) à travers deux électrodes en tungstène de 0.4mm de diamètre et écartées de 5mm. L'arc dure 10ms, délivrant une énergie d'environ 30J. La propagation de la flamme est visualisée à l'aide d'une caméra à une fréquence de 2000fps : des images obtenues sont représentées sur la Figure 27. A partir de ces images, la vitesse de propagation de la flamme est alors obtenue.





Figure 27: Images de visualisation directe de la propagation d'une flamme de titane (Gao et al., 2014)

Dans ses travaux de thèse, Baudry s'est interrogé sur la définition de la vitesse de flamme à partir des images obtenues (Baudry, 2007). En effet, ce dernier a travaillé sur la propagation de la flamme de poussières d'aluminium à différents niveaux d'oxydation initiale. Le prototype utilisé pour l'étude de la propagation par caméra rapide est d'une hauteur de 310mm

avec un diamètre de 7 cm, le système de dispersion étant semblable à celui du tube de Hartmann modifié. La visualisation est effectuée à l'aide d'une caméra Photron FastCam PCI à une fréquence de 1000fps et une résolution de 256x240 pixels. Des images obtenues sont représentées sur la Figure 28. Afin de définir la flamme, un seuil a été choisi : les pixels ayant une intensité supérieure à ce seuil correspondent ainsi à la flamme. Ceci permet d'isoler la flamme du fond de l'image, et de calculer plusieurs grandeurs : la surface apparente, les coordonnées du centre de la flamme, la largeur et la hauteur de la flamme (correspondant aux distances horizontales et verticales entre le centre de la flamme et le front de flamme).



t = 0 ms t = 6 ms t = 12 ms t = 22 msFigure 28: Images de visualisation directe de propagation de flammes d'aluminium (Baudr Y, 2007)

Cependant, il faut alors définir une vitesse à partir des images de cette flamme. Trois méthodes ont été utilisées par l'auteur :

- L'estimation de la vitesse dans un repère fixe : le centre du repère correspond au centre de la flamme dans la première image. L'évolution du rayon est alors mesurée, selon un axe vertical et un axe horizontal, entre le centre du repère et le front de flamme.
- L'estimation de la vitesse dans un repère mobile : dans ce cas, le centre du repère correspond au centre de la flamme pour chaque image.
- L'estimation à partir de la surface apparente : un rayon équivalent est déterminé à partir de la surface apparente (hypothèse de propagation sphérique)

La comparaison de ces méthodes est présentée sur la Figure 29. La méthode utilisant la surface apparente a été utilisée par l'auteur dans ses analyses. La propagation observée a été approximée par une loi polynomiale d'ordre 2, correspondant ainsi à une augmentation linéaire de la vitesse (accélération constante).



Figure 29: Comparaison des méthodes utilisées pour la détermination de la vitesse de propagation (Baudry, 2007)

Di Benedetto et al. ont aussi étudié la propagation de la flamme au sein d'un tube à l'aide d'une caméra rapide (Di Benedetto et al., 2011). Le prototype utilisé est proche du tube de Hartmann avec une hauteur de 1m et une section carrée de 7cm x 7cm, deux faces étant transparentes afin de visualiser la propagation de la flamme. Cette propagation est observée par une caméra Phantom V91 à une fréquence de 2000fps. A partir des images obtenues, le front de flamme est alors approximé par une parabole. L'auteur a utilisé la méthode du tube ouvert afin d'obtenir la vitesse de combustion laminaire non étirée à partir de la visualisation de la vitesse de propagation de la flamme. Ces vitesses sont obtenues notamment pour des mélanges hybrides d'acide nicotinique et de méthane.

L'utilisation de cette méthode afin d'obtenir la vitesse laminaire non étirée a aussi été utilisée par Torrado et al. avec le prototype développé par l'équipe PETALE de l'Université de Lorraine, décrit dans la partie II.1.2.2 et représenté sur la Figure 24 (Torrado et al., 2017a) : pour rappel l'enceinte est un tube de 1m de hauteur avec une section carrée de 70cm x 70cm avec un système d'injection semblable au tube de Hartmann. L'ignition est réalisée par un arc électrique d'une énergie de l'ordre de 10J. La propagation est observée par une caméra rapide Phantom V9.1 avec une fréquence de 1000 à 4000fps. Sur la Figure 30, une image de flamme obtenue est représentée avec en-dessous la détection numérique du front de flamme (Cuervo, 2015).



Figure 30: Images de visualisation directe de la propagation d'une flamme de mélange 10.5% de méthane et 30 mg de Corax N550 (haut) et la détection de contours obtenue (Bas)(Torrado et al., 2017a)

Sur la Figure 31, la vitesse laminaire étirée  $S_u$  en fonction de l'étirement K est représentée : cette figure permet la détermination de la vitesse de flamme non étirée,  $S_u^0$  par l'équation suivante :

$$S_u = -L.K + S_u^0$$
 (A2-8)

Avec L la longueur de Markstein et K l'étirement de la flamme, calculé comme suit :

$$K = \frac{1}{A_f} \frac{dA_f}{dt} \tag{A2-9}$$

Avec  $A_f$  la surface de la flamme.

La régression linéaire ne peut être réalisée que sur la droite marron. En effet, pour les temps supérieurs, la flamme a atteint les murs latéraux (droites bleues). Pour des temps, plus faibles, une mauvaise détection de la flamme rend la mesure du front de flamme imprécise (droite rouge).



Figure 31: Résultats de détermination de la vitesse de combustion non étirée (Torrado et al., 2017a)

Comme cela a été vu précédemment, une difficulté majeure pour obtenir la vitesse de flamme laminaire est la définition de la surface de la flamme. En effet, avec cette méthode, la surface est intégrée sur toute la profondeur du prototype. De plus, cette surface est obtenue seulement selon un axe. Une autre difficulté est l'influence des parois sur la propagation de la flamme.

#### II.3.3) VISUALISATION DES GRADIENTS D'INDICE DE REFRACTION

La méthode précédente permet d'observer la propagation du front de flamme. Cependant, la définition de la zone représentant réellement la flamme peut être difficile. Prenons l'exemple des images présentées précédemment, la définition du front de flamme n'est pas directe : on observe aussi la diffusion de la lumière, émise par la flamme, par les particules situées en amont du front de flamme. Une nouvelle technique peut alors être mise en place permettant d'observer les gradients d'indice de réfraction du milieu : la technique Schlieren. Cette technique sera présentée plus en détail dans la partie C. Pour la compréhension de cette partie, il est important de noter que les fronts observés par la technique du Schlieren correspondent à des zones de gradient de température et ne tiennent donc pas compte de la lumière directe. Dans notre cas, nous nous intéressons essentiellement au gradient de température en amont du front de combustion, correspondant à la zone de préchauffage des gaz frais. Ce front est intégré sur la profondeur de l'enceinte.

Ding et al. ont utilisé cette méthode optique, en complémentarité de la méthode de visualisation directe, afin de détecter plus facilement le front de flamme (Ding et al., 2010). Dans leur étude, la propagation d'une flamme, amorcée par un arc électrique créé à l'aide d'un transformateur 30kV entre deux électrodes, de poussières de zirconium, dans une enceinte de 50cm de hauteur et de section carrée de dimension 80mm x 80mm avec une injection de type tube de Hartmann, a été étudiée. Deux vitres en quartz permettent la visualisation du front de flamme. La visualisation de la flamme, par visualisation directe et par schlieren, a été réalisée à l'aide d'une caméra rapide à une fréquence de 2000fps. La méthode schlieren permet d'obtenir un front plus clairement défini comme le montre la Figure 32 qui compare les images obtenues par les deux méthodes. Cette technique a aussi permis d'estimer que le zirconium était préchauffé sur une distance de 7-8 mm en amont du front de flamme (distance entre le front obtenu par Schlieren et le front de combustion).



Figure 32: Comparaison des images obtenues par visualisation directe et schlieren de la propagation d'une flamme de zirconium(Ding et al., 2010)

Dans le prototype élaboré par l'équipe PETALE de l'Université de Lorraine (décrit dans la partie II.1.2.2 et représenté sur la Figure 24), Torrado et al. ont étudié la propagation de la flamme par visualisation directe, comme présenté précédemment, mais aussi avec la méthode Schlieren (Torrado et al., 2017b). En comparant deux essais, les auteurs ont remarqué que la visualisation directe avait une bonne reproductibilité pour les mélanges avec un faible taux de turbulence (délai avant ignition important), mais une moins bonne reproductibilité lorsque la turbulence est plus élevée. Les auteurs ont alors décidé d'utiliser la méthode Schlieren afin d'observer la propagation de la flamme, notamment dans les premiers instants (propagation sphérique). Le contour de flamme est alors plus facilement identifiable pour des mélanges méthane/air, mais reste plus difficilement identifiable avec les mélanges comportant des nanoparticules de noirs de carbone.

Wang et al. ont quant à eux utilisé l'ombroscopie, une autre méthode optique permettant la visualisation des variations d'indice de réfraction, pour visualiser la propagation d'une flamme de fécule de maïs dans leur enceinte, décrite dans la partie concentration par pesée (Wang et al., 2006): prototype vertical d'une hauteur de 780 mm, de base carrée de section 160x160 mm, avec une injection de type lit fluidisé. L'ignition du mélange est réalisée avec une étincelle de faible énergie qui enflamme un petit nuage de mélange butane-air (allumage type briquet). La méthode d'ombroscopie est proche de la méthode Schlieren (détails dans la partie C): l'ombroscopie permet d'observer la dérivée seconde de l'indice de réfraction (liée à l'augmentation de température au passage du front de flamme) alors que la technique Schlieren permet d'observer la dérivée première de l'indice de réfraction. La visualisation de la propagation, par visualisation directe et par ombroscopie, est réalisée à une fréquence de 250fps : la visualisation directe est réalisée sur une hauteur de 35 cm alors que la technique d'ombroscopie permet la visualisation à travers des fenêtres de 15cm de diamètre. L'étude par ombroscopie a permis d'observer la structure de la flamme : la zone sombre représentant la zone de préchauffage (Figure 33). La structure de la flamme semble donc complexe : un front unique se déplaçant dans le milieu n'est pas observé, mais plutôt de multiples fronts.



Figure 33: Images d'ombroscopie obtenues lors de la propagation d'une flamme de fécule de maïs (Wang et al., 2006) : flamme laminaire (a) et turbulente (b)

Han et al. ont également étudié la propagation de la flamme en couplant la méthode de visualisation directe et celle de Schlieren dans leur prototype déjà présenté dans la partie concentration par pesée (Han et al., 2000): prototype vertical de dimensions 1800mm x 150mm x 150mm, avec un système d'injection à lit fluidisé. L'ignition de poudre de lycopodium est réalisée par un arc électrique d'une énergie d'environ 10J entre deux électrodes. La visualisation directe a été faite avec des caméras rapides à une fréquence allant de 30 à 2000fps. Une première visualisation a permis d'observer la propagation sur une hauteur importante afin de déterminer la vitesse de propagation. Une deuxième visualisation en zoomant sur le front de flamme a permis de mieux distinguer ce dernier. La flamme a aussi été observée par schlieren, couplé à une sonde, afin de déterminer l'épaisseur de la zone de préchauffage et celle de la zone de combustion.

Dans ses travaux de thèse, Sabard a aussi étudié la propagation de la flamme par schlieren dans des mélanges hybrides H2/O2/N2/Graphite et H2/O2/N2/Tungstène (Sabard, 2013). L'étude a été réalisée dans une sphère de 8L à l'aide d'une caméra à une fréquence de 6000fps. A partir des images obtenues par Schlieren, il a comparé deux méthodes pour obtenir la vitesse fondamentale de flamme laminaire à étirement nul (Su°): une méthode linaire et une méthode non-linéaire. Les données obtenues pour la vitesse de flamme sont relativement proches, mais sont plus éloignées en termes de longueur de Markstein : cette dernière caractérisant la réponse de la flamme à l'étirement (voir partie II.3.2)). Or, la méthode linéaire étant une approximation de la méthode non-linéaire, en vue des écarts observés, la méthode non-linéaire a été sélectionnée pour la suite de son étude.

#### II.3.4) VISUALISATION DE L'ECOULEMENT EN AMONT DU FRONT DE FLAMME

La propagation de la flamme peut aussi être observée en utilisant une nappe laser. Ainsi, une nappe laser éclaire la suspension et une caméra rapide visualise la lumière diffusée par les particules. Cette méthode permet alors de visualiser les particules en amont du front de flamme.

Han et al. ont utilisé cette technique avec leur prototype déjà décrit précédemment dans la partie concentration par pesée (Han et al., 2001). Ils ont étudié la propagation d'une flamme de lycopodium avec une tranche laser verticale sur une zone de 60mm x 60mm, en utilisant une caméra rapide avec une résolution de 1018x1008 pixels. A l'aide d'un algorithme de PIV le mouvement des particules en amont du front de flamme a ainsi pu être étudié (Figure 34). De

plus, cette méthode optique leur a aussi permis d'obtenir les variations de concentration en amont du front de flamme (Figure 35).



Figure 34: Images de PIV obtenues en amont d'une flamme de lycopodium (Han et al., 2001)



Figure 35: Résultats de la concentration en amont d'une flamme de lycopodium (Han et al., 2001)

Cette méthode a aussi été utilisée par Proust pour étudier la propagation lors d'explosion de fleur de soufre dans son prototype vertical, d'une hauteur de 1,5m à section carrée de 10cm x 10cm, avec un système d'injection à lit fluidisé, et une ignition réalisée à l'aide d'un fil chauffé : voir Figure 36 (Proust, 2006). Deux méthodes permettant d'obtenir la vitesse de flamme laminaire ont été comparées : la première est celle du tube ouvert (qui sera décrite dans la partie C), la seconde est une méthode directe. La méthode directe évalue cette vitesse au sommet du front de flamme à l'aide de la relation suivante :

$$Sl = S - U \tag{A2-10}$$

Où S est la vitesse de propagation de la flamme et U la vitesse des gaz en amont du front de flamme (obtenue à l'aide des images obtenues par tomographie : vitesse des particules en amont du front de flammes). Les résultats obtenus avec ces deux méthodes étant proches, l'auteur a

ainsi conclut quant à la capacité de la deuxième méthode à caractériser la vitesse de flamme laminaire d'une suspension poussières-air.



Figure 36: Images par tomographie laser des particules en amont d'une flamme de fleurs de soufre(Proust, 2006)

#### II.4) AUTRES ETUDES

Dans cette partie, des études complémentaires seront présentées. La première partie concernera quelques études réalisées ayant pour objectifs de limiter les effets des parois, rencontrés lors d'essais en enceinte notamment. La deuxième partie présentera des études s'intéressant à l'influence d'obstacles sur la propagation de la flamme.

#### II.4.1) SANS EFFETS DE PAROIS

Certaines études ont porté sur la propagation d'une flamme dans un nuage de poussières en limitant les effets de parois. Un premier prototype semi-ouvert, présenté sur la Figure 37, utilisé dans plusieurs études est un prototype de type tube de Hartmann dont une partie des parois latérales peuvent être enlevées entre la fin de l'injection et le début de l'ignition (Gao et al., 2015; Sun et al., 2006, 2003; Yu et al., 2016; Zhang et al., 2016). Par exemple, Yu et al. ont étudié la propagation d'une flamme dans un nuage de particules de titane (Yu et al., 2016). Dans un premier temps, la propagation sur une distance importante a été observée afin de déterminer la vitesse de propagation d'une telle flamme. Dans un second temps, l'étude a porté sur la visualisation zoomée du front de flamme afin de voir les caractéristiques de ce dernier. Dans cette étude, la propagation de la flamme dans un nuage de particules micrométriques a été comparée à celle avec des particules nanométriques. Une autre étude a porté sur la propagation de la flamme dans un nuage de PMMA (Polyméthacrylate de méthyle) (Zhang et al., 2016). Dans un premier temps, l'étude par PIV de la suspension formée, a permis d'étudier le niveau de turbulence en fonction du délai avant ignition. Par la suite, la propagation de la flamme a été observée pour différents délais d'ignition. Les auteurs se sont aussi intéressés à la pulsation observée dans la propagation de la flamme. Ce prototype a aussi été utilisé afin d'observer les particules en amont du front de flammes (Sun et al., 2003). Sun et al. ont ainsi étudié la concentration en particules de fer en amont du front de flamme. Pour cela, les particules sont illuminées par une nappe laser et visualisées à l'aide d'une caméra à une fréquence de 100-200fps : la zone d'étude est un rectangle de 6.6mm x 4.6mm avec une résolution de 658x496 pixels. Avec cette méthode, la concentration en amont du front de flamme lors d'une explosion de poussières de fer a pu être étudiée. Une autre étude a porté sur le mouvement des particules en amont du front de flamme à l'aide d'une méthode PIV (Gao et al., 2015). Le mouvement des particules en amont du front de flamme est observé avec une caméra Photron SA2, à une fréquence de 1080fps pour une résolution de 2048x2048 pixels. Un algorithme a été mis en

place afin de déterminer le champ de vecteurs vitesse en amont du front de flamme : les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 38. Une étude a aussi porté sur le mécanisme de propagation de la flamme dans une suspension d'aluminium (Sun et al., 2006). La propagation a été observée par visualisation directe et par la technique Schlieren : voir Figure 39. La méthode Schlieren permet alors d'observer les caractéristiques du front de flamme, notamment l'épaisseur de la zone de préchauffage (ici de l'ordre de 3mm). La combustion d'une particule isolée d'aluminium a aussi été observée dans cette étude.



I- Compressed air bottle, 2- Pressure gage, 3- Pressure reducing valve, 4- Buffer vessel, 5- Pressure gage, 6- Solenoid valve, 7- Time controller, 8- Gas nozzle, 9- Dispersing cone, 10- Sample container, 11- Movable tube, 12- Stopper, 13- Ignition electrode, 14-Voltage transfer, 15- Mesh, 16- High speed cameras.

Figure 37: Schéma d'un prototype de Hartmann permettant de limiter l'effet des parois (Yu et al., 2016)



Fig. 15. The superimposed images of direct flame emission and laser light scattering 69.6 ms after ignition.



Fig. 16. The superimposed photograph of direct flame emission and velocity field of the unburned particles 69.6 ms after ignition.

Figure 38: Résultats de la visualisation du mouvement des particules en amont d'une flamme d'aluminium avec le prototype semi-ouvert(Gao et al., 2015)



Figure 39: Images obtenues par visualisation directe (gauche) et schlieren (droite) de la propagation d'une flamme d'aluminium(Sun et al., 2006)

Julien et al. se sont aussi intéressés à l'étude de la propagation libre (en limitant les effets de parois) de la flamme dans un nuage d'aluminium à l'aide de deux prototypes (Julien et al., 2015b). Le premier prototype permet d'étudier la propagation de la flamme au sein d'un ballon en latex. Ce dernier est posé sur un support avec trois entrées : une permettant de gonfler le ballon, une autre afin d'injecter la poudre et enfin une dernière pour l'ignition. Dans un premier temps le ballon est gonflé jusqu'à un diamètre de 30 cm, la poudre est ensuite injectée, et enfin, après un certain délai, l'ignition est enclenchée : l'ignition est réalisée par la décharge d'un condensateur à travers un fil de tungstène. La dispersion de la poudre est observée avec une caméra Photron SA5 à une fréquence de 300fps alors que pour la propagation de la flamme la fréquence est de 5000fps. Les images obtenues sont présentées sur la Figure 40. Un caractère pulsatoire de la flamme, en termes d'intensité lumineuse, a été observé (Julien et al., 2015a). Vickery et al. ont aussi utilisé ce premier prototype pour étudier la propagation de la flamme dans un mélange hybride aluminium-méthane (Vickery et al., 2017). Skjold et al. ont aussi étudié la propagation d'une flamme, notamment de lycopodium et d'amidon de maïs, dans un ballon (Skjold et al., 2013).



Figure 40: Propagation d'une flamme d'aluminium au sein d'un ballon en latex (Julien et al., 2015b)

Un deuxième prototype a aussi été mis en place par Julien et al. afin d'étudier la propagation de la poudre d'aluminium en champ libre à plus grande échelle (Julien et al., 2015b). Pour cela, la poudre est entraînée par un piston à travers une buse d'injection : le nuage obtenu est de forme conique avec une hauteur d'environ 4m et une largeur au sommet d'environ

2m. L'ignition du nuage est réalisée à l'aide de 2-3g de poudre noire. La visualisation est réalisée avec une caméra Photron SA5 à une fréquence de 1000fps : voir Figure 41.



Figure 41: Propagation d'une flamme d'aluminium en champ libre(Julien et al., 2015b)

#### II.4.2) ETUDE AVEC DES OBSTACLES

Dans sa thèse de master, Olsen a étudié l'influence de la mise en place d'obstacles sur la propagation de flammes lors d'explosions de gaz et de poussières (Olsen, 2012). Le prototype est un tube horizontal d'une longueur de 3,6m avec une section carrée de 27cm x 27cm. Ce prototype est composé de trois parties, mesurant chacune 1,2m, ayant chacune leur propre système d'injection réalisé par décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers une buse d'injection placée au centre de chaque partie. Des vitres sont aussi situées sur le prototype afin d'observer la propagation de la flamme, à l'aide d'une caméra rapide : à une fréquence de 4000fps pour les essais sans obstacles et 7800fps pour les essais avec obstacles. Les obstacles permettent un « blockage ratio », représentant la section de passage au travers de l'obstacle divisée par la section de passage sans obstacle, de 0.4, ces obstacles pouvant être espacés de 15cm ou 30cm selon les essais. La poussière étudiée lors de ces essais est de l'amidon de maïs de diamètre médian 13µm. Ce prototype a aussi été utilisé par Skjold et al. afin d'étudier l'influence d'obstacles sur la propagation de la flamme (Skjold et al., 2014). Dans ces travaux, les résultats expérimentaux obtenus sont comparés à ceux obtenus à l'aide de codes de calcul CFD: FLACS et DESC.

Pu et al. ont aussi étudié l'influence d'obstacles sur la propagation de flammes de poussières (Y. K. Pu et al., 1988). Le premier prototype est un prototype de 1m de longueur à section carrée de 5cm x 5cm avec une extrémité ouverte, les parois transparentes permettant la visualisation de la propagation de la flamme notamment à l'aide de la technique de Schlieren. La dispersion de la poudre est réalisée par sédimentation depuis le sommet du prototype. Par la suite, la propagation, engendrée par un allumeur de 1,5J, se fait de la base fermée du prototype jusqu'à son sommet ouvert. Des obstacles sont placés dans ce prototype avec des « blockage ratios » de 20%, 40% ou 60% selon les essais. Le second prototype est plus haut, d'une hauteur de 1,86m, avec une section de diamètre 19 cm. Ce prototype fermé permet la visualisation de la propagation de la flamme ainsi que la détermination de la vitesse de montée en pression maximale. L'injection de poudre de fécule de maïs est réalisée à l'aide d'une décharge de réservoirs d'air comprimé à travers des tubes perforés. Le système d'injection est divisé en deux parties : un système pour injecter la poudre dans la moitié inférieure et un deuxième pour la partie supérieure. Les obstacles de « blockage ratio » de 39.2%, correspondant à la valeur optimale pour l'accélération de la flamme, sont situés sur une hauteur de 1m. L'ignition de la poudre est alors réalisée avec 0.6 grammes de poudre noire, correspondant à une énergie d'environ 1,75 kJ.

# CONCLUSIONS DE LA PARTIE A

Les explosions de poussières représentent un risque majeur dans les industries. En effet, toute poussière combustible, si elle est suffisamment fine et en suspension dans l'air, est susceptible d'engendrer une telle explosion. Les conséquences de telles explosions sont les effets thermiques et de surpression notamment.

Une première étude du phénomène consiste à déterminer les paramètres de sensibilité (propension de la poudre à s'enflammer) et de sévérité (effets potentiels de l'explosion résultante) liés à la poudre. Ces derniers sont obtenus à l'aide de différents tests normalisés. De nombreux travaux ont permis d'obtenir une quantité importante de données pour un important nombre de poudres de natures différentes (organiques et métalliques). Ces études sont d'une grande importance pour le dimensionnement d'installations industrielles. En effet, ces paramètres permettent d'éviter l'apparition d'une telle explosion ou d'en contrôler les conséquences (dimensionnement d'évents par exemple). Cependant, bien que ces études ne permettent pas la modélisation précise du phénomène, elles permettent tout de même de mettre en évidence un certain nombre de facteurs influençant l'explosion. La concentration en poussière et le niveau de turbulence initiale de la suspension sont deux paramètres modifiant de manière significative le phénomène d'explosion.

En vue d'une modélisation plus fine du phénomène de propagation de la flamme au sein de la suspension, la réalisation d'essais permettant la visualisation de cette dernière semble pertinents. De nombreux travaux ont étudié cette propagation dans différents prototypes conçus spécialement pour de telles études. Ces derniers ont utilisé différentes méthodes de mise en suspension de la poudre et ont essayé de quantifier l'état initial du mélange au moment de l'ignition (concentration et niveau de turbulence). Différentes techniques de mesures ont ainsi été mises au point. Pour l'étude de la propagation, d'autres moyens métrologiques ont aussi été mises en place afin de visualiser cette dernière.

De nombreux travaux ont porté sur l'étude de la propagation de poussières organiques. Les explosions issues de ces poussières semblent réagir de manière similaire aux explosions rencontrées avec des gaz. Ainsi, les modèles issus des flammes de prémélange gazeux sont adaptés au cas des explosions de telles poussières. Cependant, ces modèles ne semblent pas applicables au cas de poussières métalliques. Ce travail de thèse vise donc à étudier la propagation de la flamme dans le cas d'une poussière métallique (ici l'aluminium). Pour cela un prototype est élaboré, la dispersion de la poudre étant quantifié à l'aide de différentes méthodes optiques utilisées par d'autres auteurs. Par la suite, la propagation de la flamme est étudiée dans ce prototype : différentes méthodes optiques sont alors mises en œuvre. Le but de ce travail de thèse est donc d'évaluer, de visualiser et de qualifier la propagation de la flamme dans une suspension de poussières métalliques.

# PARTIE B : ETUDE DE LA MISE EN SUSPENSION DES PARTICULES

INTRODUCTION				
I) MATERIE	L	65		
I.1) LAP				
I.1.1) F	tude par aranulomètre laser			
I.1.2) F	tude par microscope électronique à balavage (MFB).			
I.2) Misi	EN PLACE EXPERIMENTALE			
I.2.1) L	e prototype élaboré			
1.2.2)	e système d'iniection de la poussière			
I.2.3) L	es mesures physiques			
II) METHOD	ES OPTIQUES UTILISEES	71		
II.1) MES	URE DE LA CONCENTRATION PAR DIFFUSION DE MIE			
II.1.1)	Présentation générale de la méthode			
II.1.2)	Méthode d'analyse			
II.2) MES	URE DE LA TURBULENCE PAR PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)	75		
II.2.1)	Présentation générale de la méthode			
11.2.2)	Méthode d'analyse			
II.3) MES	URE DE LA TURBULENCE PAR LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)			
II.3.1)	Présentation générale de la méthode			
11.3.2)	Méthode d'analyse	80		
II.3.3.1)	Présentation de la méthode			
II.3.3.2)	Choix de l'intervalle de temps $\Delta t$			
II.4) Ети	DE PRELIMINAIRE : INFLUENCE DE LA TAILLE DE LA ZONE D'ETUDE SUR LES RESULTATS PIV			
II.4.1)	Contexte de l'étude			
11.4.2)	Présentation des essais	83		
II.4.3)	Résultats obtenus			
II.4.3.1)	Convergence de l'intensité de la turbulence	85		
II.4.3.2)	Evolution de la turbulence			
II.4.3.3)	Comparaison des données de PIV aux données LDA			
11.4.4)	Conclusions de l'étude			
III) RESULTA	ΓS			
III.1) LA M	IISE EN SUSPENSION DES PARTICULES			
III.2) Etui	DE DE LA CONCENTRATION (DIFFUSION DE MIE)			
III.2.1)	Présentation des essais			
<i>III.2.2)</i>	Evolution de la concentraton lors d'un essai			
III.2.3)	Etude de l'homogénéité avec différentes concentrations			
<i>III.2.4)</i>	Intervalle de concentrations d'utilisation de cette méthode	100		
III.2.5)	Etude de la concentration avec une autre configuration d'injection	102		
II.2.5) Coi	nclusions	103		
III.3) Etui	DE DE L'EVOLUTION DE LA TURBULENCE			
III.3.1)	Essais réalisés			
III.3.2)	Résultast obtenus			
III.3.2.1) Résultats de turbulence par PIV				
III.3.2.2	) Résultats de turbulence par LDA			
III.3.3)	Conclusions	109		
III.3.4)	Utilisation de l'aluminium comme traceur de l'écoulement			

NCLUSIONS DE LA PARTIE B 112
------------------------------

## INTRODUCTION

L'étude expérimentale des explosions de poussières nécessite dans un premier temps la mise en suspension des particules combustibles. Cette mise en suspension est un point primordial de l'étude puisque cette dernière influence grandement le phénomène de propagation de la flamme dans la suspension formée. Dans cette partie, un prototype spécialement élaboré pour permettre une telle suspension est décrit. Ce prototype, ainsi que le système de mise en suspension de la poudre, est conçu en vue d'une utilisation pour l'étude de la propagation de la flamme présentée dans la suite de ce manuscrit. Dans cette partie, la poudre utilisée lors de toute cette étude est également présentée.

L'évolution de la suspension formée est par la suite étudiée à l'aide de différentes méthodes optiques. Deux informations importantes sont étudiées : la concentration en poussières et le niveau de turbulence de la suspension. Pour l'étude de la concentration, la quantité de poussière injectée est importante afin d'obtenir une information sur la concentration globale dans l'enceinte. Cependant, il est aussi important de s'assurer de l'homogénéité de la suspension formée. En effet, de forts gradients de concentration pourraient modifier la physique de propagation du front de flamme par la suite. L'étude de ce degré d'homogénéité est réalisée à l'aide de la méthode de diffusion de la lumière de Mie par les particules, présentée dans la suite de cette partie.

Le niveau de turbulence, comme nous l'avons déjà remarqué dans la partie A, influe grandement sur le phénomène d'explosion, notamment sur la surpression maximale et la vitesse de montée en pression. Dans cette partie, l'étude de l'évolution du niveau de turbulence au sein de l'enceinte est aussi exposée. Cette étude s'appuie sur deux méthodes optiques complémentaires : la PIV (Particle Image Velocimetry) et le LDA (Laser Doppler Anemometry). La décroissance de la turbulence est ainsi obtenue selon plusieurs configurations d'injection de la poudre.

Finalement, cette étude permet de choisir les paramètres d'injection et d'inflammation utilisés pour les tests de propagation présentés dans la partie C. En effet, l'étude de la concentration permet de connaître l'intervalle de temps pendant lequel la suspension est globalement homogène. L'étude de la turbulence permet quant à elle de déterminer le niveau de turbulence au moment de l'ignition. Différents délais d'ignition permettent ainsi d'obtenir différents niveaux de turbulence initiale. L'influence de ce paramètre sur la propagation de la flamme pourra ainsi être étudiée par la suite (partie C).

#### I) MATERIEL

Dans cette partie, le matériel utilisé au cours de ces travaux est présenté. Tout d'abord, l'analyse de la poudre utilisée lors des essais est exposée. Ensuite, la configuration des essais permettant l'étude de la mise en suspension de la poudre est décrite : ici, le prototype, ainsi que le système permettant la mise en suspension des particules, est exposé. Un point est aussi effectué concernant les différentes mesures physiques effectuées lors de ces essais.

#### I.1) LA POUDRE ETUDIEE

Lors du démantèlement d'installations nucléaires les nuages potentiellement rencontrés sont constitués de métaux : il a donc été décidé de réaliser des expériences avec une poudre métallique (ici l'aluminium). La poudre étudiée est fournie généreusement par la société Poudres Hermillon, les analyses menées par ce fournisseur indiquant une pureté supérieure à 99,8%. Cette poudre est étudiée selon deux techniques afin d'en connaître la distribution granulométrique, la forme globale ainsi que la composition chimique : la granulométrie laser et la microscopie électronique à balayage.

#### I.1.1) ETUDE PAR GRANULOMETRE LASER

Bien que la distribution granulométrique nous soit renseignée par cette entreprise, nous avons décidé de la mesurer au sein de notre laboratoire. Pour cela, un granulomètre laser LS13320 Multi-Wave fabriqué par la compagnie Beckman Coulter est utilisé. Cette étude permet ainsi de comparer nos résultats avec ceux donnés par le fournisseur : voir Tableau 2. Deux poudres sont présentées et notées poudre A et poudre B. Ces deux poudres ont la même référence fournisseur mais ont été livré en deux temps. Ainsi, chacun de ces deux lots a été étudié séparément afin d'observer les différences potentielles entre ces deux derniers. La mesure a été effectuée par voie sèche (dans l'air) afin de se rapprocher de nos conditions expérimentales.

La distribution détaillée de la granulométrie est représentée sur la Figure 42. Les distributions granulométriques des deux poudres sont proches et centrées autour du diamètre moyen. Le diamètre  $d_x$  correspond au diamètre pour lequel x % des particules ont un diamètre inférieur à  $d_x$ . Le diamètre  $d_{50}$  correspond donc au diamètre médian, puisque 50% des particules ont un diamètre inférieur à celui-ci. Les données de ces différents diamètres obtenues avec les deux échantillons étudiés, ainsi que celles fournies par le fournisseur, sont résumées dans le Tableau 2. Le diamètre médian obtenu est de l'ordre de 6-7µm pour chacun des échantillons. Ce diamètre correspond bien à la définition de la poussière présentée dans la partie A.

Par la suite, le diamètre de Sauter, noté  $D_{32}$ , lié au rapport volume/surface, est calculé. Ce diamètre représente le diamètre d'une particule ayant le même rapport volume/surface que la moyenne sur l'intégralité de la distribution. Ce rapport est fréquemment utilisé car il est important dans la phénoménologie des explosions de poussières : en effet, un rapport surface/volume élevé entraîne une plus grande réactivité de la poudre. Ce diamètre se calcule avec la formule suivante, en prenant p=3 et q=2 :

$$D_{pq} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} N_i . D_i^{\ p}}{\sum_{i=1}^{N} N_i . D_i^{\ q}}\right)^{\frac{1}{(p-q)}}$$
(B1-1)

Où Di est le diamètre considéré et Ni le nombre de particules de diamètre Di. Le résultat de ce diamètre pour chacun de nos échantillons est aussi indiqué dans le Tableau 2 : un diamètre de 5µm est obtenu pour chacun de ces échantillons.

Diamètre (µm)	<i>d</i> <sub>10</sub>	$d_{50}$	<i>d</i> <sub>90</sub>	<b>D</b> <sub>32</sub>
Fournisseur	4,0	6,5	10,5	-
Poudre A	4,0	7,5	12,7	4,7
Poudre B	3,4	6,7	12,2	5,6





Figure 42: Distribution granulométrique de la poudre étudiée

#### I.1.2) ETUDE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

La poudre est aussi analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) environnemental et haute résolution Quanta 200 Feg produit par FEI Company. Comme précédemment, les deux poudres, correspondant à deux lots livrés à différents moments lors de ce travail, ont été étudiées.

Le MEB permet, tout d'abord, d'obtenir des résultats sur la morphologie des particules présentes dans l'échantillon. Les images obtenues au grandissement 2500x pour chaque poudre sont représentées sur la Figure 43. Des particules de tailles très différentes sont observées. Quelques grosses particules agglomérées sont aussi visibles. La forme des différentes particules est globalement sphérique, avec un aspect de surface plutôt lisse a priori. La Figure 44 expose les images obtenues avec le grandissement 40000x permettant ainsi d'observer plus précisément l'aspect de surface des particules. La poudre B (à droite) présente un aspect de surface plus lisse. En effet, pour la poudre A (à gauche), des filaments semblent être déposés sur la particule observée. Ces filaments pourraient a priori être associés à l'oxydation de

l'aluminium exposé à l'air : ces filaments représentant alors de l'alumine déposée en surface. En effet, la poudre A a été reçue avant la poudre B : ainsi au moment de cette analyse cette poudre a pu être plus oxydée que la poudre B.



Figure 43: Images de la poudre d'aluminium étudiée (grandissement 2500x)obtenues par MEB: poudre A (à gauche) et poudre B (à droite)



Figure 44: Images de la poudre d'aluminium étudiée (40000x)obtenues par MEB: poudre A (à gauche) et poudre B (à droite)

Afin de vérifier cette hypothèse, et de vérifier la pureté de la poudre étudiée, un autre type d'analyse a été effectué avec ce MEB, permettant d'obtenir des données sur la composition chimique de l'échantillon. En effet, le MEB permet aussi d'obtenir des informations sur les éléments chimiques constituant la poudre étudiée. Un résultat de cette analyse est représenté sur la Figure 45, chaque pic étant caractéristique d'un élément chimique. Pour l'exemple présenté, l'échantillon étudié se compose à 93.9% massique d'aluminium. Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le Tableau 3. Ces résultats montrent une oxydation légèrement plus importante pour la poudre A.



Figure 45: Résultats d'une analyse chimique effectuée par le MEB

Echantillon	Poudre A	Poudre B
Al (% masse)	94.2	95.5
C (% masse)	3	2.5
0 (% masse)	2.7	1.9

#### I.2) MISE EN PLACE EXPERIMENTALE

#### I.2.1) LE PROTOTYPE ELABORE

Un prototype a été spécialement élaboré pour réaliser cette étude. Tout d'abord, ce prototype nous a permis d'étudier la mise en suspension de la poudre. Par la suite, comme nous le verrons, ce prototype a été légèrement modifié afin de permettre l'étude de la propagation du front de flamme.

Ce prototype est une enceinte d'une hauteur de 70cm à base carrée de dimension 15cm x 15cm : soit un volume d'environ 16L. Un tel prototype (tube à base carrée) est utilisé car cette étude porte sur la visualisation du phénomène de propagation de la flamme dans une enceinte à pression constante, afin de simplifier une modélisation numérique des phénomènes observés. Or l'utilisation d'une sphère fermée entraîne une augmentation de pression pouvant perturber la propagation du front de flamme. Les phénomènes étudiés (mise en suspension de la poudre et propagation du front de flamme) sont fortement influencés par la gravité : ainsi, un prototype vertical a été préféré pour des raisons de symétrie face au phénomène de gravité.

Pour toute cette partie de l'étude, portant sur la mise en suspension de la poudre, le prototype est fermé. Cependant, le sommet du prototype est muni d'une membrane déformable, appelée « disque de rupture ». L'intérêt de cette membrane sera explicité dans la partie portant sur l'étude de la propagation du front de flamme. Lors de la mise en suspension de la poudre cette membrane va alors se déformer (en gonflant) comme nous le verrons par la suite. Le volume total de l'enceinte à la fin du processus de mise en suspension est déterminé par une mesure indirecte : les détails sont présentés dans la partie III.1).

Les parois latérales de cette enceinte sont en verre (épaisseur : 10 mm) afin de permettre l'utilisation des méthodes optiques présentées par la suite. Un châssis métallique, supportant les faces en verre, a dû être construit : il a été conçu afin de maximiser les accès optiques sur chaque face. L'embase du prototype, permettant la mise en place du système de mise en suspension présenté par la suite, représente une zone sans accès optique. Cette embase est d'une hauteur de 4 cm.

Ce prototype est schématisé sur la Figure 46.

#### I.2.2) LE SYSTEME D'INJECTION DE LA POUSSIERE

La mise en suspension des particules est réalisée par décharge d'un réservoir d'air comprimé au travers de tubes d'injection. Les tubes d'injection sont des tubes de cuivre de diamètre intérieur 7 mm, avec des trous positionnés le long de ce dernier permettant ainsi à la poudre d'être expulsée en direction du centre de l'enceinte sur toute la hauteur du prototype. Un essai se déroule comme suit : la poudre est initialement placée dans un « réservoir ». Les réservoirs d'air comprimé sont pressurisés à la pression voulue. Par la suite les électrovannes sont ouvertes pendant une durée fixée au préalable, entrainant ainsi la mise en suspension des particules au sein du prototype, après passage dans les tubes d'injection.

Les tubes d'injection sont élaborés afin d'obtenir un mélange homogène sur toute la hauteur du prototype. De nombreux tubes ont été conçus et testés afin d'améliorer cette homogénéité. Le choix final s'est porté sur 4 tubes d'injection positionnés dans les angles de l'enceinte, afin de limiter la perte d'accès optiques et maximiser l'homogénéité de la concentration. Deux cannes permettent l'injection de poudre sur la moitié inférieure du prototype. Pour cela, ces tubes présentent des trous uniquement sur leur moitié inférieure et sont pleins sur leur moitié supérieure. Les deux autres cannes, disposant uniquement de trous sur leur moitié supérieure permettent l'injection de poudre dans cette partie du prototype. Chaque canne présente 33 orifices de 2 mm de diamètre orientés vers le centre de l'enceinte, chacun de ces orifices étant espacés de 1 cm. Les tubes d'injection sont connectés deux à deux à une électrovanne et un réservoir d'air comprimé de 1,1 L.

Un tube de prémélange est utilisé afin de réaliser un premier mélange entre la poussière et l'air avant l'injection dans le prototype. Ce prémélange permet d'éviter d'injecter toute la poussière préférentiellement au travers des trous situés sur la partie supérieure de chaque tube d'injection. Le réservoir de poussières est un tube de 7 mm de diamètre interne. Une augmentation progressive du diamètre est effectuée jusqu'au tube de prémélange (diamètre interne : 25 mm). Le diamètre des tubes de cuivre diminue alors progressivement jusqu'au diamètre des tubes d'injection (diamètre interne : 7 mm).

La concentration en particules est déterminée en pesant la poudre présente à l'intérieur du réservoir de poussières et du tube de prémélange avant et après chaque essai.

Dans la suite de cette partie, sauf mention contraire, l'origine des temps (t = 0s) correspondra à la fermeture des électrovannes (fin de l'injection des particules).



Figure 46: Schéma du prototype élaboré

#### I.2.3) LES MESURES PHYSIQUES

Pour chaque essai, afin d'estimer le volume de la membrane déformable, plusieurs capteurs sont utilisés. Deux capteurs permettent la mesure de la pression et de la température au sein des réservoirs pressurisés. Le capteur de température est un thermocouple de type T de 1mm de diamètre. Le capteur de pression est un capteur à membrane dont la pression maximale est 40 bar absolu, le signal de sortie variant de 4 à 20 mA. Un autre thermocouple, du même type que le précédent, permet la mesure de la température au sein de l'enceinte. La méthode permettant de déterminer le volume total de l'enceinte à la fin du processus de dispersion sera explicitée dans la partie III.1).

Un autre capteur permet de contrôler les variations de pression à haute fréquence au sein du prototype. Il permet d'une part de contrôler que la pression reste constante (égale à la pression atmosphérique) lors d'essais sans rupture de la membrane, et d'autre part de mesurer la résistance à la pression de cette dernière. Ce capteur est un capteur piézoélectrique PCB dont la sensibilité est de 6 849,3mbar/V. La fréquence d'acquisition pour cette mesure est fixée à 200 kHz.

# II) METHODES OPTIQUES UTILISEES

Comme expliqué dans la partie A, l'étude expérimentale des explosions de poussières nécessite la mise en suspension de la poudre avant ignition. Cette mise en suspension a une influence directe sur la propagation de la flamme. Ainsi, il est important de caractériser la suspension au moment de l'ignition : cette partie présente les méthodes mises en place afin de réaliser cette caractérisation. La première partie traite de la méthode permettant de contrôler et de quantifier l'homogénéité en termes de concentration du nuage. Ensuite, deux méthodes permettant l'analyse de la turbulence au sein de l'écoulement sont présentées : la Particle Image Velocimetry (PIV), puis la Laser Doppler Anemometry (LDA). Enfin, une étude préliminaire aborde l'influence de la taille de la zone d'étude sur les données de turbulence obtenues. Ces résultats obtenus par PIV sont aussi comparés à ceux obtenus par LDA.

### II.1) MESURE DE LA CONCENTRATION PAR DIFFUSION DE MIE

Dans cette partie, la méthode d'étude de la concentration par la diffusion de Mie sera abordée, le but étant la caractérisation de l'homogénéité du mélange au moment de l'ignition. Tout d'abord, le principe général de la méthode est présenté. Ensuite, la méthode permettant d'analyser les images obtenues est expliquée, afin d'étudier le degré d'homogénéité.

#### II.1.1) PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE

Cette méthode est basée sur le principe de la diffusion de la lumière par les particules présentes dans l'écoulement lorsqu'elles sont illuminées par une source lumineuse. L'intensité de la lumière diffusée est alors proportionnelle au nombre de particules diffusant la lumière. Le principe de la mesure est le suivant : une source lumineuse, généralement un laser, illumine un plan de l'écoulement (nappe laser). Les particules présentes dans ce plan vont alors diffuser la lumière dans toutes les directions de l'espace, donc aussi en direction d'une caméra placée à 90° de la nappe laser. La Figure 47 illustre le principe de cette technique.



Figure 47: Schéma du principe de l'étude de la concentration par diffusion de Mie

Sur les images obtenues les niveaux de gris sont liés au nombre de particules présentes dans chaque partie du plan lumineux. Les zones claires correspondent à des zones de forte concentration, et les zones sombres à des zones faiblement concentrées. Cette méthode permet donc d'obtenir le degré d'homogénéité de la suspension formée dans un plan de l'écoulement. Elle présente une plus grande résolution spatiale que lors de mesures effectuées localement. De plus, cette mesure n'est pas intrusive puisque les particules utilisées pour diffuser la nappe laser sont les particules d'aluminium étudiées. L'écoulement n'est donc pas perturbé, contrairement au cas où des sondes sont installées au sein du prototype. Cependant, il est important de noter
que dans cette étude cette technique ne permet pas d'obtenir la valeur locale de la concentration en particules. Cette méthode permet d'obtenir le degré d'homogénéité local de la suspension, c'est-à-dire une valeur locale de la concentration comparée à la valeur moyenne dans le plan de l'écoulement.

#### II.1.2) METHODE D'ANALYSE

A partir des images obtenues, un traitement est nécessaire afin d'obtenir le degré d'homogénéité local. Ce traitement, permettant de faire le lien entre l'intensité lumineuse de chaque image et cette homogénéité, est présenté dans cette partie. Il se décompose en trois étapes, illustrées sur la Figure 48.



Figure 48: Explication de la méthode d'analyse des images obtenues par diffusion de Mie

La première étape consiste à corriger les phénomènes dus à la nappe laser et au bruit de fond. Lorsque le laser est allumé, même en l'absence de particules au sein du prototype, certaines parties de la zone d'étude peuvent être plus lumineuses, notamment à cause de réflexions parasites. Une première correction est donc nécessaire à partir d'une image obtenue avec le laser allumé et aucune particule injectée, notée  $I_0$  (Figure 49 gauche). De plus, la répartition de la puissance du laser n'est pas homogène au sein de la nappe formée. En effet, même en présence d'une suspension homogène, la partie centrale de la zone d'étude sera plus lumineuse que les parties situées aux extrémités. Une seconde correction est alors effectuée à partir d'une image obtenue avec le laser allumé et une suspension homogène au sein du prototype, notée  $I_{bg}$  (Figure 49 droite). Cette suspension homogène a été obtenue à l'aide d'un générateur injectant de la fumée dans l'enceinte. L'image brute initialement obtenue lors d'un essai de mise en suspension, notée I, est alors corrigée selon l'équation suivante:

$$I_2 = \frac{I - I_0}{I_{bg}} \tag{B2-1}$$

Avec *I*<sup>2</sup> la matrice de niveaux de gris de l'image corrigée



Figure 49: Images  $I_0$  (à gauche) et  $I_{bg}$  (à droite) utilisées pour l'analyse de la concentration

La seconde étape prend en compte l'atténuation de la nappe laser par les particules. Cette atténuation suit la loi de Beer-Lambert :

$$I_{corr}(x, y) = I_{laser} e^{-K.d}$$
(B2-2)

Avec  $I_{laser}$  l'intensité du laser incident, d la longueur de propagation au sein de la suspension jusqu'au point (x, y) considéré, K le coefficient d'atténuation par unité de longueur (dépendant de la concentration en particules) et  $I_{corr}(x, y)$  l'intensité lumineuse corrigée au point (x, y)considéré. Le coefficient d'atténuation K doit être déterminé, pour chaque concentration, avant de prendre en compte cette correction sur les images obtenues. Pour cela, une image moyenne est calculée à partir de toutes les images obtenues lors des tests réalisés avec une même concentration. Les images utilisées pour le calcul de l'image moyenne sont les images obtenues après correction (les images notées  $I_2$ ). Un point à prendre en compte : le générateur de nappe utilisé forme une nappe divergente. Il faut prendre en compte ce phénomène dans la relation de Beer-Lambert. Pour cela, pour chaque pixel de l'image moyenne, la longueur de propagation du laser au sein du prototype est déterminée d(x, y). La Figure 50 schématise la nappe divergente avec les notations employées dans cette partie de l'étude. Le coefficient K est alors déterminé à partir de la régression linéaire de la forme :

$$\ln\left(\frac{I_2}{I_{réf}}\right) = -K.d$$
(B2-3)

Avec  $I_{réf}$  l'intensité lumineuse au point de référence. Le point de référence est la coordonnée du point d'entrée dans le prototype du faisceau laser, correspondant au point considéré. A partir de la détermination pour chaque concentration étudiée de ce coefficient K, l'intensité lumineuse est corrigée pour chaque image afin d'obtenir une nouvelle image corrigée, notée  $I_3$ , selon la formule de Beer-Lambert (équation (B2-2)).



Figure 50: Schéma de la nappe divergente avec les notations explicitées

Les images corrigées  $I_3$  obtenues représentent alors des niveaux de gris corrigés. La dernière étape consiste à les normaliser afin d'avoir une donnée sur le degré d'homogénéité de la suspension. Pour cela, pour chaque image, la valeur moyenne (moyenne spatiale) est déterminée, notée  $\overline{I_3}$ . Ensuite, la valeur de l'intensité corrigée en chaque point de l'image est divisée par cette valeur moyenne. L'image résultante (notée  $I_{finale}$ ) est alors une cartographie de l'homogénéité locale en termes de concentration. Les pixels ayant une valeur supérieure à 1 correspondent à des zones de fortes concentrations, et ceux inférieurs à 1 à des zones de faible concentration. Dans le cas d'une homogénéité parfaite, tous les pixels auraient une valeur de 1. Un exemple d'images obtenues avant traitement (I) et après traitement ( $I_{finale}$ ) est présenté sur la Figure 51.



Figure 51: Exemples d'images obtenues avant (à gauche) et après (à droite) analyse

# II.2) MESURE DE LA TURBULENCE PAR PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV)

Dans cette partie, une première technique permettant de mesurer la turbulence est présentée : la PIV (Particle Image Velocimetry). Dans un premier temps, le principe de cette technique sera abordé. Puis, la méthode permettant d'analyser les images obtenues, afin d'obtenir des données sur la turbulence de l'écoulement, sera expliquée.

#### **II.2.1) PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE**

La technique PIV est une mesure non intrusive de la vitesse d'un écoulement. Cette technique permet d'obtenir des cartes 2D de la vitesse de l'écoulement. Pour cela, le déplacement des particules pendant une période donnée est déterminé. La mise en place de la PIV nécessite d'avoir un écoulement ensemencé : ceci est une limite au caractère non intrusif de cette technique. Cet écoulement est alors éclairé par une source lumineuse, généralement par une nappe laser. Le mouvement des particules est alors enregistré par une caméra. Ce montage est donc proche de celui utilisé pour l'étude de la concentration de Mie. Cependant, dans le cas de la PIV, l'exploitation des résultats porte sur la détermination du mouvement des particules entre deux images. Pour obtenir les vecteurs vitesse entre deux images successives, ces dernières sont découpées en fenêtres d'interrogation. Les fenêtres d'interrogation sont alors comparées entre ces deux images. Pour chaque fenêtre, le déplacement le plus probable des particules au sein de cette dernière est estimé à l'aide d'un calcul d'intercorrélation spatiale. La vitesse est alors obtenue en divisant ce déplacement par le délai entre deux images. Tout ce traitement est réalisé à l'aide du logiciel DynamicStudio élaboré par la compagnie Dantec Dynamics. Le principe de la mesure puis de l'analyse par ce logiciel est schématisé sur la Figure 52 issu du site de Dantec Dynamics. Ce logiciel permet d'utiliser une méthode de PIV adaptative pour obtenir les cartes de vecteurs vitesse. Cette méthode adapte la taille et la forme des fenêtres d'interrogation en fonction de l'ensemencement local et des gradients de vitesse présents dans l'écoulement. Dans nos analyses, l'algorithme de PIV adaptative peut faire varier la taille des fenêtres d'interrogation de 8 à 32 pixels.



Figure 52: Schéma de principe de la PIV (extrait de www.dantecdynamics.com)

Deux principaux paramètres sont à choisir pour effectuer le traitement PIV : le temps entre deux images et la taille de la fenêtre d'interrogation. Ces deux paramètres sont liés entre eux et dépendent des caractéristiques de l'écoulement à étudier. La taille de la fenêtre d'interrogation fixe la résolution spatiale des cartes 2D de vitesse obtenues après traitement, un vecteur étant déterminé par fenêtre d'interrogation. Le déplacement des particules entre deux images doit être inférieur à ¼ de la fenêtre d'interrogation : ceci est une règle généralement utilisée afin d'obtenir des vecteurs vitesse valides. Deux types de méthodes sont généralement envisageables afin d'obtenir un délai donné entre deux images : soit utiliser un laser continu couplé à une caméra rapide (délai entre images fixé par la fréquence d'acquisition de la caméra), soit utiliser une caméra moins rapide couplé à un laser pulsé (délai entre images fixé par le temps entre les pulses laser). Dans le cas de l'utilisation d'un laser pulsé, une carte de vecteurs vitesse est obtenue pour chaque doublet d'images. Le fonctionnement de la caméra avec le laser pulsé est explicité sur la Figure 53. Un exemple d'image obtenue après l'analyse par le logiciel est présenté sur la Figure 54 : sur cette image, seul un vecteur sur quatre est affiché pour des raisons de visibilité.



Figure 53: Explication de l'acquisition d'images pour la PIV

L'avantage de cette technique est sa grande résolution spatiale, puisqu'une donnée de vitesse est obtenue pour chaque fenêtre d'interrogation. De plus, cette mesure n'est pas intrusive, les particules utilisées pour visualiser l'écoulement étant les particules d'aluminium de notre étude. Une limite apparait si la composante de la vitesse dans le plan perpendiculaire à la nappe laser est importante. Dans ce cas, il est possible que des particules sortent du plan laser entre deux images, rendant la détection du déplacement fausse.



Figure 54: Exemple d'image obtenue après analyse à l'aide du logiciel DynamicStudio (un vecteur sur quatre affiché)

#### II.2.2) METHODE D'ANALYSE

Cette méthode permet d'obtenir des cartes 2D de la vitesse de l'écoulement. Or, dans le cadre de notre étude, le niveau de la turbulence est le paramètre recherché. Il faut donc déterminer, à partir de ces données locales de vitesse, les données locales de la turbulence. Comme remarqué dans la partie A, il est nécessaire de définir une valeur moyenne de la vitesse afin de définir la turbulence. Une moyenne d'ensemble basée sur la répétition des essais a été choisie (Figure 55).

Pour chaque essai et pour chaque pas de temps, un vecteur vitesse est obtenu pour chaque fenêtre d'interrogation. Ce vecteur vitesse se décompose en deux composantes : une horizontale, notée u, et une verticale, notée v. Une moyenne d'ensemble sur les n essais réalisés dans les mêmes conditions expérimentales est alors effectuée pour chacune de ces deux composantes selon l'équation suivante :

$$\overline{u(x, y, t)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} u_i(x, y, t)$$
(B2-4)

Avec (x, y)les coordonnées du centre de la fenêtre d'interrogation étudiée,  $u_i$  la valeur de la vitesse dans la fenêtre considérée obtenue pour le test i et  $\bar{u}$  la valeur de la vitesse moyenne dans la fenêtre considérée. A partir de cette valeur moyenne, chaque fluctuation de vitesse (u' et v') est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$u'(x, y, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (u_i(x, y, t) - \overline{u(x, y, t)})^2$$
(B2-5)

L'intensité de la turbulence est alors obtenue avec l'équation :

$$I(x, y, t) = \sqrt{u'(x, y, t) + v'(x, y, t)}$$
(B2-6)



Figure 55: Explication de la méthode d'analyse utilisée en PIV

# II.3) MESURE DE LA TURBULENCE PAR LASER DOPPLER ANEMOMETRY (LDA)

Une deuxième technique optique permettant la détermination du niveau de turbulence d'un écoulement est à présent abordée : la Laser Doppler Anemometry (LDA)(Bachalo and Houser, 1984). Dans un premier temps, cette technique sera présentée : cette dernière permet de mesurer la vitesse des particules en un point de l'écoulement (faible volume d'interférences) avec un échantillonnage temporel élevé (jusqu'à plusieurs MHz). La méthode permettant l'analyse des données de vitesse obtenues afin d'obtenir des données de turbulence est par la suite explicitée.

#### **II.3.1) PRESENTATION GENERALE DE LA METHODE**

La Laser Doppler Anemometry (LDA) est une technique optique non intrusive permettant de déterminer la vitesse locale de particules au sein d'un écoulement. Cette technique est basée sur la diffusion de la lumière par les particules en mouvement lorsqu'elles sont éclairées par une source monochromatique. En effet, la fréquence de la lumière émise par la particule sera alors différente de la fréquence de la lumière qui l'a éclairée : cet effet est appelé « effet Doppler ». La différence entre ces deux fréquences est appelée « fréquence de décalage Doppler » et est directement liée à la vitesse de la particule, selon la formule suivante :

$$f_D = \frac{\vec{V}}{\lambda} (\vec{u_2} - \vec{u_1}) \tag{B2-7}$$

Avec  $f_D$  la fréquence de décalage Doppler,  $\vec{V}$  la vitesse de l'écoulement,  $\lambda$  la longueur d'onde de la lumière incidente,  $\vec{u_1}$  et  $\vec{u_2}$  la direction de propagation du faisceau incident et la direction d'observation respectivement.



Figure 56: Principe du LDA (Extrait de www.dantecdynamics.com)

Le montage généralement utilisé pour réaliser une telle mesure est représenté sur la Figure 56 : avec un tel dispositif une seule composante de la vitesse est obtenue. Tout d'abord, une cellule de Bragg est utilisée afin d'obtenir deux faisceaux de même intensité à partir d'une même source laser (zone 1 sur la Figure 56). L'optique de transmission permet alors de focaliser ces deux faisceaux en une même zone appelée volume de mesure (zone de croisement des deux faisceaux). La taille de la zone de mesure sera donc liée à la distance focale de l'optique de transmission choisie.

En se croisant, les deux faisceaux créent alors des franges d'interférences : alternance de franges lumineuses et sombres. L'évolution de l'intensité lumineuse au sein de ce volume de mesure est représentée sur le graphique (zone 2 sur la Figure 56). La distance interfranges (notée  $d_f$ ) est alors calculée à partir de la formule suivante :

$$d_f = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \tag{B2-8}$$

Avec  $\theta$  l'angle entre les deux faisceaux laser (dépendant de la distance focale de l'optique de transmission). Seule la composante de la vitesse perpendiculaire à ces franges d'interférence sera mesurée.

Les particules, utilisées pour ensemencer l'écoulement à étudier, diffusent cette lumière laser en traversant le volume de mesure. La partie de la lumière diffusée vers l'arrière est alors focalisée par l'optique de réception transmise au photodétecteur (zone 3 sur la Figure 56). Ce dernier produit alors un signal à la fréquence Doppler  $f_D$ . La vitesse est calculée selon l'équation suivante :

$$v = d_f \cdot f_D = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)} \cdot f_D \tag{B2-9}$$

Pour rappel, la cellule de Bragg est utilisée pour obtenir deux faisceaux de même intensité à partir d'une même source laser. De plus, cette cellule permet un décalage fréquentiel entre ces deux faisceaux. Ce décalage en fréquence permet de distinguer les vitesses négatives et positives, la Figure 57 schématisant la détermination du signe de la vitesse à l'aide de ce décalage fréquentiel. Sur le graphique de gauche, sans l'utilisation de la cellule de Bragg (pas de décalage fréquentiel entre les lasers), une vitesse nulle correspond à une fréquence Doppler nulle. La même fréquence Doppler sera mesurée pour deux particules se propageant à la même vitesse mais selon deux directions opposées. La détermination d'une cellule de Bragg (graphique de droite), une vitesse nulle correspondra à une fréquence Doppler égale au décalage fréquentiel entre les deux faisceaux (noté  $f_{shift}$ ). Une particule se propageant dans la direction positive aura alors une fréquence Doppler supérieure à  $f_{shift}$ , alors qu'une particule se propageant dans la direction négative aura une fréquence Doppler inférieure à cette valeur. Ainsi, le signe de la vitesse, donc la direction de propagation, est déterminé.

Pour obtenir les autres composantes de la vitesse, d'autres faisceaux, issus d'une autre source laser, doivent être utilisés afin de créer des franges d'interférences selon d'autres directions : la composante de la vitesse mesurée étant perpendiculaire aux franges d'interférence.



Figure 57: Explication de la détermination du signe de la vitesse : sans (à gauche) et avec (à droite) cellule de Bragg

### II.3.2) METHODE D'ANALYSE

#### **II.3.3.1) PRESENTATION DE LA METHODE**

Les mesures par LDA permettent d'accéder à l'évolution de la vitesse instantanée en un point de l'écoulement (faible volume d'interférence). Comme nous l'avons déjà remarqué, afin d'obtenir des données de turbulence une moyenne doit être définie. Dans le cas de mesures par LDA, la moyenne la plus appropriée est la moyenne temporelle. Comme nous le verrons par la suite, notre écoulement présente un écoulement moyen globalement nul. Il a donc été choisi d'utiliser une moyenne nulle pour l'évaluation de la turbulence. A partir de cette moyenne nulle et des données de vitesses instantanées obtenues lors de chaque essai, l'intensité de la turbulence peut alors être évaluée selon la méthode présentée par la suite. Cette méthode est inspirée de la méthode utilisée par (Bozier, 2004) dans ses travaux de thèse. Une moyenne temporelle va être utilisée afin d'obtenir des données de la turbulence moyennées sur des intervalles de temps de taille  $\Delta t$ . L'utilisation de cette moyenne temporelle, couplée à la moyenne d'ensemble issue des différents tests effectués permet ainsi de limiter le nombre d'essais à effectuer. Le principe de cette méthode est schématisé sur la Figure 58.

La méthode d'analyse est la suivante. Tout d'abord, pour chaque essai et pour chacune des deux composantes de la vitesse, la fluctuation de vitesse associée, u' ou v', est calculée pour chaque intervalle de temps de longueur  $\Delta t$ : ceci correspond à une moyenne temporelle. La fluctuation de vitesse u' est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$u'_{e}(t) = \frac{1}{N_{p,e}(t)} \sum_{i=1}^{N_{p,e}(t)} u_{e}(t_{i})^{2}$$
(B2-1)

Avec  $N_{p,e}(t)$  le nombre de particules détectées lors de l'essai e pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  autour de l'instant t étudié,  $u_e(t_i)$  la vitesse de la particule lors de l'essai e au temps  $t_i$  (valeur prise en compte si elle est comprise dans l'intervalle de temps  $\Delta t$  autour de t), et  $u'_e$  la fluctuation de vitesse obtenue à partir de l'essai e.

Ensuite, pour chacun de ces intervalles de temps de longueur  $\Delta t$ , la moyenne des fluctuations de vitesse obtenues pour chacun des essais réalisés est calculée : ceci correspond à une moyenne d'ensemble.

$$u'(t) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} u'_e(t)$$
(B2-2)

Avec  $N_e$  le nombre d'essais étudiés, et u' la fluctuation de vitesse d'ensemble obtenue à partir des  $N_e$  essais.

Enfin, à partir des fluctuations de vitesse correspondant aux deux composantes de la vitesse, l'intensité de la turbulente peut être estimée par la même formule que celle utilisée par PIV :

$$I(t) = \sqrt{u'(t) + v'(t)}$$
(B2-3)

Figure 58: Schéma d'explication de la méthode d'analyse des données LDA

Δt

#### II.3.3.2) CHOIX DE L'INTERVALLE DE TEMPS $\Delta T$

Un paramètre important dans cette méthode de détermination de l'intensité de la turbulence à partir de données obtenues par LDA est la taille de l'intervalle de temps utilisé pour le calcul de la moyenne temporelle, noté  $\Delta t$ . En effet, un trop faible intervalle de temps surestimerait l'intensité de la turbulence en considérant chaque variation comme étant directement de la turbulence. De plus, dans ce cas, de fortes variations de la turbulence au cours du temps seraient observées. Au contraire, un intervalle de temps trop important entrainerait une sous-estimation de la turbulence et atténuerait les variations temporelles de cette dernière.

Afin d'évaluer une longueur d'intervalle cohérente avec le phénomène étudié, une analyse par transformée de Fourier du signal obtenu par LDA a été envisagée. Cependant, les données obtenues par LDA ne sont pas équi-réparties dans le temps. En effet, une mesure est effectuée à chaque passage de particules dans le volume d'interférence. Ainsi, une première étape a consisté à ré-échantillonner les données obtenues. A partir de ces données rééchantillonnées l'analyse par transformée de Fourier est alors effectuée. La Figure 59 représente la transformée de Fourier du signal obtenue. L'amplitude atteint un premier minium pour une fréquence de 13Hz environ, correspondant ainsi à un intervalle de temps de 77ms. Ainsi, pour la suite, un intervalle de temps  $\Delta t$  de 80ms sera utilisé pour analyser les données obtenues par LDA.



Figure 59: Transformée de Fourier du signal LDA

# II.4) ETUDE PRELIMINAIRE : INFLUENCE DE LA TAILLE DE LA ZONE D'ETUDE SUR LES RESULTATS PIV

# II.4.1) CONTEXTE DE L'ETUDE

Pour réaliser des mesures de turbulence par PIV, un paramètre important est la taille de la zone d'étude. La PIV « grande échelle », c'est-à-dire dans notre cas en visualisant l'écoulement sur toute la hauteur du prototype, semble a priori présenter des avantages. En effet, avec une telle mesure, il est possible d'obtenir la vitesse de l'écoulement sur toute la hauteur du prototype. La vitesse en différents points de l'écoulement espacés spatialement peut être comparée. Cependant, une telle mesure ne permet pas d'accéder à la turbulence, c'est-à-dire aux structures tourbillonnaires porteuses de l'énergie cinétique. Cette méthode permet seulement d'étudier les mouvements d'ensemble au sein du fluide : ceci est intéressant pour étudier certains écoulements à grande échelle mais pas dans notre cas pour étudier l'évolution de la turbulence.

Devant ce constat, la question suivante s'est posée : quelle taille de zone de mesure est la plus appropriée pour l'étude de la turbulence au sein de notre écoulement ? De cette taille va en effet dépendre la taille des structures tourbillonnaires accessibles par la mesure PIV. Pour être plus précis, la plage des structures tourbillonnaires identifiables sera liée à la taille de la zone de mesure mais aussi à la résolution spatiale de la mesure. Cette résolution spatiale est elle-même liée à la taille de la fenêtre d'interrogation choisie dans l'algorithme de PIV. Ce lien entre la taille de la zone d'étude et les échelles des structures tourbillonnaires verticales rouges représentent des barrières infranchissables dans la détection des tourbillons de l'écoulement : la première est liée à taille de la zone de mesure, la seconde étant liée à la taille des fenêtres d'interrogation. Ainsi,

en modifiant la taille de la zone de mesure, la plage des structures identifiables est modifiée. Une grande zone de mesure (PIV « grande échelle »), correspondant sur le graphique à un petit nombre d'onde  $\kappa$ , détectera seulement les grandes structures, l'écoulement d'ensemble. Au contraire, une petite zone de mesure permettra d'accéder aux structures de dissipation de l'énergie, et non pas aux structures de transfert de l'énergie.

Dans cette étude préliminaire, des essais ont été menés afin d'analyser l'influence de la taille de la zone de mesure sur les données de turbulence obtenues.



Figure 60: Lien entre la taille de la zone d'étude et les structures tourbillonnaires accessibles par PIV (adapté de(Galmiche, 2014) )

# II.4.2) PRESENTATION DES ESSAIS

Pour étudier l'influence de la zone de mesure sur les données de turbulence obtenues par PIV, des mesures PIV, avec différentes tailles de zone d'étude, ont été réalisées en simultanée sur de mêmes essais. Ainsi, les données de turbulence, obtenues après analyse de ces essais, sont ainsi comparables. La Figure 61 représente schématiquement les différentes mesures optiques réalisées au cours d'un même essai. Une même nappe laser, générée par un laser continu cohérent VERDI d'une puissance de 2W, permet à trois caméras de visualiser l'écoulement sur trois échelles différentes. Toutes ces différentes zones de mesure ont une zone commune afin de comparer les données de la turbulence à ce même endroit. De plus, une mesure par LDA est réalisée, pour chacun de ces mêmes essais, en un point situé au sein de ces zones de mesure PIV, afin de comparer les données obtenues avec ces deux méthodes optiques. Un total de 20 essais a été réalisé : comme nous le verrons par la suite, ce nombre d'essais est important pour le calcul des données de turbulence par moyenne d'ensemble.



Figure 61: schéma explicatif des mesures PIV multi-échelles et LDA en simultanée

Pour ces trois mesures PIV en simultané, en plus du laser continu, trois caméras rapides ont été nécessaires. Pour le champ le plus large d'étude, d'une taille de 10cmx10cm, une caméra Photron SA3, munie d'un objectif de focale fixe 105 mm, couplé à une optique permettant de doubler sa distance focale, a été utilisée. L'ouverture de l'objectif est fixée à f/2.8. La résolution de cette caméra est de 1024x1024 pixels, à la fréquence d'acquisition de 1 000 fps choisie. Le temps de pause a été fixé à 200 µs. La visualisation sur un champ plus resserré (5cmx7cm) est réalisée par une caméra Phantom V711, munie d'un objectif Tamron 70-300 mm, auquel est ajouté un doubleur de focale. L'ouverture de ce dernier est fixée à f/4. Avec la fréquence d'acquisition de 6 000 fps choisie, une résolution de 1280x800 pixels est obtenue. Le temps d'exposition de la caméra est fixé à 100 µs. Enfin, pour la zone la plus zoomée (2cmx3,5cm), un objectif Questar FR1MK3 a dû être utilisé. Il est monté sur une caméra Phantom V2512, disposant d'une résolution de 1280x800 pixels avec la fréquence d'acquisition de 18 000 fps voulue. Le temps d'exposition de cette caméra est fixé à 40 µs. Toutes les caractéristiques de ces caméras sont résumées dans le Tableau 4.

Pour les essais réalisés dans cette étude préliminaire, la masse insérée initialement dans chaque tube de dispersion est de 0,3g. La pression dans les réservoirs amont est fixée à 2,5 bars et la durée d'ouverture des électrovannes est de 0,8s. Cela correspond alors à une concentration moyenne en poussière de  $36g/m^3$  pour les test effectués. Cette masse injectée permet d'avoir un ensemencement correct pour chacune des zones de mesure étudiées.

Tableau 4: Synthèse des caractéristiques optiques des caméras utilisées
---

Caméra	Fréquence	Résolution	Temps	Objectif	Ouverture	Zone de
			d'exposition	(mm)*		mesure
V2512	18 000 fps	1280x800	40 µs	Questar FR1MK3		2cm x3,5cm
V711	5 000 fps	1280x800	100 µs	70-300 (x2)	f/4	5cmx7,5cm
SA3	1 000 fps	1024x1024	200 µs	105 (x2)	f/2,8	10cmx10cm

\* (x2) signifie l'utilisation d'un doubleur de focale

# II.4.3) RESULTATS OBTENUS

Les images obtenues lors d'un essai avec chacune des caméras sont représentées sur la Figure 62. Ces dernières correspondent aux images obtenues 0,4 s après la fin de l'injection. Sur

chacune de ces images, les rayons très lumineux correspondent au passage des lasers du LDA au sein de l'enceinte. Ces rayons pourront entraîner certains biais dans le calcul des vecteurs vitesse dans les fenêtres d'interrogation correspondantes.

Pour les images obtenues avec la caméra V25, correspondant au champ de vue le plus restreint (à droite sur la Figure 62), on observe une cercle sombre sur les contours de l'image. Ceci est dû au vignetting de l'objectif QUESTAR, permettant d'obtenir un tel zoom.

Les images obtenues par la caméra SA3, correspondant à la zone la plus étendue (à gauche sur la Figure 62), sont plus lumineuses dans leurs parties inférieures. En effet, la nappe laser est plus concentrée au niveau de la zone de mesure du LDA, afin d'obtenir une puissance laser suffisante pour les images obtenues avec le zoom le plus important.



Figure 62: Images obtenues 0,4 secondes après la fin de l'injection avec: le large (à gauche), l'intermédiaire (au milieu) et le restreint (à droite) champs de vue

Ces images ont par la suite été traitées avec le logiciel Dynamic Studio afin d'obtenir les cartes de vecteurs vitesse. Comme nous l'avons remarqué précédemment (partie II.2.1), un paramètre important dans les mesures PIV est le temps entre les deux images à analyser. Afin d'optimiser le pic d'intercorrélation calculé par le logiciel, il a été choisi de faire une analyse en ne prenant qu'une image sur deux pour les images obtenues sur le champ intermédiaire et sur le champ le plus restreint. Ainsi, le temps entre deux images pour le champ intermédiaire est de  $0,4\mu$ s, et il est de  $0,17\mu$ s pour le champ le plus restreint.

# II.4.3.1) CONVERGENCE DE L'INTENSITE DE LA TURBULENCE

L'estimation des données de la turbulence de notre écoulement nécessite le calcul de l'écoulement moyen. Comme nous l'avons précédemment remarqué, une moyenne d'ensemble, portant sur le nombre d'essais réalisés, semble la plus adaptée à notre écoulement. Le nombre d'essais réalisés aura ainsi une influence sur les statistiques de la turbulence calculées par la suite. Il a été choisi de réaliser 20 essais similaires afin d'effectuer les calculs de turbulence. Il est alors important a posteriori de vérifier si ce nombre d'essais semble suffisant : cela fait l'objet de cette sous-partie.



Figure 63: Convergence de la vitesse moyenne en fonction du nombre d'essais: pour le champ zoomé (a), le champ intermédiaire (b) et le champ large (c)

Le nombre d'essais intervient tout d'abord dans le calcul de l'écoulement moyen. Afin de savoir si cette valeur moyenne se stabilise à partir d'un certain nombre d'essais utilisés pour son calcul, la valeur moyenne de chaque composante a été calculée en modifiant le nombre d'essais utilisés. La Figure 63 représente l'évolution des composantes de la vitesse moyenne en fonction du nombre d'essais utilisés pour son calcul, ceci étant réalisé pour chacun des champs de vue. Les vitesses moyennes représentées ici ont été calculées par moyenne d'ensemble sur chaque fenêtre d'interrogation. Ensuite, une moyenne spatiale a été effectuée sur chaque image obtenue, afin d'obtenir une seule donnée de vitesse moyenne. On observe tout d'abord que les vitesses moyennes convergent vers une valeur nulle pour chacun des champs de vue : il n'y a ainsi pas de mouvement global d'ensemble au sein de l'écoulement. Les vitesses moyennes convergent pour chaque champ de vue, même si elles convergent plus rapidement, avec moins d'essais réalisés, dans le cas du champ le plus restreint.

A partir de ces vitesses moyennes, l'intensité de la turbulence peut alors être calculée. L'important est alors de vérifier si les valeurs de turbulence obtenues varient significativement en fonction du nombre d'essais, afin notamment de connaître le nombre d'essais minimum à effectuer pour avoir une faible influence de ce nombre. La Figure 64 représente l'évolution de l'intensité de la turbulence calculée en modifiant le nombre d'essais utilisés. Ces résultats correspondent au champ intermédiaire. Les différentes courbes correspondent aux résultats obtenus à différents temps après la fin de l'injection. L'intensité de la turbulence a été calculée pour chaque fenêtre d'interrogation. Par la suite, une moyenne spatiale sur toutes les fenêtres d'interrogation présentes sur l'image a été effectuée, afin d'obtenir une seule donnée d'intensité de la turbulence. Tout d'abord, on observe une convergence de l'intensité de la turbulence pour chaque pas de temps à partir d'environ 8 essais réalisés. De plus, on observe que l'intensité de la turbulence diminue avec le temps après la fin de l'injection : cela correspond à la décroissance de la turbulence induite par l'injection de poudre au sein de notre écoulement.



Figure 64: Evolution de la convergence de l'intensité de la turbulence en fonction du nombre d'essais avec plusieurs temps après l'injection obtenue avec le champ intermédiaire (temps entre chaque courbe: 200 ms)

#### II.4.3.2) EVOLUTION DE LA TURBULENCE

A partir des 20 essais effectués, l'intensité de la turbulence a pu être calculée pour chaque fenêtre d'interrogation. La Figure 65 représente les cartographies d'intensité de la turbulence obtenues pour chacun des champs de vue, pour trois temps après injection différents (0,2s, 0,6s et 1s). Le niveau de turbulence semble homogène spatialement pour chaque champ de vue à partir de 0,6 secondes après la fin de l'injection. Les zones en rouge sur les images obtenues pour le champ le plus zoomé correspondent aux zones de vignetting observées sur la Figure 62 (à droite), dues à l'utilisation de l'objectif QUESTAR. Les zones en bleues, notamment visibles sur les images de champ intermédiaire et restreint correspondent aux faisceaux laser du LDA.



Figure 65: Cartes de l'évolution de l'intensité de la turbulence au cours du temps pour chaque champ de vue: large (a), intermédiaire (b) et restreint (c)

Une décroissance du niveau de turbulence est observée pour chaque champ de vue après la fin de l'injection. Afin de quantifier cette décroissance de la turbulence, la moyenne spatiale, sur toutes les fenêtres d'interrogation, a été calculée. L'évolution de cette intensité de la turbulence moyenne est représentée sur la Figure 66 pour chaque zone de vue. Une décroissance du niveau de turbulence est bien observée pour chacune de ces zones.



Figure 66: Evolution de l'intensité de la turbulence moyenne pour chaque champ de vue

Sur cette figure, on observe une différence d'intensité de la turbulence moyenne calculée pour chacun des champs de vue étudiés. Plus le champ est zoomé, plus le niveau de turbulence moyen semble important. Le champ de vue large permet la quantification de la turbulence contenue seulement dans des tourbillons de taille plus importante que ceux pouvant être détectés par les deux autres caméras. Ainsi, il semble cohérent d'obtenir un niveau de turbulence plus élevé avec un champ de vue plus zoomé.

Sur la Figure 66, la moyenne spatiale du niveau de turbulence est représentée. Or cette moyenne est réalisée sur des zones physiques de grandeurs différentes : la zone utilisée pour le calcul de la moyenne spatiale étant plus étendue pour le champ large comparée à celle utilisée pour le champ zoomé. Une nouvelle moyenne spatiale a été étudiée en considérant de mêmes zones physiques pour chaque champ de vue : même emplacement et même taille de la zone d'étude. Ainsi, la seule différence entre les champs de vue réside dans la différence de la résolution spatiale des fenêtres d'interrogation étudiées. Il est important de noter qu'afin d'obtenir de mêmes zones de mesures physiques, le nombre de fenêtres d'interrogation utilisées pour chaque champ de vue est différent : le nombre de fenêtre d'interrogation étant alors plus important dans le cas du champ zoomé. La Figure 67 représente l'évolution de cette intensité de la turbulence avec la moyenne spatiale calculée sur une même zone pour chaque champ de vue.



Figure 67: Evolution de l'intensité de la turbulence moyenne pour chaque champ de vue avec la même zone d'étude

La décroissance du niveau de turbulence en fonction du temps après la fin de l'injection est une nouvelle fois observée pour chaque champ de vue. De plus, on observe que les niveaux d'intensité de la turbulence obtenus avec les champs de vue zoomé et intermédiaire sont proches. Le niveau de turbulence obtenu avec le champ large sous-estime globalement le niveau de turbulence au sein de l'écoulement. En effet, a priori, la valeur la plus fiable est celle obtenue avec le champ zoomé car ce dernier permet d'accéder à l'énergie contenue dans des tourbillons de taille plus petite. A partir de t = 0.7s après la fin de l'injection, les données de la turbulence obtenues avec chacun des champs de vue sont proches, avec une valeur de l'ordre de 0.1m/s.

#### II.4.3.3) COMPARAISON DES DONNEES DE PIV AUX DONNEES LDA

Lors de ces essais, des mesures par LDA ont aussi été effectuées dans la zone commune aux trois champs de vue. Les données de turbulence obtenues avec le LDA peuvent alors être comparées à celles obtenues par les différentes échelles de PIV. La méthode d'analyse de la turbulence par LDA est précisée dans la partie II.3.2) et prend comme moyenne une valeur nulle pour le calcul des fluctuations de vitesse. Cette moyenne nulle est en accord avec les résultats obtenus par PIV, représentés sur la Figure 63.

La Figure 68 représente de nouveau l'évolution de l'intensité de la turbulence pour chaque champ de vue, avec une moyenne spatiale correspondant à la même zone physique. Sur ce graphique, l'évolution de la turbulence obtenue par le LDA est ajoutée.



Figure 68: Comparaison de l'intensité de la turbulence obtenue par LDA et avec les différents champs de vue de PIV

Les données obtenues avec le LDA sont en accord avec les résultats précédemment présentés : la même décroissance de la turbulence au cours du temps après l'injection est observée. Les données par LDA sont globalement plus importantes que celles obtenues avec les différentes échelles de PIV. Les données de PIV obtenues en champ zoomé sont inférieures d'environ 20% à celles obtenues par LDA. Les mesures par LDA sont locales, avec une fréquence d'acquisition élevées, permettant ainsi d'accéder à la turbulence contenue dans une plus importante gamme de tourbillons. Cela explique donc une intensité de la turbulence calculée plus importante dans le cas de mesure par LDA. De plus, cette différence de niveau d'intensité de la turbulence peut aussi s'expliquer par la différence de méthodologie d'analyse des données issues des deux types de mesures. En effet, dans le cas de la PIV, une moyenne d'ensemble sur tous les tests effectués est réalisée afin d'obtenir les données de turbulence. Au contraire, dans le cas de la LDA, les fluctuations sont moyennées par intervalles temporels : une moyenne d'ensemble étant par la suite utilisée pour prendre en compte la turbulence des différents tests utilisés.

### II.4.4) CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Cette étude préliminaire a permis d'étudier l'influence de la taille de la zone des mesures PIV sur les résultats de turbulence obtenus. Pour cela, pour de mêmes essais, trois caméras ont permis de visualiser l'écoulement par PIV avec trois zones de mesure de tailles différentes. De plus, une mesure par LDA, positionnée dans la zone commune aux trois mesures précédentes, a été couplée à ces mesures PIV.

Les données de turbulence obtenues avec le champ zoomé et le champ intermédiaire sont proches. Cependant, les données obtenues avec le champ plus large sont plus faibles, cette dernière mesure permettant d'accéder uniquement à l'énergie contenue dans les tourbillons de dimensions plus importantes. La comparaison avec les données LDA a permis d'observer le même comportement de décroissance de la turbulence avec le temps après la fin de l'injection. Les données avec le champ zoomé sont plus faibles que celles obtenues par LDA d'environ 20%.

Cette étude permet ainsi de choisir, pour les mesures de turbulence par PIV effectuées par la suite, un champ de vue de l'ordre de grandeur du champ intermédiaire étudié ici : 5cm x 7,5cm. En effet, les données obtenues avec le champ zoomé sont proches de celles obtenues avec le champ intermédiaire. Le champ intermédiaire est ainsi un compromis en termes de résultat obtenu et de qualité des images obtenues (vignetting des images obtenues avec l'objectif QUESTAR).

L'étude de la convergence des données de turbulence en fonction du nombre d'essais a été réalisée au cours d'une campagne de 20 essais. Il a été observé que l'intensité de la turbulence ne varie que faiblement au-delà d'environ 8 essais réalisés. Ainsi, pour la suite, les données de turbulence par PIV seront obtenues à partir d'environ 8 essais réalisés : ce nombre étant précisé pour chacune des études.

# III) RESULTATS

Dans cette partie, l'étude de la mise en suspension des particules avant ignition est présentée. Dans un premier temps, quelques généralités sur le phénomène de mise en suspension sont abordées. Par la suite, les résultats de l'étude de la concentration sont exposés. Enfin, la dernière partie se consacre à l'étude de l'évolution de la turbulence au sein de notre prototype.

#### III.1) LA MISE EN SUSPENSION DES PARTICULES

Pour rappel, l'injection de la poudre est effectuée par décharge d'un réservoir d'air comprimé au travers des cannes d'injection. De plus, un disque de rupture à membrane déformable (type « sac ») est positionné au sommet du prototype. Ce dernier permet de contrôler le volume contenant la poudre au moment de l'ignition, donc la concentration. De plus, cette membrane permet de présenter une faible résistance lors du passage du front de flamme, limitant ainsi l'augmentation de pression au sein du prototype.

Il est important de mesurer le volume du prototype à la fin de l'injection, en prenant en compte cette augmentation de volume due à l'utilisation de la membrane déformable. Cette mesure a été effectuée sur nos essais de manière indirecte. L'évolution de la pression et de la température au sein des réservoirs d'air comprimé a été mesurée pendant la décharge. Au sein du prototype, seule l'évolution de la température a été mesurée, la pression restant à la pression atmosphérique. L'évolution de ces paramètres est affichée sur la Figure 69. A partir de ces données, la variation de volume est calculée en effectuant un bilan de matière:

$$\Delta V = \frac{T_{proto}}{P_{proto}} \cdot \left(\frac{P_f \cdot V_R}{T_f} - \frac{P_0 \cdot V_R}{T_0}\right) \tag{B3-1}$$

Avec  $T_{proto}$  et  $P_{proto}$  la température et la pression (atmosphérique) au sein du prototype respectivement,  $P_0$  et  $P_f$  les pressions initiales et finales au sein des réservoirs d'air comprimé,  $T_0$  et  $T_f$  les températures initiales et finales au sein des réservoirs, et  $V_R$  le volume des réservoirs. Ainsi, pour chaque configuration (choix de la pression initiale des réservoirs et de la durée d'ouverture des électrovannes), le volume du prototype à la fin de l'injection est calculé, permettant ainsi la détermination de la concentration en particules. Dans l'exemple présenté sur la Figure 69, correspondant à une pression de 2,5 bar et une durée d'injection de 800 ms, la variation de volume est de 2,4 L.



Figure 69: Evolutions des températures et de la pression lors de l'injection de la poussière

Des essais ont aussi été réalisés afin de déterminer le volume maximum du sac, correspondant au volume au moment de la rupture de ce dernier. Pour ce faire, pour différentes pressions initiales des réservoirs amont, le temps d'injection a été modifié. Ainsi, en calculant le volume du sac théorique lors d'un essai avec le temps d'injection le plus important ne permettant pas la rupture du disque et lors d'un essai avec le temps d'injection le plus faible entraînant la rupture du disque, ce volume a pu être encadré. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 5. Ainsi, en prenant les résultats obtenus avec la pression la plus faible permettant d'obtenir la rupture du disque (4 bar), le volume maximal du sac a pu être encadré : entre 5,1 et 5,4 L. Cette partie de l'étude nous a aussi permis de connaître les couples (Pression, temps d'injection) pouvant être utilisés. En effet, afin de contrôler la concentration au moment de l'ignition, il est important de s'assurer que la membrane n'a pas été ouverte préalablement par l'injection de la poudre. Ainsi, par exemple, pour une pression de 5 bar, le temps d'injection maximum est de 400 ms.

Pression réservoir (bar)	Temps d'injection (s)	Rupture de la membrane ?	Variation de volume (L)
6	0,4	Oui	6
6	0,3	Non	4,9
5	0,5	Oui	5,6
5	0,4	Non	4,7
4	1	Oui	5,4
4	0,9	Non	5,1

Tableau 5: Etude de la variation de volume au sein du prototype en fonction de la configuration expérimentale

Le Tableau 6 présente l'évolution de la reproductibilité en termes de concentration lors d'essais effectués avec différentes masses initialement présentes dans les tubes d'injection. Tout d'abord, une augmentation de la concentration est observée lorsque la quantité de poussière est augmentée. Les valeurs moyennes et les écart-types ont été calculés à partir de différents essais d'injection réalisés avec les mêmes configurations expérimentales (pression de 2,5 bar et temps d'injection de 800 ms). Pour chacun de ces cas, une faible dispersion des résultats en termes de concentration est observée. Le ratio de l'écart-type divisé par la moyenne étant inférieur à 10%.

Masse initiale (g/tube)	Concentration moyenne avec $\Delta V$ $(g/m^3)$	Ecart-type de la concentration $(g/m^3)$	Ratio*
1,5	183	10	5 %
1,7	225	14	6 %
2	273	24	9 %
2,5	361	27	7 %

Tableau 6: Reproductibilité en termes de concentration en fonction de la masse initiale

\* Le ratio correspond à l'écart-type de la concentration divisé par la valeur moyenne

La Figure 70 représente l'évolution de la suspension pendant et après le processus de dispersion. Les images ont été obtenues par la méthode de diffusion de Mie, la nappe laser étant positionnée au centre de l'enceinte. Il est important de noter que le temps entre les images sélectionnées n'est pas constant. Le temps indiqué en-dessous des images correspond au temps après le début de l'injection (ouverture de l'électrovanne). Dans un premier temps, les jets issus des cannes d'injection se rencontrent au centre du prototype. Par la suite, la poudre continue à être injectée pendant 800 ms. Enfin, après la fin de l'injection, la suspension paraît plus stationnaire et devenir de plus en plus homogène. Ces observations seront quantifiées dans la suite de cette étude.



Figure 70: Evolution de la dispersion des particules au sein du prototype

Dans la suite, le temps de référence correspondra à la fermeture de l'électrovanne, représentant ainsi la fin de l'injection. En effet, dans les parties suivantes, nous nous intéressons seulement à l'évolution de la suspension, en termes de concentration et de turbulence, après la fin de la mise en suspension. Ces paramètres doivent être caractérisés au moment de l'ignition, qui intervient à un délai fixé après la fin de la mise en suspension.

### III.2) ETUDE DE LA CONCENTRATION (DIFFUSION DE MIE)

Dans cette partie, l'analyse de l'évolution de l'homogénéité de la suspension, en termes de concentration, par la méthode de la diffusion de Mie est présentée. Dans un premier temps, les résultats de l'analyse issus d'un essai sont exposés. Par la suite, les degrés d'homogénéité de la suspension obtenus avec différentes concentrations sont comparés. L'intervalle de concentrations ayant pu être étudié avec cette technique de visualisation est précisé. Enfin, une étude de cette homogénéité avec une configuration d'injection différente est effectuée.

### **III.2.1) PRESENTATION DES ESSAIS**

Les tests présentés ont été réalisés avec un laser Nd :YAG pulsé LITRON (200 mJ/15 Hz) couplé à un générateur de nappe. La longueur d'onde de ce laser est de 532 nm. Pour cette technique, ce laser est utilisé en mode simple pulse avec un délai de 100 ms entre les pulses. Ce laser, couplé au générateur de nappe, permet d'avoir une tranche laser verticale, située au centre du prototype, s'étendant sur toute la hauteur du prototype. Cependant, la zone d'étude de la concentration est limitée à la zone située entre 3,5 cm et 66 cm depuis la base du prototype, soit près de 90% de la hauteur totale du prototype. En effet, la puissance du laser était trop faible sur les extrémités du prototype pour permettre l'étude de l'homogénéité. Pour la visualisation, une caméra Hamamatsu HiSense a été utilisée, avec un objectif 17-35 mm et une ouverture fixée à f/4. La résolution est de 2048x2048 pixels, avec une fréquence d'acquisition de 10 fps. Le temps d'exposition est choisi de 66,9 µs.

### III.2.2) EVOLUTION DE LA CONCENTRATON LORS D'UN ESSAI

Dans cette partie, les résultats obtenus lors d'un essai sont analysés. Pour ce test, une masse de 1,7 g est initialement placée dans chaque tube d'injection. La pression du réservoir est fixée à 2,5 bar avec un temps d'ouverture des électrovannes de 800 ms. Les images obtenues avant et après le traitement numérique sont exposées sur la Figure 71. Immédiatement après la fermeture des électrovannes (t = 0 ms), le mélange ne semble pas très homogène : il est plus concentré sur la partie supérieure du prototype. Le mélange semble par la suite devenir de plus en plus homogène. Pour rappel, le dégradé de couleur des images obtenues après traitement numérique correspond à l'intensité lumineuse, obtenue après les différentes corrections, et adimensionnée par la valeur moyenne de chaque image. La moyenne spatiale de chaque image, après traitement numérique, est donc égale à 1.



Figure 71: Résultats obtenus avant (en haut) et après (en bas) traitement numérique

Afin d'obtenir une première information sur le degré d'homogénéité de la suspension formée, l'écart-type spatial a été calculé pour chacune des images obtenues : Figure 72. Dans le cas d'une suspension idéalement homogène, la valeur de cet écart-type serait nulle. Une diminution de cet écart-type est observée au cours du temps. Le trait horizontal rouge affiché sur ce graphique représente l'objectif fixé pour cette étude : une variation de la concentration au sein de l'écoulement inférieure à 20% autour de la valeur moyenne. A partir de t = 0,6 s, cet objectif est atteint. L'écart-type atteint même une valeur de 0,15 à partir de t = 0,8 s. A partir de cet instant, le degré d'homogénéité de la suspension semble rester constant.



Figure 72: Evolution de l'écart-type spatial de l'intensité lumineuse adimensionnée

Afin d'obtenir des informations plus précises sur la distribution du degré d'homogénéité au sein de la suspension, une représentation sous forme d'un diagramme appelé « boîte à moustache » est utilisée (Figure 73). En général, avec un tel diagramme, les données représentées sont : le minimum, le premier quartile, la médiane, le troisième quartile et le maximum. Or, dans notre cas, le degré d'homogénéité général est recherché, sans prendre en compte des variations pouvant être rattachées à seulement quelques pixels. En effet, il est possible, au cours du processus d'injection, que de la poudre se colle aux parois de notre prototype. Dans ce cas, des zones sombres locales sont obtenues. Les valeurs minimales et maximales ont ainsi été remplacées par les valeurs du 1<sup>er</sup> décile et du 9<sup>ème</sup> décile : ainsi, pour chaque pas de temps, 80% des pixels de l'image ont une valeur d'intensité lumineuse adimensionnée comprise entre les deux traits horizontaux situés aux extrémités de la « boîte à moustache ». De même que précédemment, les deux traits rouges représentent l'objectif fixé pour cette étude : 20% de variation autour de la concentration moyenne au sein de l'écoulement. Dans le cas d'un mélange idéalement homogène, la « boîte à moustache » se réduirait à un trait horizontal correspondant à une intensité lumineuse adimensionnée de 1. Après la fermeture des électrovannes, les « boîtes à moustache » deviennent de plus en plus resserrées, la suspension devient donc de plus en plus homogène. A partir de t = 0.3 s, 50% des pixels respectent l'objectif fixé dans cette étude. A partir de t = 0.7 s, 80% des pixels ont une valeur inférieure, ou proche, de l'objectif fixé. Le degré d'homogénéité semble une nouvelle fois resté constant à partir de t = 0.8 s.



Figure 73: Evolution du degré d'homogénéité de la suspension

Un critère important dans l'élaboration du système d'injection a été d'obtenir une homogénéité suffisante notamment sur toute la hauteur de notre prototype, afin de ne pas perturber la propagation de la flamme. Cette considération explique le système d'injection mise en place. Ainsi, l'évolution de cette intensité lumineuse a donc été étudiée essentiellement le long de l'axe vertical (axe de propagation de la flamme). L'évolution de l'intensité lumineuse moyenne le long de l'axe vertical a donc été analysée. Pour cela, la moyenne le long de chaque ligne horizontale de pixels est calculée. Cette évolution, pour différents instants après la fermeture des électrovannes, est représentée sur la Figure 74. Juste après la fin de l'injection (courbe noire), on observe que le long de l'axe vertical (axe des ordonnées), l'intensité lumineuse moyenne (moyennes le long des axes horizontaux pour rappel) présente de fortes variations : au centre du prototype, la suspension présente une faible concentration alors qu'au sommet du prototype cette concentration est supérieure au critère retenu. Par la suite, la suspension devient de plus en plus homogène tout le long de l'axe vertical. A partir de t = 0,6 s, le critère fixé est respecté globalement sur toute la hauteur du prototype.



Figure 74: Evolution du degré d'homogénéité de la suspension sur la hauteur du prototype

#### III.2.3) ETUDE DE L'HOMOGENEITE AVEC DIFFERENTES CONCENTRATIONS

Tous les essais présentés dans cette partie ont été obtenus avec la même configuration expérimentale : pression initiale de 2.5 bar et temps d'ouverture des électrovannes de 800 ms. Seule la masse initiale présente dans les tubes d'injection a été modifiée : 1,7 g/tube, 2 g/tube et 2,5 g/tube. La correspondance en termes de concentration est, pour rappel, indiquée dans le Tableau 6. Pour chacune des configurations expérimentales (masse initiale), 5 tests ont été réalisés. Pour chaque test, les images obtenues ont été traitées numériquement comme présenté précédemment. Ensuite, une image moyenne a été obtenue à partir de 5 tests. Tous les résultats présentés dans cette partie concernent ces images moyennes.

Dans un premier temps, l'écart-type spatial a été calculé pour chaque pas de temps, pour les différentes configurations expérimentales étudiées (Figure 75). Pour chaque configuration, une baisse de l'écart-type au cours du temps est observée. Les écarts-types obtenus pour une masse initiale de 1,7 g/tube et de 2 g/tube sont proches, alors que dans le cas d'une masse initiale de 2,5 g/tube, cet écart-type est plus important. Cependant, à partir de t = 0,8 s, les écarts-types sont inférieurs au critère pour chaque configuration. Dans les cas correspondant à 2 g/tube et 1,7 g/tube, ce critère est atteint dès l'instant t = 0,6 s.



Figure 75: Evolution de l'écart-type spatiale de l'intensité lumineuse pour différentes masses initiales

Par la suite, l'évolution de l'intensité lumineuse moyenne le long de l'axe vertical a été étudiée. La Figure 76 représente cette évolution, pour les trois configurations étudiées, à l'instant t = 1 s. Pour les cas correspondant à 1,7 g/tube et 2 g/tube, le critère est respecté sur toute la hauteur du prototype. Cependant, pour une masse initiale plus importante, de 2,5 g/tube, ce critère n'est pas respecté sur quelques zones du prototype. Ce critère n'est notamment pas respecté au sommet du prototype : la concentration étant trop faible en cette zone. Comme nous le reverrons dans la sous-partie suivante, avec une forte concentration en poudre, le laser est significativement atténué lors de son passage dans la suspension formée : dans le cas d'une forte atténuation, la correction présentée précédemment ne semble pas satisfaisante. Ainsi, la concentration dans cette zone peut être sous-estimée par cette méthode. Lors du calcul de la moyenne pour adimensionner l'intensité lumineuse, cette moyenne est alors sous-estimée. Ainsi, l'intensité lumineuse adimensionnée est localement surestimée. Ceci explique aussi la forte concentration mesurée à la base du prototype, causée par cette moyenne biaisée. De plus, ceci peut expliquer l'écart-type plus important remarqué précédemment.



Figure 76: Evolution du degré d'homogénéité de la suspension sur la hauteur du prototype pour différentes masses initiales (t=1s)

### III.2.4) INTERVALLE DE CONCENTRATIONS D'UTILISATION DE CETTE METHODE

Avec des masses injectées comprises entre 1,7 g/tube et 2,5 g/tube, la suspension obtenue devient homogène, avec le critère établi, pour des temps après injection supérieurs à 800 ms (cf. Figure 74). Cependant, pour des concentrations non comprises dans cet intervalle, la méthode utilisée (diffusion de Mie) semble présenter quelques limites.

Tout d'abord, des masses initiales inférieures à 1,7 g/tube semblent trop faibles pour pouvoir être analysées avec cette méthode. Ainsi, les images obtenues deviennent trop sombres pour être analysées. Cependant, les résultats obtenus jusqu'à une masse injectée d'environ 1,5 g/tube restent correctes. A partir de 1 g/tube, les résultats ne satisfont plus le critère fixé. Ces configurations correspondent à de faibles concentrations en poussières, inférieures à 180  $g/m^3$ . Elles ne seront pas étudiées par la suite lors des essais de propagation de flamme, car étant difficilement inflammables.

Pour des masses initiales au-delà de 3 g/tube, des limites s'opposent à l'utilisation de cette méthode. La Figure 77 représente les images avant et après traitement, obtenues avec une masse initiale de 3 g/tube, correspondant à t = 1 s. Une première zone sombre est observable au sommet du prototype. Cette dernière résulte de l'atténuation de la nappe laser lors de sa traversée de la suspension de particules. Une deuxième zone sombre est observée plus bas au centre du prototype. Elle est causée par des particules collées à la paroi du prototype pendant l'injection. Sur l'image obtenue après traitement, ces zones correspondent donc à des zones de très faible concentration. De plus, cette faible intensité locale entraîne un biais dans le calcul de

la valeur moyenne : cette valeur étant alors faible. Ainsi, après adimensionnement par la valeur moyenne (sous-évaluée par les zones sombres), toutes les autres zones paraîtront plus concentrées. L'image finale obtenue présentera des variations importantes d'intensité lumineuse adimensionnée. Ceci se traduit par une intensité lumineuse adimensionnée moyenne importante à la base du prototype, et faible au niveau des zones sombres (Figure 78). Ces fortes variations ne semblent donc pas attribuables à un faible degré d'homogénéité de la concentration mais à une limite d'utilisation de cette technique dans le cas de suspensions concentrées.



Figure 77: Images obtenues avant (à gauche) et après (à droite) traitement numérique (masse initiale=3 g/tube, 1 s après la fin de l'injection)



Figure 78: Evolution du degré d'homogénéité de la suspension sur la hauteur du prototype pour une masse initiale de 3 g/tube

### III.2.5) ETUDE DE LA CONCENTRATION AVEC UNE AUTRE CONFIGURATION D'INJECTION

Les tests présentés jusqu'à présent ont tous été réalisés avec une même condition d'injection : pression dans les réservoirs amont de 2,5 bars et durée d'ouverture des électrovannes de 800 ms. Une autre configuration d'injection a aussi été étudiée : cette dernière correspond à une pression des réservoirs amont de 4 bars et une durée d'ouverture des électrovannes de 300 ms. Cette configuration a été choisie car elle permet d'injecter la même quantité d'air que la configuration précédente. De plus, comme nous le verrons par la suite, cette seconde configuration expérimentale permet d'obtenir des niveaux de turbulence plus élevés. Les tests présentés dans cette partie ont été réalisés avec une masse insérée dans chaque tube de 1,6 g, entraînant une concentration de 260  $g/m^3$ . Comme précédemment, 5 tests ont été réalisés afin d'obtenir des données moyennes sur le degré d'homogénéité de la suspension obtenue.

A partir des images obtenues, une première donnée importante est l'écart-type spatial du degré d'homogénéité obtenu, quantifiant ainsi l'homogénéité globale de la suspension. L'évolution de cette donnée en fonction du temps est représentée sur la Figure 79. On observe une diminution de l'écart-type spatial au cours du temps correspondant à une augmentation du degré d'homogénéité de la suspension. Le critère fixé est respecté à partir d'un délai de 700ms après la fin de l'injection.



Figure 79: Evolution de l'écart-type spatial de l'intensité lumineuse avec une injection à 4b/300ms

Comme nous l'avons déjà remarqué, une autre donnée importante est l'homogénéité de la suspension sur toute la hauteur du prototype. L'analyse de cette homogénéité est représentée sur la Figure 80. Comme précédemment, une augmentation de l'homogénéité de la suspension est observée en fonction du temps après la fin de l'injection (comparaison des différentes courbes). Le critère fixé est respecté sur toute la hauteur du prototype seulement après un délai de 1,1s après la fin de l'injection. Pour des délais plus faibles, une zone de plus faible concentration apparaît au milieu de l'enceinte. Cette zone peut correspondre à une réelle zone de faible concentration. Cependant, comme nous l'avons observé précédemment, cela peut aussi être le fait d'un biais de la mesure effectuée, notamment en présence de particules sur les parois localement. Pour un délai de 700ms après la fin de l'injection, la longueur de cette zone moins

concentrée est d'environ 12cm correspondant ainsi à 17% de la hauteur totale du prototype (70cm pour rappel).



Figure 80: Evolution de degré d'homogénéité de la suspension sur la hauteur du prototype avec une injection à 4b/300ms

### **II.2.5) CONCLUSIONS**

L'étude de la concentration par diffusion de Mie a permis de quantifier le degré d'homogénéité de la suspension obtenue après la fin de la dispersion des particules au sein de notre enceinte. En injectant la poudre avec des réservoirs amont pressurisés à 2,5 bars et avec une durée d'ouverture des électrovannes de 800ms, la suspension obtenue devient globalement homogène (critère fixé à +/- 20% de variations) à partir de 600ms. La suspension obtenue est globalement homogène sur toute la hauteur du prototype.

Cependant, pour des conditions d'injections différentes (pression dans les réservoirs amont fixée à 4bars et durée d'ouverture des électrovannes égale à 300ms), la suspension obtenue est moins homogène. En effet, l'étude de l'écart-type spatial montre que le critère est respecté après un délai de 700ms après la fin de l'injection. L'étude de l'homogénéité selon l'axe vertical montre que ce critère n'est respecté qu'après 1,1s après la fin de l'injection. Pour un délai de 700ms, une zone de faible concentration est observée sur une hauteur de 12cm (17% de la hauteur totale du prototype) située au centre du prototype.

Pour la suite, il sera recommandé d'enflammer le mélange obtenu à partir de 600ms après la fin de l'injection lorsque celle-ci sera réalisée avec une pression dans les réservoirs de 2,5bars et une ouverture des électrovannes de 800ms. Pour une pression de 4bars et une durée de 300ms d'ouverture de vannes, ce délai avant inflammation devrait être supérieur à 700 ms, même si ce délai ne permet pas de respecter le critère sur toute la hauteur du prototype.

### III.3) ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA TURBULENCE

Dans cette partie, la turbulence au sein de l'écoulement est étudiée. Le but est de caractériser l'évolution de l'intensité de la turbulence après la fin de l'injection des particules. Deux conditions d'injections de la poudre ont été étudiées : ces dernières sont définies par la pression initiale dans les réservoirs amont et la durée d'ouverture des électrovannes. La première correspond à une pression initiale de 2,5bars et une durée d'ouverture des vannes de 800ms, la seconde correspond à une pression de 4bars et une ouverture d'une durée de 300ms. Par la suite, ces deux configurations d'injection seront notées respectivement 2,5b/800ms et 4b/300ms.

# III.3.1) ESSAIS REALISES

Le niveau de turbulence obtenu avec les deux conditions d'injection étudiées (4b/300ms et 2,5b/800ms) est mesuré par la méthode de PIV et par la méthode LDA, les résultats obtenus avec les deux méthodes pouvant ainsi être comparées. Lors de ces essais, une masse de 0,3g est insérée dans chaque tube de dispersion. Cette masse initiale correspond à une concentration d'environ  $30g/m^3$  pour l'injection à 2,5b/800ms et une concentration de  $40g/m^3$  pour l'injection à 4b/300ms.

Les mesures par PIV ont été réalisées à l'aide d'un laser pulsé LITRON (200 mJ à 15 Hz) muni d'un générateur de nappe. Le délai entre les pulses du laser est fixé à 300µs. La caméra utilisée est une caméra HAMAMATSU HiSense d'une résolution de 2048x2048 pixels à la fréquence d'acquisition de 10Hz choisie. Le temps entre deux doublets d'images, correspondant alors à deux cartes de vecteurs vitesse après traitement numérique, est donc de 200ms. Cette caméra est munie d'un objectif Nikkor de focale fixe 105 mm, associé à un doubleur de focale. L'ouverture de cet objectif est positionnée à f/4. La zone de visualisation par PIV est de dimensions 4,9cm x 4,9cm, en accord avec les conclusions de l'étude sur l'influence de la zone de mesure sur les résultats de PIV.

# **III.3.2) RESULTAST OBTENUS**

# III.3.2.1) RESULTATS DE TURBULENCE PAR PIV

Dans cette partie, les résultats de turbulence obtenus par les mesures PIV sont exposés, pour chacune des deux configurations étudiées. Tous les résultats (vitesse moyenne, fluctuations de vitesse et intensité de la turbulence) sont des valeurs moyennes obtenues après le calcul de la moyenne spatiale sur toutes les fenêtres d'interrogation.

Tout d'abord, à partir des images obtenues, et après détermination des vecteurs vitesse dans chaque fenêtre d'interrogation, la moyenne d'ensemble en chacune de ces fenêtres est calculée. La Figure 81 montre l'évolution de cette vitesse moyenne au cours du temps. Une décroissance de la vitesse est observée jusqu'à atteindre une valeur nulle. Aucun mouvement d'ensemble préférentiel ne semble donc être présent au sein de l'écoulement. Dans le cas d'une injection à 4b/300ms, la vitesse est globalement plus élevée et atteint une valeur nulle après un temps plus long. En effet, dans le cas d'une telle injection rapide, l'effet de jets qui introduit la poudre ainsi que l'énergie au sein de l'écoulement est encore présent au moment de la fermeture de l'électrovanne. Au contraire, dans le cas d'une injection à 2,5b/800ms, au moment de la fermeture de l'électrovanne, cet effet de jets est très atténué, la pression dans les réservoirs amont étant proche de la pression atmosphérique présente au sein du prototype.



Figure 81: Evolution de la vitesse moyenne en fonction du temps

A partir de cette vitesse moyenne, les fluctuations de vitesse peuvent alors être calculées. L'évolution de ces dernières est représentée sur la Figure 82 : il est à noter que sur ce graphique l'échelle de l'axe des ordonnées est logarithmique. Les fluctuations de vitesse obtenues avec l'injection à 4b/300ms sont plus importantes que celles obtenues avec la configuration 2,5b/800ms. Avec les deux configurations, la même quantité d'air est injectée au sein du prototype. Cependant, avec la première configuration cette quantité d'air est injectée plus rapidement (300ms) qu'avec la seconde (800ms). L'écoulement est ainsi plus turbulent dans la configuration 4b/300ms, et nécessitera un temps plus long avant de revenir au repos. De plus, pour chacune des deux configurations étudiées, les fluctuations horizontales (u') et verticales (v') sont proches, traduisant ainsi une faible anisotropie de la turbulence.



Figure 82: Evolution des fluctuations de vitesse en fonction du temps (échelle des ordonnées logarithmique)

La décroissance de la turbulence derrière une grille suit une loi de la forme (Dahoe, 2000):

$$\frac{u'}{t_0} = (\frac{t}{t_0})^n \tag{B3-2}$$

Avec u' la fluctuation de vitesse,  $u'_0$  la fluctuation de vitesse au moment de référence, t le temps et  $t_0$  le temps de référence. La décroissance de la turbulence au sein de la sphère fermée suit ce même type de loi (Dahoe, 2000; Skjold, 2003), la valeur de l'exposant n variant selon le type de déflecteur utilisé pour la mise en suspension de la poudre. Nos données semblent aussi suivre un tel type de loi. Sur la Figure 82, les courbes pointillées représentent les courbes de la forme de l'équation (B3-2) approximant le mieux les données. Les valeurs de l'exposant n obtenues ainsi que les valeurs du coefficient de détermination de la régression obtenue sont indiquées dans le Tableau 7.

Tableau 7: Valeurs de l'exposant n de la loi de décroissance de la turbulence obtenue pour chaque fluctuation de vitesse

Données étudiées	Exposant n	Coefficient de corrélation (r <sup>2</sup> )
U' 2,5b/800ms	-1,62	0.985
V' 2,5b/800ms	-1,43	0.992
U' 4b/300ms	-2,54	0.983
V' 4b/300ms	-2,45	0.973

L'intensité de la turbulence est ensuite déterminée pour chacune des conditions expérimentales. La décroissance de cette dernière est représentée sur la Figure 83. Cette intensité est plus importante avec l'injection à 4b/300ms comme nous l'avons déjà précédemment remarqué. La décroissance de chacune des deux configurations peut être approximée par une loi de type puissance. Bien que l'intensité de la turbulence obtenue avec la configuration 4b/300ms reste supérieure, cette dernière décroît plus rapidement que celle obtenue pour une injection à 2,5b/800ms. En effet, l'intensité de la turbulence est de 1,73m/s,

200ms après la fin de l'injection, dans la configuration 4b/300ms et décroît jusqu'à une valeur de 0,11m/s après un délai de 2s après la fin de l'injection. Dans la configuration 2,5b/800ms, pour les mêmes délais après la fin de l'injection, l'intensité de la turbulence, initialement de 0,36m/s, décroît seulement jusqu'à une valeur de 0,06m/s.



Figure 83: Evolution de l'intensité de la turbulence en fonction du temps

### III.3.2.2) RESULTATS DE TURBULENCE PAR LDA

Des mesures par LDA ont aussi été effectuées lors des essais précédents avec les deux configurations étudiées (4b/300ms et 2,5/800ms). L'utilisation de cette méthode permet d'obtenir lors d'un essai, en un point de l'écoulement, les variations temporelles de deux composantes de la vitesse de l'écoulement : notées u pour la composante horizontale et v pour la composante verticale. La Figure 84 représente un exemple de signal obtenu lors d'un test réalisé dans les conditions d'injection 4b/300ms. De fortes fluctuations sont observées directement après la fin de l'injection, pendant une durée d'environ 300ms. Par la suite ces fluctuations sont plus modérées et tendent vers une valeur nulle pour chacune des deux composantes étudiées.

On observe aussi moins de données obtenues pendant cette période de fortes fluctuations (t < 300ms), entraînant ainsi une plus faible résolution temporelle du signal obtenu. Cette faible résolution est due au critère choisi pour les mesures LDA, la plage de mesures identifiables est fixée à environ +/-1,2 m/s. Ainsi, les particules étant détectées avec une vitesse hors de cette plage ne seront pas validées. Or, à la fin de l'injection, il est possible que des particules aient une telle vitesse et ne soient tout de même pas validées. Ceci explique donc la plus faible résolution temporelle obtenue en début d'enregistrement. Une augmentation de la plage de validité de la vitesse des particules entraînant l'apparition d'un bruit plus important dans les mesures effectuées après cette phase de forte fluctuation, il a été décidé de garder ce critère pour la suite. En effet, nous souhaitons connaître le niveau de turbulence au moment de l'inflammation du mélange. Or cette inflammation aura lieu lorsque le mélange est globalement homogène en termes de concentration : ainsi, les données de turbulence juste après la fin de
l'injection nous sont moins importantes pour cette étude que celles obtenues pour un délai plus important.



Figure 84: Evolution de la vitesse instantanée obtenue par LDA

A partir des signaux bruts obtenus et à partir des différents tests effectués, les fluctuations de vitesse de chaque composante ont été déterminées. La Figure 85 représente l'évolution de ces dernières pour les deux configurations étudiées. Une décroissance globale des fluctuations est observée pour chaque composante et chaque configuration expérimentale. Les fluctuations obtenues avec la configuration 4b/300ms sont une nouvelle fois supérieures à celles obtenues avec une injection à 2,5b/800ms. Une plus grande disparité des résultats est observée en comparaison avec les résultats de PIV présentés précédemment. Cette disparité est peut-être due à la méthodologie utilisée, et au choix de l'intervalle de temps  $\Delta t$  considéré.



Figure 85: Evolution des fluctuations de vitesse obtenues par LDA

L'évolution de l'intensité de la turbulence, déduite de la figure précédente, est représentée sur la Figure 86. Une décroissance de la turbulence est une nouvelle fois observée après la fin de l'injection. Comme pour les résultats obtenus par PIV, l'intensité de la turbulence obtenue avec la configuration 4b/300ms est plus importante. De plus, cette intensité décroît plus rapidement que pour la configuration correspondant à une injection à 2,5b/800ms, en accord avec les résultats obtenus par PIV. Après un délai d'environ 1s après la fin de l'injection, les intensités obtenues avec les deux configurations sont proches.



Figure 86: Evolution de l'intensité de la turbulence obtenue par LDA

#### III.3.3) CONCLUSIONS

Dans cette partie, la turbulence a été étudiée à l'aide de deux techniques optiques complémentaires : la PIV et le LDA. A partir de ces données, l'évolution de l'intensité de la turbulence après la fin de l'injection a été déterminée. La Figure 87 représente l'évolution de l'intensité de la turbulence obtenue avec ces deux méthodes pour les deux configurations d'injection étudiées. A partir de t = 600ms, les données obtenues sont semblables avec les deux méthodes pour les deux configurations expérimentales étudiées. Pour l'injection à 2,5b/800ms, les données sont proches également juste après la fin de l'injection. Cependant, pour une injection à 4b/300ms, pour t < 600ms, une forte différence entre les données obtenues par LDA et par PIV est observée, les données par LDA étant bien inférieures. Comme nous l'avons précédemment remarqué, cette différence s'explique par la plage de vitesse acceptable par le LDA que nous avons fixée. Cette plage ne permet pas d'enregistrer des particules ayant une vitesse supérieure à 1,2m/s. Ainsi, pour ce délai moins de particules sont enregistrées, et les particules enregistrées sont celles ayant une vitesse plus faible. L'intensité de la turbulence est alors dans ce cas sous-estimée.



Figure 87: Comparaison des intensités de la turbulence obtenues par PIV et par LDA

Les résultats de turbulence obtenus dans cette partie correspondent à des essais réalisés avec une faible quantité de poussières injectée  $(30 - 40 \ g/m^3)$ , comparée à la quantité injectée lors des essais avec inflammation (voir partie C), afin d'obtenir des résultats de PIV exploitables. Ainsi, la question de l'influence de la quantité de poussières injectée sur la décroissance de la turbulence dans notre prototype se pose. Des auteurs ont déjà évalué cette influence au sein de la sphère de 20L (Dahoe et al., 2001b; Skjold, 2003), montrant une faible influence de la présence de particules sur la décroissance de la turbulence. Cependant, avec le système d'injection utilisé ici, le phénomène même de mise en suspension peut être modifié par la présence des particules. En effet, lors de l'injection une quantité importante de poudre passe au travers d'orifices de faibles diamètres (2 mm). Ainsi le mécanisme de mise en suspension peut être influence par la quantité de poudre injectée.

#### III.3.4) UTILISATION DE L'ALUMINIUM COMME TRACEUR DE L'ECOULEMENT

L'étude d'un écoulement, par PIV ou par LDA, nécessite l'ensemencement de ce dernier par des particules. La vitesse ainsi mesurée est celle de ces particules et non celle de l'écoulement à étudier directement. Ces traceurs doivent donc être passifs afin de suivre au mieux l'écoulement à étudier. Une donnée permettant de quantifier la capacité d'une particule à suivre un écoulement est le nombre de Stokes ( $S_t$ ). Ce nombre correspond au rapport entre l'inertie de la particule et les forces visqueuses, et peut être défini comme suit :

$$S_{t} = \frac{\rho_{p}.\,d_{p}.\,U_{f}}{18.\,\mu_{f}} \tag{B3-3}$$

Avec  $\rho_p$  la masse volumique de la particule,  $d_p$  le diamètre de la particule,  $U_f$  la vitesse de l'écoulement et  $\mu_f$  la viscosité dynamique du fluide. Une particule avec un faible nombre de Stokes suivra alors mieux l'écoulement qu'une particule ayant un nombre de Stokes élevé.

La Figure 88 montre l'atténuation des oscillations de l'écoulement par la particule, c'està-dire la capacité de la particule à suivre un écoulement oscillatoire. L'axe des ordonnées correspond à l'atténuation des oscillations par les particules, définit comme étant le rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de la particule. Le paramètre correspondant aux différentes courbes est le ratio entre la masse volumique de la particule est celle du fluide.



Figure 88: Atténuation des variations de l'écoulement en fonction du nombre de stokes de la particule (Mendez et al., 2018)

Les particules d'aluminium, utilisées lors de l'étude de la propagation de la flamme, sont les traceurs de l'écoulement lors des mesures PIV. La capacité de ces particules à suivre un écoulement doit donc être quantifiée. Au vu de la masse volumique de l'aluminium  $(2700kg/m^3)$ , la courbe Rp=1000 est choisie. D'après les résultats précédemment obtenus, les fluctuations de vitesse sont par exemple de l'ordre de 0,15 m/s pour l'injection à 2,5b/800ms et de 0,07 ms pour celle à 4b/300ms après un délai de 1s après la fin de l'injection. Ces vitesses correspondent à des nombres de Stokes de 6,1 et de 2,8 respectivement. D'après la Figure 88, une atténuation de 97% des oscillations pour l'injection à 4b/300ms et de 95% des oscillations pour celle à 2,5b/800ms est obtenue lors des essais réalisés.

Les particules d'aluminium utilisées comme traceurs sous-estiment donc fortement le niveau de turbulence de l'écoulement. Cependant, ces mesures permettent d'obtenir la turbulence de la phase solide avec les mêmes particules que celles utilisées pour les essais de propagation de la flamme présentés par la suite.

# CONCLUSIONS DE LA PARTIE B

Dans cette partie, le prototype élaboré pour l'étude de la mise en suspension de la poudre est présenté. Par la suite, la suspension formée au sein de notre enceinte a été étudiée expérimentalement. L'homogénéité de la concentration ainsi que le niveau de turbulence ont été quantifiés. La concentration a été étudiée par diffusion de la lumière de Mie, la turbulence étant obtenue par deux méthodes optiques complémentaires : la PIV et le LDA.

Ces deux études (concentration et turbulence) sont essentielles afin de choisir les paramètres expérimentaux pour l'étude de la propagation de la flamme. Tout d'abord, afin d'obtenir un niveau d'homogénéité de la concentration optimal, il a été choisi d'effectuer les tests avec une injection correspondant à une pression dans les réservoirs amont de 2,5 bars et une durée d'ouverture des électrovannes de 800ms. Le délai avant inflammation est fixé à 1s afin d'augmenter cette homogénéité. Dans ces conditions le niveau de turbulence est faible, égal à 10 cm/s.

Pour étudier l'influence de la turbulence initiale sur la propagation du front de flamme, la configuration d'injection avec une pression amont de 4b et une ouverture des électrovannes fixée à 300ms a été choisie. En effet, cette configuration permet d'obtenir des intensités de la turbulence plus élevées. Deux délais avant inflammation ont été choisis, correspondant à deux intensités de la turbulence différentes : 600ms et 1s. Avec le délai de 600ms, l'intensité de la turbulence est de 41cm/s. Elle est de 21cm/s pour un délai de 1s. Le délai de 600ms est un compromis entre le niveau de turbulence et l'homogénéité de la concentration. En effet, comme nous l'avons précédemment remarqué, à un tel délai après la fin de l'injection, l'homogénéité de la concentration ne répond pas au critère fixé sur toute la hauteur du prototype : une zone de plus faible concentration étant observée au milieu de l'enceinte.

A présent, la mise en suspension de la poudre au sein de notre prototype est quantifiée : en termes de concentration et de turbulence. La propagation de la flamme dans la suspension obtenue est alors étudiée. Cette propagation fait l'objet de la partie suivante.

# PARTIE C: ETUDE DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME

IN	INTRODUCTION				
I)	MATERIEL	116			
	1) LES PROTOTYPES D'ETUDE DE LA PROPAGATION	116			
	I.1.1) Adaptation du prototype pours les essais avec inflammation	116			
	I.1.2) Mise en place d'un prototype arande échelle	117			
	2) LE GENERATEUR D'ARCS ELECTRIQUES	118			
	3) Les capteurs de pression utilises	119			
II)	METHODES MISES EN PLACE POUR L'ETUDE DE LA PROPAGATION	121			
	1) METHODES OPTIQUES LITUISEES	121			
	II 1 1) Par visualisation directe	121			
	II 1 2) Par ombrosconie	122			
	II 1 3) Par Schlieren	122			
	II 1 A) Mice en nlace evnérimentale	123			
		125			
	Il 2 1) Détermination de la vitesse de propagation	125			
	II.2.1) Determination de la méthodo du tubo ouvert	125			
	II.2.2) Presentation de la methode du tabe ouvert	120			
	<i>ii.2.3)</i> Etude comparative : Etude de l'influence de la saturation des images par visualisation à sur les résultats de vitesse de combustion	170			
	Il 2 3 1) Contexte de l'étude	120			
	II 2 3 2) Résultats obtenus				
	II.2.3.3) Conclusions de l'étude				
	II.2.4) Etude comparative : Comparaison des méthodes optiques de visualisation de la propag	ation132			
	II.2.4.1) Essais réalisés	132			
	II.2.4.2) Résultats obtenus	133			
	II.2.4.3) Conclusions de l'étude	139			
	II.2.5) Etude comparative : comparaison d'images obtenues selon deux plans perpendiculaires	140			
	II.2.5.1) Contexte de l'étude	140			
	II.2.5.2) Résultats obtenus	141			
	II.2.5.3) Conclusion de l'étude	144			
III	RESULTATS	145			
	I.1) ETUDE GENERALE DU PHENOMENE DE PROPAGATION	145			
	III.1.1) Observation de la propagation à 1 étage	145			
	III.1.1.1) Analyse d'un essai réalisé	145			
	III.1.1.2) Répétabilité du phénomène observé	149			
	III.1.1.3) Autres phénomènes observés	151			
	III.1.1.3.1) Explosions locales de particules	151			
	III.1.1.3.2) Propagation de la flamme autour des électrodes	152			
	III.1.1.3.3) Analyse de la poudre après inflammation	153			
	Etude par granulometre laser	153			
	Eluue par miscrope electromque a Dalayage (MEB)	154 1EF			
	III.1.2) Observations complementaires dans le prototype multi-étages	155			
	III.1.3) IVIISE EN EVIGENCE DE CERCUINS prenomenes	158			
	III.1.3.1) Etude de l'influence de l'émissivité des parais	159			
	12 FTIDE DE L'INELLENCE DE LA TURBULENCE SUR LA DEODAGATION DU EDONT DE ELAMMAES	162			
		16/			
	III 3 1) Essais réalisés	104 161			

III.3	3.2)	Résultats obtenus	165
IV.3	3.3) Coi	nclusions/Limites potenitelles de la méthode	169
III.4)	Persi	PECTIVE : NOUVELLE METHODE DE DETERMINATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION	170
111.4	1.1)	Observation du mouvement des particules en amont du front de flamme	171
111.4	1.2)	Méthode de détermination de la vitesse de combustion	172
111.4	1.3)	Premiers résultats obtenus	
111.4	1.4)	Intérêt d'utilisation de la méthode	176
111.4	1.5) Lim	ites potenitelles de la méthode	176
CONCLUS	SIONS	DE LA PARTIE C	177

## INTRODUCTION

Dans cette partie, la propagation de la flamme est étudiée. Pour cela, le mélange obtenu, précédemment étudié en termes de concentration et de turbulence, est enflammé à l'aide d'un arc électrique. La propagation de la flamme est étudiée au sein de deux prototypes spécialement élaborés. Le premier est une simple adaptation du prototype précédemment utilisé pour l'étude de la mise en suspension de la poudre : l'adaptation consiste essentiellement à rendre possible l'inflammation du mélange. Le second prototype permet l'étude de la propagation de la flamme sur une hauteur plus importante. Ce dernier consiste en la mise en série de trois prototypes similaires à celui présenté auparavant. Les deux premiers étages permettant la mise en suspension de la poudre sur une hauteur plus importante. Le troisième étage, sans injection initiale de poudre, permet l'étude de la propagation de la flamme après la membrane déformable utilisée.

Lors de ces essais de propagation du front de flamme, l'étude du comportement de la flamme s'appuie sur deux types de mesures: des capteurs de surpression et des mesures optiques. Les mesures optiques seront détaillées dans la suite de ces travaux. La méthode permettant la détermination de la vitesse de combustion est alors présentée. Des études préliminaires sont aussi abordées afin de mettre en évidence certaines limites et recommandations à son utilisation.

Les essais réalisés permettent alors d'observer et de comprendre le phénomène de propagation au sein de nos deux prototypes. Des essais complémentaires sont réalisés afin de mettre en évidence certains phénomènes observés, notamment l'influence de la rupture de la membrane déformable sur la propagation de la flamme. Par la suite, l'influence de la turbulence sur la propagation du front de flamme est investiguée. Cette étude s'appuie sur les conclusions de la partie B portant sur la quantification du niveau de turbulence. En effet, afin d'obtenir des niveaux de turbulence différents, des délais entre la fin de l'injection et l'inflammation différents ont été choisis.

L'évolution de la vitesse de combustion au sein du prototype multi-étages est aussi étudiée. Cette vitesse est évaluée sur deux zones de 30 cm de hauteur par la technique optique d'ombroscopie (présentée par la suite). Des nouvelles limites potentielles de cette méthode de détermination de la vitesse de combustion sont alors mises en avant. Enfin, une nouvelle méthode de détermination de cette vitesse, basée sur une autre méthode optique est exposée : les résultats de premiers essais réalisés sont alors abordés. Dans cette partie, le matériel utilisé pour l'étude de la propagation est présenté. Tout d'abord, les deux prototypes utilisés lors des différents essais de visualisation de la propagation sont décrits. Ensuite, le générateur permettant de produire des arcs électriques, répétables et d'énergie mesurable, utilisé pour enflammer la suspension formée est exposé. Cette partie se termine par une description des capteurs de pression permettant une mesure physique de la surpression générée par la combustion.

#### I.1) LES PROTOTYPES D'ETUDE DE LA PROPAGATION

Deux prototypes ont été élaborés pour l'étude de la propagation de la flamme au sein de la suspension formée. Le premier est une adaptation du prototype présenté dans la partie B, permettant l'inflammation et la propagation de la flamme. Il sera par la suite nommé « prototype à un étage ». Le second est une adaptation de ce premier prototype, avec la mise en série de différents étages (semblables au premier prototype), afin d'étudier le phénomène de propagation sur une hauteur plus importante. Ce dernier sera nommé par la suite « prototype multi-étages ».

#### I.1.1) ADAPTATION DU PROTOTYPE POURS LES ESSAIS AVEC INFLAMMATION

Le premier prototype utilisé pour les essais de propagation est une adaptation du prototype présenté dans la partie sur l'étude de la mise en suspension des particules (Partie B). L'adaptation de ce prototype consiste notamment en la mise en place d'électrodes en bas de ce dernier, afin de permettre l'inflammation du nuage par un arc électrique. Le générateur permettant de produire des arcs électriques, ainsi que la mise en place des électrodes, sera décrit dans la partie I.2).

Le déroulement d'un essai avec inflammation, schématisé sur la Figure 89, est le suivant : la poudre est injectée dans le prototype avec le même système de suspension que celui précédemment étudié. Comme nous l'avons remarqué dans la partie B, la pression des réservoirs amont et la durée d'ouverture des électrovannes, notée  $t_{inj}$ , peuvent être modifiées. Le disque de rupture va alors se déformer, entraînant une augmentation du volume au sein duquel les particules sont mises en suspension. Après un délai ajustable (noté  $t_{mort}$ ), l'arc électrique va être produit entre les deux électrodes, entraînant l'inflammation du mélange poussières-air. La durée de l'arc, ajustable elle aussi, est notée  $t_{arc}$ . Pendant la propagation de la flamme, la membrane (disque de rupture) va s'ouvrir suite à la montée en pression au sein du prototype.



Figure 89: Schéma du déroulement d'un essai de propagation

Le disque de rupture est à membrane déformable, comme nous l'avons précédemment remarqué (partie B). Cela permet la mise en suspension de la poussière tout en limitant l'augmentation de la pression dans notre enceinte (augmentation du volume). En effet, cette membrane se gonfle pendant l'injection des particules. Le volume d'air injecté étant déterminé, la concentration en particules dans l'enceinte est ainsi connue. Cette membrane est choisie pour sa faible résistance à une augmentation de pression. Cette rupture de membrane intervient pour une pression aux alentours de 35 mbars, comme nous le verrons par la suite cette pression à la rupture est obtenue pour chaque essai à l'aide de capteurs de pression piézoélectriques (PCB M01). Ainsi, lors de son ouverture la pression au sein de l'enceinte est relativement faible et perturbe a priori peu la propagation de la flamme. En effet, il a été observé sur des tests réalisés avec une membrane non déformable, résistant plus fortement à la pression (pour ne pas s'ouvrir lors du processus d'injection de la poussière), une forte accélération de la flamme lors de l'ouverture de cette membrane.

#### I.1.2) MISE EN PLACE D'UN PROTOTYPE GRANDE ECHELLE

Un deuxième prototype a été élaboré afin d'étudier la propagation de la flamme sur une hauteur plus importante. Ce prototype permet alors de mieux comprendre les phénomènes observés sur le prototype à un étage. Ce dernier est composé de trois « étages » identiques à celui présenté dans la partie précédente. Il est schématiquement représenté sur la Figure 90. Les deux premiers étages permettent la mise en suspension de la poussière, alors que le troisième est un étage permettant la visualisation de la propagation, après la membrane déformable. Il est important de noter que tout le long de la propagation de la flamme aucune variation de section n'est présente : la surface permettant la propagation reste carrée de 15 cm de côté. Ainsi, l'embase séparant les deux premiers étages et le disque de rupture séparant les deux étages supérieurs ne présentent pas de rétrécissement de section de passage de la flamme.



Figure 90: Schéma du prototype multi-étages

Le déroulement d'un essai est le même que celui présenté précédemment. Cependant, la propagation de la flamme se poursuivra, et pourra être visualisée le long du troisième étage. La concentration en poussières est déterminée à partir de la masse totale injectée dans les deux étages, et du volume des deux étages auquel s'ajoute le volume résultant de la déformation de la membrane. Le troisième étage n'est pas pris en compte dans le calcul du volume car aucune poussière n'est présente dans le milieu en début d'essai. Le disque de rupture utilisé ici est différent du précédent. En effet, pour une même configuration d'injection, la quantité d'air injectée dans le prototype sera doublée (deux étages d'injection). Ainsi, le volume maximal de cette membrane doit être plus important. La rupture de cette dernière intervient à une pression d'environ 50 mbars. Comme précédemment, des capteurs de pression, décrits par la suite, permettent d'obtenir cette pression à la rupture de la membrane pour chaque essai réalisé.

Notre prototype est à base carrée. Or l'évacuation est un tuyau cylindrique, présentant la même surface que la base de notre prototype (225 cm<sup>2</sup>). Ainsi, afin de ne pas perturber l'écoulement en sortie de prototype, une jonction en «rond-carré » est utilisée. Le changement de forme est progressif sur une distance de 10 cm.

Chacun de ces étages permet la visualisation de la propagation de la flamme grâce aux faces latérales en verre. Cette visualisation est possible sur la majeure partie du prototype, néanmoins, certaines zones restent aveugles. Comme précédemment, une embase, pour permettre le passage des tubes d'injection, est présente à la base de notre prototype. De plus, une autre embase est positionnée entre le premier et le deuxième étage. Cette dernière permet l'accès des tubes d'injection permettant l'injection de la poussière au sein de l'étage supérieur. Pour rappel, chacune de ces embases est d'une hauteur de 4 cm. Enfin, le disque de rupture étant positionné sur un support, une zone de 8 cm de hauteur, située entre le deuxième et le troisième étage, ne présente pas d'accès optiques. Ainsi, sur ces trois zones, la propagation de la flamme ne peut être visualisée. Les zones ne permettant pas la visualisation de la propagation de la flamme ne sont représentées en noir sur la Figure 90.

#### I.2) LE GENERATEUR D'ARCS ELECTRIQUES

L'ignition de la poudre d'aluminium est réalisée par un arc électrique entre deux électrodes en tungstène. Les électrodes, d'un diamètre de 2,4 mm, sont espacées de 4 mm. Ces dernières sont positionnées à une hauteur de 13 cm de la base du prototype.

Pour l'ignition, un générateur d'arcs spécifique, fabriqué par la société EAA, est utilisé. Ce dernier est proche de celui utilisé par Baudry dans ses travaux de thèse (Baudry, 2007). Le principe de fonctionnement général est simple : un transformateur haute tension permet, par une différence de potentiel suffisante (20 kV), d'ioniser l'air présent entre les deux électrodes. Cela crée ce que l'on appelle un pré-arc. Cependant, seule une faible énergie est présente au sein de ce dernier, de l'ordre de 40 mJ pour une durée de 5  $\mu$ s (donnée du constructeur), ne permettant donc pas l'ignition de la suspension. A partir de ce pré-arc, faiblement énergétique mais ayant permis l'ionisation de l'air, l'arc principal va alors pouvoir être maintenu entre les électrodes par décharge de condensateurs. Le schéma de principe de cet inflammateur est présenté sur la Figure 91. Cette description est une vision simplifiée du fonctionnement réel de ce générateur d'arcs. Ce générateur permet d'obtenir un arc avec une intensité et une tension, et donc une puissance, quasi-constantes, pendant toute la durée de l'arc.

L'énergie de l'arc électrique peut être modifiée à partir de ce générateur. En effet, il est possible de modifier l'intensité de l'arc (2 A, 4 A ou 8 A) mais aussi sa durée (de 0,999 ms à 99,9

ms). Les évolutions de l'intensité et de la tension dans cet arc sont mesurées à partir de ce générateur, avec une fréquence d'acquisition fixée à 200 kHz. Ainsi, pour chaque essai, l'énergie apportée par l'arc est calculée et contrôlée. La Figure 92 présente un exemple de signal obtenu lors d'un essai, avec une intensité d'arc réglée à 8 A et une durée de 99.9 ms. L'énergie correspondante est alors de 13,2 J.



Figure 91: Schéma explicatif du principe de l'inflammateur



Figure 92: Evolution de la tension et de l'intensité dans l'arc électrique

#### I.3) LES CAPTEURS DE PRESSION UTILISES

Des capteurs de surpression sont utilisés afin de mesurer l'évolution de la surpression engendrée par l'explosion. Différents capteurs sont positionnés sur toute la hauteur de la propagation afin d'observer le mouvement des ondes de pression dans l'enceinte. Le positionnement des différents capteurs est schématisé sur la Figure 93. Les caractéristiques de chacun de ces capteurs piézoélectriques PCB sont résumées dans le Tableau 8. La fréquence d'acquisition de ces mesures est fixée à 200 kHz. Ces différents capteurs sont positionnés sur une plaque métallique: cette plaque métallique remplaçant alors une des faces vitrées. Ainsi, pour les essais avec mesure de pression, trois faces permettent la visualisation de la propagation.



Figure 93: Schéma de la mise en place des capteurs de pression : pour le prototype à 1 étage (à gauche) et pour le prototype multi-étages (à droite)

Sensibilité/ Capteurs	Prototype 1 étage (mbar/V)	Prototype multi-étages (mbar/V)
C1	6 939,6	691,6
C2	691,6	6 939,6
С3	-	651,5
C4	-	677,5
C5	-	6 747,6
С6	-	7 112,4

Tableau 8: Récapitulatif de la sensibilité des capteurs utilisés

# II) METHODES MISES EN PLACE POUR L'ETUDE DE LA PROPAGATION

Dans cette partie, les techniques de visualisation de la propagation sont tout d'abord présentées : la visualisation directe de la lumière émise par la flamme, ainsi que les méthodes d'ombroscopie et de schlieren permettant la visualisation des variations de densité au sein de l'écoulement. Par la suite, la méthode de détermination de la vitesse de combustion à partir des images obtenues est exposée. Dans cette partie, des études préliminaires sont aussi abordées : ces dernières permettent de mettre en évidence certaines limites de la méthode et d'apporter des recommandations pour son utilisation.

### II.1) METHODES OPTIQUES UTILISEES

#### **II.1.1) PAR VISUALISATION DIRECTE**

La visualisation directe de la flamme est une première méthode permettant d'obtenir des informations sur la propagation de cette dernière. Cette méthode consiste à enregistrer, à l'aide d'une caméra rapide, l'évolution de l'intensité lumineuse émise par la flamme.

Cette méthode permet d'observer directement l'intensité lumineuse de la flamme et ses variations. Si celles-ci sont très importantes, cela peut conduire soit à une saturation des images, soit à un manque d'illumination du capteur. Le réglage du couple (temps d'exposition/ ouverture du diaphragme) se fait donc en fonction du résultat attendu. Selon la plage de luminosité de la flamme, le capteur peut ne pas capturer l'entièreté du phénomène. Des problèmes de saturation des images obtenues peuvent entraîner des problèmes d'interprétation de la phénoménologie observée : cette limite sera abordée par la suite dans la partie II.2.3). Une deuxième limite, pouvant aussi entraîner des problèmes d'interprétation, est liée à la présence de particules (le combustible) en amont du front de flamme. Ces particules vont diffuser la lumière, issue de la flamme, dans toutes les directions, donc en direction de la caméra utilisée pour la visualisation directe. Cette partie lumineuse en amont de la flamme peut alors être interprétée comme appartenant à la flamme, alors qu'elle correspond à la lumière diffusée par les particules.

Une solution face à ces limites pourrait être de placer des filtres devant la caméra afin de limiter l'intensité lumineuse reçue par la caméra et donc sa saturation. Cependant, comme nous le verrons par la suite, la flamme d'aluminium présente un « caractère pulsatoire » en termes d'intensité lumineuse lors de sa propagation dans notre prototype (voir partie II.2.4)) : la flamme est successivement fortement puis faiblement lumineuse. Un tel phénomène de pulsations a déjà été observé dans la littérature comme exposé dans la partie A (avec les travaux de (Julien et al., 2015b) par exemple). En limitant l'intensité lumineuse, à l'aide de filtres par exemple, pour ne pas saturer la caméra aux instants où la flamme est très lumineuse, il est possible que cette caméra ne détecte plus la flamme aux instants où cette dernière est beaucoup moins lumineuse. Il est ainsi difficile d'obtenir une visualisation de qualité (pas de saturation et pas de « perte » de la flamme par la caméra) sur toute la propagation de la flamme.

Pour pallier ce problème, il est possible de régler un paramètre sur nos caméras (EDR (Extreme Dynamic Range) ou dual-slope, selon la caméra). Ce paramètre permet d'observer à la fois des zones plus lumineuses et des zones plus sombres, sans saturer ou « perdre » la flamme lors de sa propagation. Le principe de l'EDR est schématisé sur la Figure 94, et peut se comprendre de la façon suivante. L'intervalle de temps représenté schématise la durée du temps

d'exposition de la caméra. Pendant toute cette durée, le capteur de la caméra reçoit de la lumière : ainsi la valeur du niveau de gris de chaque pixel du capteur augmente. Le trait vert représente le cas d'une flamme « peu lumineuse ». Dans ce cas, pendant le temps d'exposition, le pixel reçoit de la lumière jusqu'à obtenir une valeur non-saturée. La courbe rouge représente le cas d'une flamme « trop lumineuse » devant la sensibilité du capteur et des paramètres optiques choisis. Dans ce cas, sans EDR, le pixel est saturé (valeur de niveau de gris égal à la valeur maximale) : une partie de l'information sur la luminosité est ainsi perdue. Avec l'EDR, si la valeur du pixel atteint un seuil déterminé en un temps relativement court, alors la valeur du pixel est diminuée afin qu'à la fin du temps d'exposition le pixel ne soit pas saturé. A la fin du temps d'exposition chaque valeur de niveau de gris de chaque pixel est remise à zéro.



Figure 94: Schéma explicatif du principe de l'EDR

Ces améliorations technologiques sont particulièrement utiles dans le cas des flammes d'aluminium. Leur utilisation laissant cependant certaines limites, deux autres techniques optiques sont mises en place. Cependant, il est aussi possible de considérer la flamme comme étant une zone de forts gradients de température, donc de forts gradients de densité. En optique, une modification de densité du milieu entraîne une modification de l'indice de réfraction, selon la relation de Gladstone-Dale :

$$n-1=K\,.\,\rho\tag{C2-1}$$

Avec n l'indice de réfraction,  $\rho$  la masse volumique et K une constante. Les deux méthodes présentées par la suite (ombroscopie et schlieren) permettent d'observer ces variations d'indice de réfraction. Ces méthodes sont exlicitées brièvement, en montrant l'intérêt de ces dernières pour l'étude de notre propagation de flammes. Pour plus d'éléments théoriques sur ces méthodes, le lecteur pourra se référer à (Settles, 2001)

#### II.1.2) PAR OMBROSCOPIE

L'ombroscopie permet de visualiser des variations d'indice de réfraction optique, lors du passage du front de flamme dans notre cas. En effet, la propagation de la flamme entraîne des variations de température au sein de l'écoulement. Ces variations de température entraînent des variations de densité, qui induisent des variations d'indice de réfraction. Ainsi, avec cette

méthode, le front de flamme est observé comme une zone présentant une variation de température. Cette méthode est sensible à la dérivée seconde spatiale de l'indice de réfraction.

La Figure 95 présente le principe général de cette méthode. L'objectif est de générer un faisceau de lumière parallèle traversant le milieu à étudier. Pour cela, une source de lumière est classiquement placée au point focal d'une lentille (ou d'un miroir parabolique). Après avoir traversé la zone d'étude, cette lumière est refocalisée afin de pouvoir observer les images obtenues sur un écran (ou à l'aide d'une caméra). Ainsi, en l'absence de variations d'indice de réfraction sur le chemin optique, l'écran est uniformément lumineux. Imaginons à présent la présence d'une telle variation au sein de l'écoulement étudié. Le rayon lumineux traversant cette variation va alors être dévié. Ainsi, lorsque le rayon sera refocalisé sur l'écran, une zone plus sombre (où le faisceau non dévié aurait intercepté l'écran) et une zone plus lumineuse (où le faisceau dévié a intercepté l'écran) seront observées.



Figure 95: Schéma de principe de l'ombroscopie

#### II.1.3) PAR SCHLIEREN

Le schlieren est proche de l'ombroscopie, puisqu'il permet aussi d'observer des variations d'indice de réfraction, en lien avec des variations de température. Cependant, contrairement à l'ombroscopie qui permet de visualiser la dérivée seconde de l'indice de réfraction, le schlieren permet d'accéder aux variations premières de l'indice de réfraction selon une unique direction.

La Figure 96 représente le principe général du schlieren. La mise en place expérimentale est proche de celle de l'ombroscopie. De même, une lumière parallèle traverse le milieu à étudier puis est refocalisée. La différence majeure avec l'ombroscopie est la présence d'un couteau au point focal objet. La mise en place de ce couteau détermine la direction de visualisation des gradients d'indice de réfraction et l'amplitude de la déviation.



Figure 96: Schéma de principe du schlieren

#### II.1.4) MISE EN PLACE EXPERIMENTALE

La mise en place des techniques d'ombroscopie et de schlieren avec nos essais présente deux difficultés principales. Tout d'abord, la source lumineuse choisie doit traverser le milieu à étudier afin d'observer les déviations des rayons. Or, le milieu d'étude est concentré en poussières d'aluminium. Une source de lumière puissante doit donc être employée.

La seconde difficulté est la présence de la flamme d'aluminium très lumineuse. En effet, cette dernière va émettre dans toutes les directions, donc aussi en direction de la caméra. Ainsi, la source lumineuse atténuée par la présence des particules et la forte luminosité issue de la flamme limitent la visualisation par ombroscopie ou schlieren : la déviation de la lumière parallèle n'est alors pas observée. Dans ce cas, seule la lumière issue de la flamme est réellement observée : la visualisation est alors plus proche de la visualisation directe que par ombroscopie ou schlieren.

Pour pallier ces difficultés, une source lumineuse plus puissante que la flamme dans une longueur d'onde sélectionnée est utilisée. Pour cela, une source laser continue (laser VERDI 5 W,  $\lambda$ =532 nm) est utilisée, couplée à un filtre passe-bande centré à 532 nm (+/- 10 nm). Seule la contribution lumineuse de la flamme autour de 532 nm est alors enregistrée par la caméra. Le montage optique utilisé pour réaliser la visualisation par ombroscopie et schlieren est un montage dit en Z, utilisant des miroirs paraboliques plutôt que des lentilles. Ce montage est représenté sur la Figure 97. La différence entre la visualisation par ombroscopie et par schlieren est la présence du couteau : lorsqu'un couteau est présent au point focal objet du second miroir parabolique, alors la technique schlieren est réalisée, sans le couteau, cela permet de visualiser l'écoulement par ombroscopie. Le filtre spatial, positionné à la sortie du laser, est composé d'un objectif de microscope 20X couplé à un pinhole de 10  $\mu$ m : ce dernier permet d'obtenir un faisceau laser divergent. Afin d'obtenir un faisceau de lumière parallèle, ce filtre spatial est placé au point focal d'un miroir parabolique de focale 254 cm. Disposant de miroirs paraboliques de 30 cm de diamètre, la visualisation par ces deux dernières techniques est réalisée sur des zones de 30 cm au maximum. Pour un même essai, avec le matériel à notre disposition, deux visualisations sur deux zones de 30 cm (60 cm de propagation au total) peuvent être réalisées. L'optimisation du montage est obtenue en minimisant autant que possible les angles d'incidence et d'émergence tout en respectant les contraintes d'encombrement autour de notre prototype.



Figure 97: Montage en Z utilisé pour les techniques d'ombroscopie et de schlieren

#### II.2) METHODE DE DETERMINATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION

A partir des images de propagation du front de flamme obtenues, la vitesse de propagation de ce dernier est déterminée : cela fait l'objet de la première sous-partie. Cette vitesse correspond à la vitesse de déplacement du front dans le référentiel du laboratoire. Cependant, cette vitesse dépend fortement du dispositif expérimental mis en place. Ainsi, une seconde vitesse, appelée la vitesse de combustion (liée à la vitesse de consommation des réactifs) est définie. Une méthode permettant la détermination de cette dernière est alors présentée. Enfin, différents aspects de cette méthode de détermination de la vitesse de combustion sont étudiés au travers de trois études préliminaires, réalisées à l'aide du prototype à un étage.

#### II.2.1) DETERMINATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION

Les techniques de visualisation décrites précédemment (visualisation directe, ombroscopie et schlieren) permettent l'observation de l'évolution du front de flamme au cours du temps. Cette évolution permet alors de déterminer l'évolution de la vitesse de propagation (vitesse de déplacement dans le référentiel du laboratoire).

Pour évaluer cette vitesse de propagation, le contour du front de flamme est extrait des images à l'aide d'un algorithme programmé à l'aide du logiciel Scilab: basé, selon les images, sur la méthode Canny (Canny, 1986) ou sur une méthode de seuillage. La détection de ce contour, bien qu'automatisée, reste tout de même arbitraire par le choix de paramètres au sein de ces algorithmes. A partir de ce contour de flamme, la position du front de flamme est déterminée. Elle correspond au point le plus haut du contour précédemment déterminé. A partir de l'évolution temporelle de la position du front de flamme, la vitesse de propagation est directement déterminée. Un exemple de contour est représenté sur la Figure 98: la courbe verte représentant le contour de flamme déterminé par l'algorithme, l'image de flamme étant obtenue par ombroscopie.



Figure 98: Contour de flamme détecté par l'algorithme

#### II.2.2) PRESENTATION DE LA METHODE DU TUBE OUVERT

Pour rappel, la vitesse de propagation (notée  $V_p$ ) correspond à la vitesse de déplacement du front de flamme par rapport au référentiel du laboratoire. Cette dernière étant fortement dépendante du prototype utilisé pour son étude, une deuxième vitesse est alors définie : la vitesse de combustion (notée *S*). Celle-ci correspond à la vitesse de consommation des réactifs par le front de flamme. Il s'avère important de la déterminer en vue d'une modélisation numérique du phénomène.

La méthode du tube ouvert est basée sur les travaux de Andrews et Bradley (Andrews and Bradley, 1972), et a déjà été utilisée pour l'analyse de résultats lors d'essais d'explosions de poussières (Cuervo, 2015; Di Benedetto et al., 2011). Elle permet de déterminer la vitesse de combustion à partir de la vitesse de propagation en se basant sur deux étapes principales.

La première étape prend en compte l'expansion thermique, les gaz brûlés étant moins denses que les gaz frais (réactifs). En effet, la flamme se propageant depuis la base du prototype, qui est fermée, vers la partie supérieure, les gaz brûlés vont pousser le front de flamme par expansion thermique. La vitesse de propagation sera donc plus importante que la vitesse de combustion. Ainsi, une première vitesse de combustion, notée ( $S'_u$ ), est déterminée en prenant en compte cet effet avec la relation suivante :

$$S'_u = \frac{V_p}{\chi} \tag{C2-2}$$

Avec  $V_p$  la vitesse de propagation et  $\chi$  le coefficient d'expansion thermique, calculé comme suit :

$$\chi = \frac{\rho_u}{\rho_b} \approx \frac{T_b}{T_u} \tag{C2-3}$$

Avec  $\rho_u$  et  $p_b$  les densités du mélange non-brûlé et du mélange brûlé respectivement,  $T_u$  et  $T_b$  les températures du mélange non-brûlé (température ambiante) et de la flamme (supposée adiabatique) respectivement. La température adiabatique de la flamme est calculée à l'aide du code de calcul « Chemical Equilibrum with Applications » (Gordon and McBride, 1994).

La seconde étape de cette méthode prend en compte la forme du front de flamme. En effet, la vitesse de combustion est généralement définie comme étant la vitesse de propagation d'une flamme plane. Or, une flamme plane est instable (Andrews and Bradley, 1972), elle va se déformer lors de sa propagation. La forme non-plane de ce front de flamme va alors augmenter la surface de contact entre les gaz non-brûlés et les gaz brûlés, augmentant le taux de combustion au niveau du front de flamme. La vitesse de propagation de cette flamme plissée sera alors plus importante que dans le cas d'une flamme plane. Une nouvelle vitesse de combustion, notée  $S_u$ , est déterminée à partir de la précédente vitesse de combustion ( $S'_u$ ) selon l'équation suivante :

$$S_u = \frac{A'}{A_f} \cdot S'_u \tag{C2-4}$$

Avec A' la projection de la surface de la flamme sur un plan horizontal et  $A_f$  l'aire de la surface 3D de la flamme.

Une difficulté majeure de cette méthode réside dans l'estimation de la surface 3D de la flamme à partir des images 2D du front de flamme obtenues. En effet, même si le contour de la flamme est extrait, une reconstruction unique en 3D de la flamme est impossible avec une seule vue 2D. La surface 3D de la flamme doit être approximée. La Figure 99 présente une méthode permettant d'approximer cette surface, extrait de (Kahlili, 2012). Cette méthode consiste à approximer le front 3D par des paraboles dans le plan perpendiculaire aux images obtenues. Pour cette méthode, le contour de la flamme est déterminé, à l'aide du même algorithme que celui utilisé pour estimer la vitesse de propagation. Ce contour est représenté en rouge sur la Figure 99. Ensuite, un cercle (en bleu sur la figure) est tracé à la base de ce contour. L'aire de ce cercle représente l'aire A' utilisée dans l'équation (C2-4). Enfin, les paraboles (en vert) reliant chaque point du contour au cercle bleu sont tracées. A partir de cette estimation de la surface 3D, l'aire  $A_f$  du front de flamme est calculée.



Figure 99: Méthode d'approximation de la surface 3D de la flamme, extrait de (Kahlili, 2012)

## II.2.3) ETUDE COMPARATIVE : ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA SATURATION DES IMAGES PAR VISUALISATION DIRECTE SUR LES RESULTATS DE VITESSE DE COMBUSTION

#### II.2.3.1)CONTEXTE DE L'ETUDE

L'étude des vitesses de propagation et de combustion avec cette méthode du tube ouvert nécessite en données d'entrée des images de visualisation de la propagation du front de flamme. Ces images sont par exemple obtenues avec la méthode de visualisation directe. Or, certaines images issues de la littérature sont saturées au niveau du front de flamme, comme celles représentées sur la Figure 100 issues de (Ding et al., 2010).



Figure 100: Images saturées obtenues par visualisation directe de la propagation d'une flamme de zirconium (Ding et al., 2010)

La question suivante se pose alors : la saturation des images influe-t-elle sur les résultats obtenus ? La Figure 101 présente à droite une image de propagation de flamme obtenue lors d'un essai. Cette image montre un front de flamme complexe, avec de multiples fronts derrière le premier. Il est possible par traitement numérique (augmentation numérique de la sensibilité) d'obtenir des images saturées, pouvant être rencontrées dans la littérature. On observe alors un front de flamme plus lisse et parabolique, ainsi qu'une erreur sur la détermination de la hauteur de la flamme dans le cas d'images très saturées. Des flammes saturées sont obtenues expérimentalement à cause de l'importante luminosité des flammes étudiées, notamment dans le cas de poudres métalliques.



Figure 101: Influence de la qualité des images sur l'analyse

Dans cette partie, une analyse comparative est présentée. Cette dernière vise à étudier l'influence de la qualité des images (saturation) sur les résultats obtenus (vitesses de propagation et de combustion).

Pour ces essais, la propagation du front de flamme est réalisée sur le prototype à un étage. L'injection de poudre est réalisée avec une pression des réservoirs amont de 2,5 bar et une durée d'ouverture des électrovannes de 800 ms. Le temps mort avant l'arc électrique (intensité : 4 A, durée : 100 ms) est de 750 ms après la fin de l'injection. La concentration en poussières obtenue est de 350  $g.m^{-3}$ .

Le front de flamme est étudié par visualisation directe, réalisée à l'aide d'une caméra rapide Photron SA3, munie d'un objectif Nikkor de focale fixe 105 mm. La résolution des images est de 1024x512 pixels, avec une fréquence de 3800 fps et un temps d'exposition de 2,5 µs. La zone d'étude est la zone située entre 30 cm et 60 cm depuis la base du prototype.

La Figure 102 représente les images analysées par la suite. En haut, les images brutes obtenues par la caméra sont correctement exposées, ces dernières ne sont pas saturées. En bas, les images ont été numériquement saturées. Ces images saturées sont proches d'images pouvant être rencontrées dans la littérature.



Figure 102: Images par visualisation directe de la propagation du front de flamme (Temps entre les images : 10 ms): a) Images non saturées b) Images saturées numériquement

#### II.2.3.2) RESULTATS OBTENUS

A partir de ces deux séquences d'images, issues de mêmes données brutes lors d'un même essai, les vitesses de propagation, puis les vitesses de combustion (déterminées par la méthode du tube ouvert présentée précédemment), sont comparées.

L'évolution de la hauteur du front de flamme au cours du temps, obtenue à partir du contour du front de flamme, est représentée sur la Figure 103. On observe que les tendances sont globalement similaires entre les deux types d'images. Quelques variations plus importantes sont observées localement au début de la propagation et autour de 30 ms. Ces variations sont dues à des difficultés à définir le contour de la flamme à ces instants-là, la flamme étant alors peu lumineuse. Après 35 ms, la propagation semble stabilisée pour les deux types d'images, avec une propagation essentiellement linéaire. Les images saturées semblent tout de même surestimer la position du front de flamme par moment : autour de 40 ms et autour de 50-55 ms. Ces instants correspondent aux moments où la flamme devient plus lumineuse (observation sur les images

non saturées), augmentant ainsi le niveau de saturation des images saturées et entrainant une surestimation de la position verticale du front de flamme. En effet, comme nous le verrons par la suite, la flamme, lors de sa propagation, présente un « caractère pulsatoire » de son intensité lumineuse.



Figure 103: Influence de la saturation des images sur l'évolution de la position du front de flamme

L'étude des vitesses de propagation et de combustion a été réalisée uniquement sur la partie linéaire, à partir de 35 ms. La Figure 104 présente les résultats de vitesse de propagation, déterminée à partir de la position du front de flamme. L'allure des courbes est proche. Cependant, les fluctuations de vitesse sont plus importantes avec les images saturées. Cette différence est liée au caractère pulsatoire de la flamme. Lorsque la flamme devient lumineuse, une surestimation de l'accélération de la flamme est observée avec les images saturées. La position du front de flamme est alors surestimée, entraînant, lorsque la flamme devient plus sombre, une sous-estimation de la vitesse de propagation.



Figure 104: Influence de la saturation des images sur l'évolution de la vitesse de propagation

Comme nous l'avons vu précédemment, afin de pouvoir estimer la vitesse de combustion à partir de cette vitesse de propagation, la surface 3D de la flamme doit être déterminée à partir de ces images. Le calcul de l'évolution de l'aire de cette surface 3D avec chacun des deux types d'images montre une sous-estimation de cette aire avec les images saturées de l'ordre de 10 à 20%. En effet, avec les images saturées, le front de flamme paraît plus lisse, moins complexe, donc la surface estimée est plus faible. Cette différence de surface de flamme entraîne une différence en termes de vitesse de combustion (voir équation (C2-4)). La vitesse de combustion est alors surestimée avec les images saturées : Figure 105. La vitesse de combustion moyenne, obtenue avec les images non-saturées, est de 21 cm/s, alors qu'elle est de 25 cm/s avec l'analyse basée sur les images saturées, soit une surestimation de cette vitesse de l'ordre de 19%. L'évolution du rapport entre les deux vitesses de combustion obtenues est représentée en vert.



Figure 105: Influence de la saturation des images sur l'évolution de la vitesse de combustion

#### II.2.3.3) CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Cette étude comparative a permis d'observer l'influence de la saturation des images obtenues par visualisation directe sur les résultats de l'analyse de la vitesse de propagation et de la vitesse de combustion (obtenue par la méthode du tube ouvert).

Tout d'abord, une surestimation de la hauteur du front de flamme à certains instants a été observée. Ces instants correspondent à une plus forte luminosité de la flamme, observée aussi sur les images non-saturées (caractère pulsatoire de la flamme). Cela a entraîné de plus fortes variations temporelles de la vitesse de propagation avec les images saturées, bien que les résultats soient proches.

L'estimation de la surface de la flamme, nécessaire afin de déterminer la vitesse de combustion par la méthode du tube ouvert, a montré une différence entre ces deux types d'images. Avec les images non-saturées, le front de flamme paraît complexe, alors qu'il paraît plus lisse avec la saturation. Ainsi, avec les images saturées, l'aire de la surface 3D estimée de la flamme est sous-estimée d'environ 10 à 20%. Cela entraîne alors une surestimation de la vitesse de combustion avec les images saturées.

En plus d'induire des biais dans les résultats de détermination des vitesses de propagation et de combustion, l'obtention d'images saturées peut aussi entraîner des erreurs d'interprétation. En effet, avec les images saturées la structure du front de flamme turbulent paraît lisse. Au contraire, avec les images non-saturées, le front de flamme apparaît beaucoup plus complexe et semble présenter différents fronts en plus du front principal.

# II.2.4) ETUDE COMPARATIVE : COMPARAISON DES METHODES OPTIQUES DE VISUALISATION DE LA PROPAGATION

Les limites de l'étude de la propagation du front de flamme par visualisation directe, due à une saturation possible des images, a été abordée dans la partie précédente. Pour pallier ces limites, deux autres techniques basées sur la visualisation des variations d'indice de réfraction (liées aux variations de température) sont utilisées.

La question suivante s'est alors posée : quelle est l'influence de la méthode de visualisation choisie sur les résultats, toujours en termes de vitesses de propagation et de combustion ? En effet, nous avons voulu vérifier que les résultats étaient indépendants de la technique choisie.

#### II.2.4.1)ESSAIS REALISES

Afin de comparer les résultats obtenus avec ces différentes techniques, ces dernières sont mises en œuvre simultanément sur des mêmes essais. Ainsi, pour chaque essai, trois caméras sont utilisées pour observer la propagation avec chacune une technique spécifique : visualisation directe, ombroscopie ou schlieren. Afin d'avoir des résultats comparables les zones de visualisation de chaque caméra sont les mêmes. Comme précédemment, pour ces essais, la propagation du front de flamme a été réalisée sur le prototype à un étage. Pour ces essais, la mise en suspension de la poudre est réalisée avec une pression des réservoirs amont de 2,5 bar et une ouverture des électrovannes de 800 ms. Après un délai d'attente de 750ms depuis la fin de l'injection de poudre, l'arc électrique, d'une intensité de 4 A et d'une durée de 100 ms, est produit entre les électrodes. La concentration en poussières obtenue est de 350  $g/m^3$ .

Le montage mis en place pour les techniques schlieren et ombroscopie est inspiré du montage en Z, cependant légèrement modifié pour s'adapter à l'encombrement de la salle utilisée pour cette étude comparative (Figure 106). En effet, la distance focale des miroirs paraboliques étant de 254 cm, deux miroirs plans doivent être utilisés pour limiter l'encombrement. Afin que les techniques schlieren et ombroscopie soient effectuées sur la même zone, un cube séparateur 50% est utilisé permettant de diviser la lumière issue du laser, et ayant traversé le prototype. Une caméra est utilisée afin d'observer la propagation sur la même zone d'étude par visualisation directe. La zone de visualisation est limitée par la taille des miroirs paraboliques : 30 cm. Des essais ont été menés afin de visualiser la propagation sur deux zones : 30 cm autour des électrodes et les 30 cm supérieurs du prototype. Il était possible de visualiser une seule zone par essai. Ce montage, avec l'utilisation de miroirs plans (miroir « première surface » pour ne pas perturber la qualité optique du faisceau laser), a été mis en place uniquement pour cette étude comparative.



Figure 106: Schéma du montage mis en place pour la visualisation par les 3 techniques optiques en simultanée

La caméra utilisée pour la visualisation directe (notée « Cam 1 » sur le schéma) est une caméra Phantom V2512, équipée d'un objectif 70-200 mm avec une ouverture fixée à f/32. La fréquence d'acquisition pour ces essais est fixée à 7500 fps, permettant d'obtenir une résolution de 1280x800 pixels, le côté le plus long étant positionné sur l'axe vertical. Le temps d'exposition est fixé à 2  $\mu$ s, avec un EDR de 1  $\mu$ s, pour les essais avec visualisation de la propagation sur la partie supérieure. Ce temps d'exposition est fixé à 5  $\mu$ s, avec un EDR de 2,5  $\mu$ s, pour la visualisation sur la partie inférieure (autour des électrodes). Ce changement de temps d'exposition est dû au caractère pulsatoire de la flamme lors de sa propagation (variation importante de son intensité lumineuse).

Pour les techniques d'ombroscopie et de schlieren, le laser utilisé est un laser continu cohérent VERDI à la puissance de 5 W, émettant à une longueur d'onde de 532 nm. Pour la technique schlieren, une caméra Phantom V711 est utilisée (notée « Cam 2 » sur le schéma). Pour celle d'ombroscopie une caméra Phantom V2512 est utilisée (notée « Cam3 » sur le schéma). Chacune de ces deux caméras est munie d'un objectif Tamron 70-300 fixé à une ouverture de f/4. La résolution de ces caméras est de 1280x800 pixels, avec une fréquence d'acquisition fixée à 7500 fps. Le temps d'exposition est de 5  $\mu$ s, avec un EDR de 2,5  $\mu$ s, pour ces deux techniques. Les paramètres d'acquisition sont résumés dans le Tableau 9.

Technique utilisée	Camera	Fréquence d'acquisition	Résolution (px)	Temps d'exposition*	Objectif (mm)	Ouverture
Visualisation directe	V2512	7500 fps	1280x800	2µs (1µs) : haut 5µs (2.5µs): bas	70-200	f/32
Ombroscopie	V2512	7500 fps	1280x800	5 μs (2.5 μs)	70-300	f/4
Schlieren	V711	7500 fps	1280x800	5 μs (2.5 μs)	70-300	f/4

Tableau 9: Synthèse des caractéristiques optiques des caméras utilisées

\*Le temps d'exposition est indiqué, avec entre parenthèse la valeur de l'EDR choisie

#### II.2.4.2) RESULTATS OBTENUS

La Figure 107 représente une séquence d'images obtenues pour chaque technique de visualisation, dans le cas d'un essai dont la zone d'intérêt est la partie inférieure du prototype (autour des électrodes). Les images obtenues sur la partie supérieure du prototype sont exposées sur la Figure 108. La sensibilité des images par visualisation directe a été adapté afin d'atténuer les variations d'intensité lumineuse pouvant être observes sur les images brutes. Ceci est autorisé en modifiant le nombre de bits affichable. Les images sont enregistrées en 12 bits

alors que l'affichage ne permet que 8 bits. L'utilisateur peut donc choisir les bits bas, moyens ou hauts lors de l'affichage et ainsi profiter de toute la dynamique d'acquisition.

Pour la propagation autour des électrodes deux phases sont distinguées. La première correspond aux premiers instants avec une propagation 3D dans toutes les directions de l'espace. Par la suite, lorsque la flamme atteint les parois de l'enceinte, la propagation devient plus unidirectionnelle, orientée vers le haut du prototype. Avec chaque méthode optique, le front de flamme semble complexe, plissé. De multiples fronts, derrière le front de flamme principal, sont observés.



Figure 107: Visualisation de la propagation autour des électrodes: a) par visualisation directe, b) par ombroscopie et c) par schlieren



Figure 108: Visualisation de la propagation dans la partie supérieure: a) par visualisation directe, b) par ombroscopie, c) par schlieren

A partir de ces différentes images, l'évolution de la hauteur de la flamme au cours du temps a été déterminée : Figure 109 (autour des électrodes) et Figure 110 (partie supérieure). Pour les deux zones de propagation étudiées, les courbes obtenues sont similaires pour chaque technique de visualisation. Pour la partie autour des électrodes (cf. Figure 109), l'évolution de la hauteur en fonction du temps est approximée par des polynômes de degré 2 : cela traduit une propagation à accélération constante. Le début de la propagation sur la partie supérieure suit cette même tendance de propagation.



Figure 109: Evolution de la hauteur de la flamme en fonction de la technique employée autour des électrodes

Par la suite (cf. Figure 110), la propagation du front de flamme s'accélère avant de ralentir, voire de s'arrêter, puis une nouvelle accélération est observée avant que la flamme ne quitte la zone de visualisation. A l'aide de la visualisation directe, on observe de fortes variations de la luminosité de la flamme : elle devient très lumineuse, avant de devenir très sombre (voire de ne plus être détectée par la caméra), puis redevient très lumineuse. Sur la Figure 110, ces variations d'intensité lumineuse ont été comparées à l'évolution de la position de la flamme. On observe alors un lien entre la forte luminosité de la flamme et l'accélération de cette dernière. Au contraire, lorsque la flamme ralentit, cet instant correspond avec une faible intensité lumineuse. Nous reviendrons sur ces phénomènes de pulsation de l'intensité lumineuse dans la partie résultats.



Figure 110: Evolution de la hauteur et de l'intensité lumineuse de la flamme en fonction de la technique employée dans la partie supérieure

Bien que les allures générales des courbes obtenues pour chaque méthode soient proches, la position du front de flamme par visualisation directe est plus basse que celle obtenue

par les méthodes d'ombroscopie et de schlieren. Dans le cas de ces deux dernières méthodes, les positions estimées du front de flamme restent proches. Pour essayer d'expliquer cette différence, il faut noter la différence majeure entre ces deux types de visualisation : la visualisation directe permet la visualisation de la lumière émise par la flamme, alors que les méthodes d'ombroscopie et de schlieren donnent accès aux variations d'indice de réfraction, notamment liées aux variations de température. Ainsi, le front obtenu par visualisation directe peut être associé à la zone de réaction, alors que le front obtenu par ombroscopie, ou par schlieren, semble correspondre à la zone de préchauffage. Ainsi, la différence entre ces deux fronts peut être interprétée comme étant liée à l'épaisseur de la zone de préchauffage. Cependant, cette valeur semble trop importante pour expliquer à elle seule cette différence. Une autre explication pourrait venir de la détection du front. En effet, avec les images obtenues par ombroscopie, le front de flamme est facilement identifiable. Au contraire, ce front de flamme est plus difficilement détectable avec les images de visualisation directe, notamment lorsque le front de flamme est facilement identifiable.

Les vitesses de propagation ont ensuite été déterminées à partir des données d'évolution de la hauteur : la Figure 111 correspond à la propagation autour des électrodes et la Figure 112 à la propagation dans la partie supérieure. L'allure générale des courbes est proche pour les trois techniques de visualisation. Dans le cas de l'étude autour des électrodes (cf. Figure 111), on observe que la propagation, en première approximation à accélération constante, est plus complexe. On observe bien une augmentation progressive de la vitesse. Cependant, cette progression n'est pas linéaire mais présente des variations : un caractère pulsatoire où accélérations et décélérations se succèdent.



Figure 111: Evolution de la vitesse de propagation en fonction de la technique employée autour des électrodes

Pour la propagation sur la partie supérieure (cf. Figure 112), une forte accélération du front de flamme est observée, la vitesse passant d'environ 2,5 m/s à plus de 8 m/s en environ 100 ms. La vitesse décroît alors jusqu'à devenir nulle : la flamme semble s'arrêter. Sur la Figure 108, cet instant correspond aux images à l'instant t=207,3 ms. Par ombroscopie et schlieren, le front de flamme apparaît alors plat, alors qu'il est très peu contrasté sur les images obtenues par visualisation directe. Cela explique aussi la vitesse de propagation devenant négative pour les images par visualisation directe : à cet instant le front de flamme est difficilement détectable.



Figure 112: Evolution de la vitesse de propagation en fonction de la technique employée dans la partie supérieure

Les vitesses de combustion ont par la suite été déterminées : la Figure 113 correspond à la propagation autour des électrodes et la Figure 114 à celle sur la partie supérieure du prototype. Cette vitesse a été calculée pour les techniques de visualisation directe et d'ombroscopie seulement. En effet, avec les images schlieren, les détails du front de flamme étaient difficilement détectables, notamment lors de la propagation 3D autour des électrodes (début de la propagation). Cette limite est notamment due au fait que cette technique est sensible aux variations d'indice de réfraction seulement selon un axe. L'allure générale des courbes reste proche. Une stabilisation de cette vitesse de combustion autour de 20 cm/s est observée avant l'accélération du front de flamme. Lors de la phase d'accélération, la vitesse de combustion augmente jusqu'à une valeur de l'ordre de 60 cm/s.



Figure 113: Evolution de la vitesse de combustion en fonction de la technique employée autour des électrodes



Figure 114: Evolution de la vitesse de combustion en fonction de la technique employée dans la partie supérieure

#### II.2.4.3) CONCLUSIONS DE L'ETUDE

Cette étude comparative visait à vérifier la cohérence des résultats, en termes de vitesse de propagation et de combustion, obtenus avec les trois types de visualisation : visualisation directe, ombroscopie et schlieren. Pour cela, sur chaque zone de visualisation et pour des mêmes essais, ces trois techniques ont été mises en œuvre.

Le front de flamme apparait plus bas sur les images de visualisation directe, comparé aux deux autres techniques. Cette première technique permet la visualisation de la lumière émise par la flamme (front lié à la zone de réaction) alors que les deux autres visualisent les variations d'indice de réfraction (front lié à la zone de préchauffage). Cette différence de hauteur entre ces fronts peut alors être expliquée par l'épaisseur de la zone de préchauffage. Cependant, cette différence semble trop importante pour être expliquée seulement par ce phénomène. Une autre explication réside dans la détection du contour. Le front de flamme sur les images obtenues par ombroscopie reste tout le long de la propagation facilement identifiable alors qu'il devient difficilement détectable par visualisation directe lorsque l'intensité lumineuse émise par la flamme diminue.

Malgré ces différences en termes de hauteur de flamme, les valeurs de vitesse de combustion et l'allure générale de l'évolution de cette dernière restent proches entre les méthodes de visualisation directe et d'ombroscopie. Cela justifie donc bien que chacune de ces deux techniques peut être utilisée pour déterminer la vitesse de combustion. Il est important toutefois de s'assurer que les images obtenues par visualisation directe ne soient pas saturées, comme nous l'avons précédemment remarqué dans la partie II.2.3).

Cette étude nous a aussi permis de dresser quelques recommandations quant à l'utilisation de ces différentes techniques pour visualiser la propagation du front de flamme. Tout d'abord, la technique schlieren ne semble pas adaptée. Sur les images obtenues, les détails du contour de flamme sont difficilement détectables, notamment lors de la propagation 3D de la flamme. L'ombroscopie permet de facilement identifier des détails sur le contour du front de flamme. De plus, cette technique permet aussi de visualiser différents fronts derrière le front principal. Elle semble donc la plus appropriée à l'étude de la vitesse de combustion. Avec la technique de visualisation directe, le front de flamme est difficilement détectable à certains instants, notamment à cause des fortes variations d'intensité lumineuse lors de la propagation. Ainsi, elle semble moins adaptée à l'étude de la vitesse de combustion comparée à la méthode d'ombroscopie. Elle représente cependant l'avantage de pouvoir estimer cette vitesse sur une plus grande hauteur (limitée dans le cas de l'ombroscopie par la taille des miroirs utilisés). Un autre avantage de cette technique de visualisation réside dans sa capacité à détecter les variations d'intensité lumineuse, contrairement à l'ombroscopie. Ces variations qui sont, comme nous l'avons vu, en lien avec les variations de vitesse de propagation de la flamme. Ces deux techniques de visualisation (visualisation directe et ombroscopie) sont donc pertinentes et complémentaires dans l'étude de la propagation de la flamme.

#### II.2.5) ETUDE COMPARATIVE : COMPARAISON D'IMAGES OBTENUES SELON DEUX PLANS PERPENDICULAIRES

#### II.2.5.1)CONTEXTE DE L'ETUDE

Le front de flamme, obtenu avec les différentes techniques optiques, est complexe, non parabolique. Une étape clé de la méthode de détermination de la vitesse de combustion consiste à évaluer la surface 3D de la flamme à partir des images 2D obtenues. Dans notre étude, cette estimation est réalisée en approximant le front à l'aide de paraboles. Au vue de la complexité du front, une question s'est alors posée : quelle différence, en termes de vitesse de combustion, obtient-on en visualisant le front selon deux plans différents ?

Une asymétrie est présente à cause de l'emplacement des électrodes au sein de notre prototype. La flamme a donc été visualisée, par visualisation directe, selon deux plans perpendiculaires entre eux. Ces deux plans sont représentés sur la Figure 115. Le plan en vert est le plan de visualisation parallèle au plan des électrodes. Dans ce cas, l'axe optique est perpendiculaire au plan des électrodes. Par la suite, pour simplifier la notation, ce plan sera appelé « plan parallèle ». Le plan jaune étant perpendiculaire au plan des électrodes, ce dernier sera noté « plan perpendiculaire » par la suite.



Figure 115: Schéma des zones de visualisation utilisées pour l'étude comparative

Ces essais sont aussi réalisés dans le prototype à un étage. Pour ces essais, la poudre est injectée avec une pression des réservoirs amont de 2,5bar et une durée d'ouverture des électrovannes de 800ms. L'arc électrique (intensité: 4A, durée: 100ms) est produit après un délai depuis la fermeture des électrovannes de 750ms. La concentration en poussières obtenue lors de ces essais est de  $280g/m^3$ .

Les images dans le plan parallèle sont obtenues avec une caméra Phantom V2512, celles correspondant au plan perpendiculaire sont obtenues avec une caméra Phantom V711. Pour les deux visualisations, un objectif Tamron 70-300 mm est utilisé. Pour le plan parallèle l'ouverture est fixée à f/32. Pour le plan perpendiculaire cette dernière est de f/16, les sensibilités des capteurs étant différentes. Pour les deux plans, la fréquence d'acquisition est de 7500 fps, permettant d'obtenir des images à une résolution de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 1µs avec un EDR de 0,5µs. Ces deux visualisations sont mises en place afin d'observer la propagation de la flamme selon deux plans différents au cours d'un même essai. La zone de visualisation s'étend de 33 cm à 60 cm depuis la base du prototype.

Les images obtenues, lors d'un même essai, selon ces deux plans de visualisation sont exposées sur la Figure 116. Les rectangles rouges correspondent aux zones extraites pour l'étude. En effet, à cause de la présence des tubes d'injection, seule la partie centrale obtenue sur les images perpendiculaires a pu être analysée. Afin d'obtenir des résultats comparables, une zone de même dimension, correspondant au centre de l'enceinte, a été extraite des images obtenues dans le plan parallèle.



t=131,6 ms



t=150,4 ms

t=155,2 ms



Figure 116: Images obtenues selon deux plans de visualisation: perpendiculaire (en haut) et parallèle (en bas)

#### II.2.5.2) RESULTATS OBTENUS

La Figure 117 représente l'évolution de la position du front de flamme pour chacun des deux plans de visualisation. Les courbes obtenues pour chaque plan se superposent. En effet, la position du front de flamme est définie par le point le plus haut du front détecté. Ainsi, cette position est indépendante du point de vue choisi pour la visualisation. La flamme semble dans

un premier temps se propager à vitesse constante. Par la suite, à partir de t=0,15 s, la flamme semble s'accélérer.

La Figure 118 représente l'évolution de la vitesse de propagation, obtenue à partir de la position du front de flamme, pour chaque plan de visualisation. L'allure des deux courbes obtenues est proche. Cependant, une différence est observée sur la valeur du maximum de la vitesse de propagation. Pour le plan perpendiculaire, ce maximum est de 15,3 m/s alors qu'il est égal à 16 m/s avec les images obtenues dans le plan parallèle. Cette différence peut s'expliquer par une difficulté à correctement définir le front de flamme à cet instant.



Figure 117: Evolution de la hauteur de la flamme en fonction du plan de visualisation



Figure 118: Evolution de la vitesse de propagation en fonction du plan de visualisation

Une étape clé pour la détermination de la vitesse de combustion à partir de la vitesse de propagation consiste à prendre en compte l'aire de la surface 3D de la flamme (notée  $A_f$  pour

rappel). Pour cette étape, le facteur correctif  $A'/_{Af}$  doit être déterminé, A' étant l'aire de la projection de la flamme dans un plan horizontal. Ainsi, afin de comparer la différence entre l'analyse réalisée avec chacun des deux plans de visualisation, le rapport entre les deux facteurs correctifs a été calculé :  $\frac{(A'/_{Af})_{parallèle}}{(A'/_{Af})_{perpendiculaire}}$ . L'évolution temporelle de ce rapport est exposée sur la Figure 119. Ce rapport reste globalement constant et égal à environ 0,9 jusqu'à t=0,15 s. Ce terme correctif est ainsi 10% moins élevé dans le cas du plan parallèle. A partir de t=0,15 s, correspondant à l'accélération du front de flamme, ce rapport chute jusqu'à une valeur de 0,5. A cet instant, dans le cas des images obtenues dans le plan perpendiculaire, le contour de la flamme devient moins profond, la flamme paraît alors plus « plane ». La surface de la flamme diminue dans ce cas, alors qu'il reste globalement constant dans le cas des images obtenues dans

le plan perpendiculaire, le rapport calculé diminue donc (cf. Figure 116).



Figure 119: Evolution du rapport des facteurs correctifs de la surface de la flamme obtenus pour chaque plan de visualisation

Cette différence au niveau des termes correctifs prenant en compte la surface de la flamme entraîne une différence en termes de vitesse de combustion : voir Figure 120. La vitesse de combustion est plus importante dans le cas du plan perpendiculaire, par rapport au plan parallèle. Jusqu'à t=0,15 s, cette différence est globalement constante, de l'ordre de 10%. Par la suite, cette différence devient plus importante, à cause de la différence en termes de surface de flamme. La vitesse de combustion moyenne, calculée jusqu'à t=0,15s, est 35,6cm/s dans le cas du plan perpendiculaire alors qu'elle est de 32,6 cm/s dans le cas du plan parallèle, soit une différence de 10% environ.


Figure 120: Evolution de la vitesse de combustion en fonction du plan de visualisation

## II.2.5.3) CONCLUSION DE L'ETUDE

Au cours de cette étude, l'influence du point de vue choisi pour la visualisation de la propagation sur les résultats de l'analyse de la vitesse de combustion a été étudiée. Pour cela, lors d'un même essai, deux caméras ont été utilisées afin d'observer la propagation de la flamme, par visualisation directe, selon deux plans perpendiculaires. L'aspect général des images obtenues était alors différent, traduisant ainsi la complexité de la flamme étudiée.

Pour chacun des deux plans de visualisation, les vitesses de propagation sont similaires. En effet, la vitesse de propagation est obtenue à partir de la détermination du point le plus haut du contour de flamme détecté. Ainsi, pour chaque plan de visualisation, ce point est commun.

Le terme correctif basé sur le rapport des surfaces, permettant d'obtenir la vitesse de combustion à partir de la vitesse de propagation, a par la suite été comparé entre les deux plans de visualisation. Une différence de l'ordre de 10% est obtenue pour les premiers instants. Cette différence augmente par la suite lors de l'accélération du front de flamme. Cette différence entraîne alors une différence, de l'ordre de 10% aussi, entre les vitesses de combustion obtenues pour chaque visualisation.

Cette étude met en évidence une nouvelle limite de cette méthode de détermination de la vitesse de combustion. Pour un même essai, selon le plan de visualisation, les résultats obtenus sont différents. Cela s'explique par la complexité du front étudié. Cette limite, mise en avant dans le cas d'images obtenues par visualisation directe, doit a priori aussi être présente avec les autres techniques de visualisation (ombroscopie et schlieren).

## III) RESULTATS

Dans cette partie, les résultats de l'analyse de la propagation de la flamme au sein des deux prototypes précédemment décrits sont présentés. Tout d'abord, l'étude générale du phénomène de propagation observé lors de différents essais réalisés est abordée. Ensuite, à l'aide des résultats de turbulence obtenus dans la partie B, l'influence du niveau de turbulence sur la propagation de la flamme est investiguée. Par la suite, l'évolution de la vitesse de combustion, obtenue à l'aide de la méthode du tube ouvert, est analysée. Enfin, une nouvelle méthode permettant la détermination de la vitesse de combustion, appelée par la suite « méthode directe » est abordée.

## III.1) ETUDE GENERALE DU PHENOMENE DE PROPAGATION

Dans cette partie, le phénomène de propagation de la flamme est étudié. Tout d'abord, ce phénomène est analysé lors d'essais réalisés à l'aide du prototype à un étage, utilisé dans la partie B pour l'étude de la mise en suspension de la poudre. Par la suite, des observations complémentaires, obtenues à l'aide du prototype multi-étages, sont exposées. Enfin, certains phénomènes observés sont mis en évidence expérimentalement.

III.1.1) OBSERVATION DE LA PROPAGATION A 1 ETAGE

Les résultats des tests effectués avec le prototype à un étage sont présentés ici. Tous ces résultats correspondent à une masse insérée dans chaque tube d'injection de 2,8 g. La pression des réservoirs amont est fixée à 4b avec une ouverture des électrovannes de 300 ms. Cela correspond alors à une concentration en poussières d'environ 480  $g/m^3$ . Le temps mort entre la fin de l'injection et le début de l'arc dure 1 s. L'intensité de l'arc électrique est fixée à 8 A et la durée à 100 ms.

La visualisation de la propagation du front de flamme sur toute la hauteur du prototype est effectuée à l'aide d'une caméra Photron SA3. La fréquence d'acquisition est fixée à 7500 fps, permettant ainsi d'obtenir une résolution de 1024x256 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 2  $\mu$ s. Cette caméra est munie d'un objectif 17-35 mm avec une ouverture choisie à f/22.

#### III.1.1.1) ANALYSE D'UN ESSAI REALISE

La Figure 121 représente l'évolution de la pression au niveau du capteur situé en haut du prototype. Certains instants sont notables et correspondent à des évènements spécifiques, représentés par des traits verticaux rouges sur le signal d'évolution de la pression. Pour bien comprendre la phénoménologie, les images obtenues correspondant à ces instants ont été extraites et sont exposées sur la Figure 122. Pour les deux premières images obtenues (a et b), une augmentation numérique de la sensibilité a été effectuée afin de visualiser correctement le front de flamme.

Tout d'abord, à t = 0 ms (image a), l'arc électrique est créé au niveau des électrodes. Ce dernier s'arrête après 100 ms (image b). A cet instant-là, la flamme a déjà commencé à se propager dans la suspension. Comme nous le verrons par la suite, le temps nécessaire pour commencer à propager la flamme au sein de la suspension est très variable entre les différents essais. Ainsi, il a été choisi de fixer une durée d'arc électrique de 1 s afin d'augmenter la probabilité d'inflammation du nuage. A partir de t = 150 ms, la pression dans l'enceinte augmente. Jusqu'à cet instant, la propagation de la flamme a entraîné un gonflement de la membrane déformable, par expansion thermique des gaz brûlés. Cependant, à cet instant,

l'augmentation de pression traduit le gonflement maximal de la membrane. A présent, la propagation de la flamme n'entraîne plus une augmentation de volume mais une augmentation de pression dans l'enceinte. A t = 175 ms, une baisse de pression est observée : cette dernière correspondant à la rupture de la membrane déformable. Comme nous pouvons le constater, la pression de rupture de la membrane est d'environ 50 mbar pour cet essai. Peu de temps après la rupture de la membrane (t = 177 ms), une augmentation de l'intensité lumineuse de la flamme est observée (image d'). A partir de t = 189 ms environ, une dépression est observée au sein de l'enceinte. Cela produit des jets de flammes provenant des tubes d'injection, comme nous pouvons l'observer sur l'image e. Ces jets peuvent correspondre à de l'apport d'oxygène ou à de l'apport de poussières au sein du prototype. Pour t = 212 ms, la flamme sort de la partie vitrée du prototype (image f). A cet instant, la pression dans l'enceinte est d'environ 40 mbar. Par la suite, la pression dans l'enceinte augmente jusqu'à atteindre une valeur de plus de 750 mbar (pour t = 233 ms). Ce pic de pression correspond à une flamme très lumineuse occupant la majeure partie de l'enceinte (figure g). La pression décroît jusqu'à une valeur de -354 mbar environ. La pression fluctue par la suite au sein de l'écoulement.



Figure 121: Evolution de la pression dans l'enceinte (capteur haut)



Figure 122: Images de propagation du front de flamme

A partir des images de propagation de la flamme sur toute la hauteur du prototype, dont certaines sont exposées sur la Figure 122, l'évolution de la propagation du front de flamme peut être analysée. Cette propagation est représentée sur la Figure 123, cette dernière n'étant représentée qu'à partir de t = 130 ms. En effet, comme nous l'avons précédemment remarqué, la flamme est peu lumineuse au début de la propagation, sa détection étant alors difficile. L'évolution de cette hauteur a été approximée par un polynôme de degré 2. Cette approximation, représentée en orange sur la figure, semble a priori convenable. Cette dernière traduit alors une propagation à accélération constante (augmentation linéaire de la vitesse). Cependant, le calcul direct de la vitesse de propagation (par dérivée de l'évolution de la hauteur de la flamme en fonction du temps) montre (courbe rouge sur la figure) un comportement plus complexe. Bien qu'une augmentation globale de la vitesse de propagation avec le temps soit observée, cette dernière présente de fortes fluctuations : enchainement d'accélérations et de décélérations.



Figure 123: Evolution de la vitesse de propagation de la flamme

L'évolution de cette vitesse de propagation a alors été comparée aux évolutions de la pression du capteur situé en haut du prototype et de l'intensité lumineuse de la flamme. Pour obtenir l'évolution de l'intensité lumineuse de la flamme, le niveau de gris moyen (obtenu en calculant la moyenne spatiale sur tous les pixels de l'image) est déterminé pour chaque image. La comparaison de ces différentes évolutions est représentée sur la Figure 124 : seules les évolutions de chacune de ces gradeurs avant que le front de flamme ne sorte du prototype sont représentées. On observe que chaque évolution présente un comportement similaire : à la fin du signal, une forte vitesse semblant correspondre à une forte intensité lumineuse et une forte montée en pression. De plus, cette figure permet d'observer que la forte accélération de la flamme à t = 180 ms environ, corrélée à une augmentation de l'intensité lumineuse de cette dernière, intervient juste après la rupture de la membrane déformable. Il semblerait donc que la rupture de cette dernière puisse perturber la propagation du front de flamme. Cette hypothèse fera l'objet d'une étude dans la suite de ce manuscrit (partie III.1.3.1)).



Figure 124: Comparaison de l'évolution de la vitesse de propagation, de l'intensité lumineuse de la flamme et de la surpression

#### III.1.1.2) REPETABILITE DU PHENOMENE OBSERVE

Différents tests ont été effectués avec cette même configuration expérimentale afin d'observer la répétabilité de la propagation observée. Tout d'abord, l'évolution de la hauteur du front de flamme en fonction du temps a été comparée (Figure 125). Pour rappel l'instant t = 0 ms correspond au début de l'arc électrique. Un retard entre les différentes courbes est observé : l'essai 10 nécessitant une propagation de plus de 250 ms avant d'atteindre le haut du prototype, alors que l'essai 6 atteint le sommet après 150 ms de propagation. Ce comportement semble majoritairement dû au phénomène de propagation autour des électrodes, ce dernier étant fortement influencé par les conditions d'injection de la poudre (concentration locale et niveau de turbulence). Cependant, pour une hauteur supérieure à environ 200 mm, les courbes semblent présenter un comportement plus proche. Concernant l'étude de la propagation du front de flamme, la donnée importante choisie est la vitesse maximale de propagation. La comparaison de ces essais en termes de vitesse maximale de propagation est indiquée dans le Tableau 10. Une variabilité de l'ordre de 18% est obtenue.



Figure 125: Répétabilité des essais en termes de propagation du front de flamme

Cette répétabilité peut aussi être quantifiée en termes d'évolution de la pression dans l'enceinte : la comparaison des essais ainsi obtenue est exposée sur la Figure 126. Sur cette figure, un même retard entre les essais est observé. De plus, une variabilité sur le pic de surpression est aussi obtenue. Cependant, il est important de rappeler que ce pic se produit lorsque le front de flamme est en dehors du prototype, dans la canalisation d'évacuation : le comportement du front de flamme à cet endroit n'est ainsi pas étudiable. Il a donc été choisi d'étudier l'évolution de la pression dans l'enceinte, seulement sur la période de temps où la flamme se propage dans l'enceinte. A partir de cette donnée d'évolution de la pression, deux données nous ont semblés importantes à étudier et à comparer entre les différents essais : la pression maximale ( $P_{max}$ ) et la vitesse de montée en pression maximale ( $\frac{dP}{dt}$ )<sub>max</sub>. La comparaison de ces essais en termes de  $P_{max}$  et de ( $\frac{dP}{dt}$ )<sub>max</sub> est indiquée dans le Tableau 10. Une variabilité de l'ordre de 18-19% est obtenue.



Figure 126: Répétabilité des essais en termes de surpression

Essai	6	10	11	19	20	Moyenne	Ecart- Type	Ecart
(dP/dt)max (bar/s)	4,0	3,6	5,4	4,8	5,5	4,7	0,9	18%
Pmax (mbar)	31,1	32,0	40,5	33,0	47,3	36,8	7,0	19%
Vmax (m/s)	13,9	9,0	13,8	12,6	10,7	12,0	2,1	18%

Tableau 10: Etude de la répétabilité des essais à 1 étage

#### **III.1.1.3)AUTRES PHENOMENES OBSERVES**

#### III.1.1.3.1) EXPLOSIONS LOCALES DE PARTICULES

Lors de différents tests, une zone plus restreinte a été visualisée, permettant ainsi d'observer plus finement la structure du front de flamme. Pour cela, une caméra Phantom V711 a été utilisée, à une fréquence d'acquisition de 7500 fps. La résolution était alors de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 1  $\mu$ s avec un EDR de 0.5  $\mu$ s. La caméra est munie d'un objectif Tamron 70-300 mm à une ouverture de f/16. La zone d'étude est une zone de 4,8cm x 7,7cm.

Un exemple d'images obtenues est représenté sur la Figure 127. Il est important de noter, que pour des raisons de visibilité, seule la partie des images correspondant à une zone de 3,4cm x 2,9cm est ici affichée. Le front de flamme paraît ici d'une part diffus et d'autre part contenir un grand nombre de particules isolées. La profondeur de champ de la zone de netteté étant ici limitée, seule une partie des particules présentes apparaissent nettes.



Figure 127: Observation de l'explosion d'une particule d'aluminium (temps entre images = 0.133 ms)

De plus, sur ces images, l'évolution d'une particule est observée, cette dernière est entourée en rouge sur les images exposées. On observe la particule devenir dans un premier temps de plus en plus lumineuse (Figure 127 a-b-c). Par la suite cette dernière explose en diverses particules de tailles plus fines (Figure 127 d-e). Ce comportement est en accord avec le mécanisme de combustion des particules d'aluminium exposé par (Puri, 2008), et déjà détaillé dans la partie A de ce manuscrit. En effet, lorsque la particule d'aluminium atteint la température d'ébullition de l'aluminium, le changement de phase de ce dernier peut alors entraîner une « explosion » des parties liquides restantes. Des explosions de particules d'aluminium ont aussi été observées par (Gao et al., 2017).

## III.1.1.3.2) PROPAGATION DE LA FLAMME AUTOUR DES ELECTRODES

Lors d'autres tests, une zone plus restreinte située au niveau des électrodes a aussi été visualisée. Cela permet alors d'observer le phénomène de propagation de la flamme lors du déclenchement de l'arc électrique. Pour cela, une caméra Phantom V711, munie d'un objectif Tamron 70-300, avec une ouverture fixée à f/11, a été utilisée. La fréquence d'acquisition est de 7500 fps, permettant ainsi d'obtenir une résolution de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 2 $\mu$ s avec un EDR de 1  $\mu$ s. La zone d'étude est une zone d'environ 20cm x 13cm.

Les images obtenues sont affichées sur la Figure 128. On observe, sur les images a-b-c, que l'arc électrique est perturbé par l'écoulement : la flamme oscillant de bas en haut. Par la suite, un nuage détaché de l'arc électrique se forme : images d-e. Enfin, la propagation se poursuit après l'arrêt de l'arc électrique (image f). L'image f' représente un zoom de l'image f, permettant d'observer des filaments rattachés à des particules isolées. Ces filaments sont probablement constitués d'aluminium (ou d'alumine) liquide. En effet, si ces derniers étaient composés de gaz majoritairement alors les particules exploseraient, comme observé précédemment a priori (température d'ébullition de l'aluminium atteinte). Ainsi, il semblerait que des filaments liquides se détachent des particules, à cause du mouvement d'air ascendant présent dans l'écoulement (expansion thermique).



Figure 128: Observation de la propagation de la flamme autour des électrodes

## III.1.1.3.3) ANALYSE DE LA POUDRE APRES INFLAMMATION

La poudre déposée en bas du prototype a été récupérée. Cette dernière a par la suite été analysée par les mêmes techniques expérimentales que celles présentées pour l'étude de la poudre initiale, avant ignition (partie B) : le granulomètre laser et le microscope électronique à balayage.

## ETUDE PAR GRANULOMETRE LASER

La poudre récupérée après un essai est plutôt compacte, agglomérée en gros morceaux. Ainsi, une étude avec le granulomètre laser par voie sèche ne permettrait pas de séparer ces blocs et ne permettrait donc pas d'accéder à la taille réelle des particules les constituant. Ainsi, une étude par voie humide, dans l'éthanol, a été préférée. La distribution granulométrique obtenue est présentée sur la Figure 129 : cette dernière n'est pas centrée autour d'un diamètre médian et présente plusieurs pics. Un premier pic est observé autour de 280 nm. Ce dernier semble correspondre aux particules d'alumine (les produits de combustion). Un autre pic est observé autour de 2-10  $\mu$ m pouvant correspondre à des particules d'aluminium partiellement oxydées. Un autre pic observé autour de 40  $\mu$ m pourrait correspondre à des agglomérats. Les diamètres caractéristiques de cet échantillon sont comparés aux échantillons analysés avant explosion (présentés dans la partie B) dans le Tableau 11. Le diamètre de Sauter de cet échantillon après inflammation est de 310 nm.



Figure 129: Distribution granulométrique de la poudre après explosion

Diamètre (µm)	<i>d</i> <sub>10</sub>	$d_{50}$	<i>d</i> <sub>90</sub>	D <sub>32</sub>
Fournisseur	4,0	6,5	10,5	-
Poudre A	4,0	7,5	12,7	4,65
Poudre B	3,43	6,66	12,2	5,57
Poudre après inflammation	0,12	0,52	14,5	0,31

Tableau 11: Diamètres caractéristiques de la poudre après inflammation

## ETUDE PAR MISCROPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Pour rappel, l'étude avec le microscope électronique permet d'obtenir des informations sur l'aspect de surface de la poudre obtenue mais aussi sa composition chimique. Les images de l'analyse au MEB de la poudre récoltée après un test sont exposées sur la Figure 130. Par comparaison aux images de poudre obtenues avant inflammation, ces images montrent des particules de plus faibles tailles. L'aspect de ces dernières reste a priori sphérique et lisse. Quelques particules de taille plus importante sont aussi observées.



Figure 130: Images de la poudre après explosion obtenues par MEB grandissement: 10000x (à gauche) et 50000x (à droite)

Une analyse chimique a aussi été effectuée sur cet échantillon récolté après l'explosion. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 12. Tout d'abord, il apparaît que la poudre après inflammation est plus oxydée. Dans ce dernier, les résultats obtenus sur les poudres A et B, présentés dans la partie B, avant ignition sont rappelés. Le terme « particule isolée » représente une particule isolée, de diamètre plus important du fond qui a été analysée indépendamment. Les particules isolées semblent être des particules partiellement oxydées : probablement les plus grosses particules initialement présentes dans la poudre. La conversion des données de la poudre après explosion en pourcentage molaire est intéressante. En négligeant la part de carbone et en s'intéressant donc uniquement aux quantités d'aluminium et d'oxygène présentes, les données en pourcentage molaire sont les suivants : 41,6% pour l'aluminium et 58,4% pour l'oxygène. Dans le cas de particules d'alumine pure ( $Al_2O_3$ ) ces pourcentages théoriques seraient : 40% pour l'aluminium et 60% pour l'oxygène. Ceci correspond donc à une combustion importante de la part d'aluminium initialement présente.

Echantillon	Poudre A	Poudre B	Poudre après explosion	Particule isolée
Al (% masse)	94.2	95.5	50.6	66.2
C (% masse)	3	2.5	7.2	6.9
0 (% masse)	2.7	1.9	42.2	26.9

Tableau 12: Résultats de l'analyse chimique effectuée au MEB sur la poudre après explosion

## III.1.2) OBSERVATIONS COMPLEMENTAIRES DANS LE PROTOTYPE MULTI-ETAGES

La visualisation de la propagation de la flamme dans le prototype à un étage a permis d'observer le comportement de cette dernière. Cependant, l'étude sur ce prototype soulève quelques questions. Tout d'abord, la flamme semble globalement avoir une accélération constante, présentant des fluctuations. De premières questions sont donc : cette flamme continue-t-elle de se propager à accélération constate ? Se stabilise-t-elle à une vitesse constante après une certaine période de propagation ? Le caractère pulsatoire de la flamme s'arrête-t-il ? De plus, le pic de surpression observé sur les essais avec le prototype à un étage intervient après la zone de visualisation, lorsque la flamme se trouve dans la canalisation d'évent. Ainsi, il apparaît intéressant de visualiser la flamme en aval du disque de rupture, afin d'observer le front de combustion au moment du pic de surpression. Pour répondre à ces différentes interrogations un prototype multi-étages, décrit dans la partie I.1.2) a été élaboré.

Les essais réalisés dans cette partie, au sein de ce prototype multi-étages, correspondent à une injection de poussières avec une pression des réservoirs amont de 2,5 bar et une durée d'ouverture des électrovannes de 800 ms. La concentration en poussières est de 320  $g/m^3$ environ. Après un délai de 1 s après la fin de l'injection, l'ignition est réalisée par un arc électrique d'une intensité de 8 A pendant une durée de 75 ms.

Dans cette partie, les résultats de propagation obtenus par caméra rapide, et ceux obtenus à l'aide des capteurs de surpression, sont analysés. Les images obtenues par caméra rapide permettent d'observer la propagation de la flamme sur toute la hauteur du prototype, c'est-à-dire sur les trois étages permettant la visualisation. Pour cela, une caméra Photron SA3 est utilisée. Au vu de la zone d'étude (hauteur importante mais faible largeur), une résolution de 1024x128 pixels a été utilisée, permettant ainsi une acquisition à 10 000 fps. Le temps d'exposition est fixé à 2  $\mu$ s. L'objectif utilisé est un objectif Nikkor 17-35 mm avec une ouverture fixée à f/16.

Dans cette partie, les résultats obtenus lors d'un essai sont analysés. La Figure 131 représente l'évolution de la pression dans l'enceinte au niveau du capteur bas. La Figure 132 expose les images obtenues aux instants correspondant aux traits verticaux rouges de la Figure 131. Sur l'image a, la croix rouge représente la localisation de l'arc électrique. Les deux bandes noires horizontales sur les images (Figure 132 i) représentent les zones inter-étages ne permettant pas l'observation de la propagation du front de flamme. Dans le domaine temporel, la localisation du front de flamme dans ces deux zones « invisibles » est représentée par les bandes grises sur la Figure 131. Ainsi, ces zones correspondent aux instants où le front de flamme n'est pas observable par la visualisation directe.



Figure 131: Evolution de la pression dans le prototype multi-étages



Figure 132: Images de propagation du front de flammes dans le prototype multi-étages

La première image (Figure 132 a) correspond au début de montée en pression dans l'enceinte. Comme précédemment, cela signifie que la membrane déformable est gonflée au maximum : la propagation ne se fait plus à pression constante, mais à volume constant (entrainant alors une augmentation de pression par expansion thermique). A t = 363 ms, le disque de rupture s'ouvre : entraînant une baisse de la pression. Par la suite, la flamme devient plus lumineuse (image c). La pression dans le prototype continue de baisser jusqu'à son minimum pour t = 392 ms (image d). Il est difficile de distinguer des jets sur cette image car la zone de visualisation est plus importante que précédemment. Autour de 401 ms après le début de l'arc, une nouvelle augmentation de pression est observée. L'image f correspond à l'entrée de la flamme au niveau de l'inter-étage supérieur : la zone où le disque de rupture était initialement positionné. Pour rappel, ce prototype permet la visualisation de la flamme après le disque de rupture (3<sup>ème</sup> étage de visualisation sans injection initiale de poudre). L'image g correspond à une image de la flamme après le disque de rupture. Ce front est flou car la membrane déformable brûlée se dépose sur la paroi vitrée et diffuse la lumière issue de la réaction de combustion. L'image h correspond à une image du front de flamme après la zone où la membrane s'est déposée sur la paroi : le front de flamme est alors mieux défini. Enfin, la dernière image correspond à la sortie du front de flamme de la zone de visualisation, à t = 425 ms.

Pour ces essais aussi, le front de flamme sort du prototype avant le pic de surpression. Ce dernier n'intervient donc pas juste après le disque de rupture mais plus en aval. Une explication de ce pic de surpression sera proposée dans la partie III.1.3.2).



Figure 133: Comparaison des évolutions de la surpression, de l'intensité lumineuse de la flamme et de sa vitesse de propagation

La Figure 133 permet de comparer les variations de pression, avec les variations de vitesse de propagation et d'intensité lumineuse observées. Tout d'abord, au moment de la rupture de la membrane déformable (autour de t = 360 ms), une accélération du front de flamme, associée à une légère augmentation de l'intensité lumineuse de la flamme, est observée. Par la suite, une forte accélération de la flamme est observée, associée à une augmentation de la luminosité de cette dernière. Une propagation de la flamme à vitesse plus constante est ensuite observée correspondant à une stabilisation de la luminosité. Enfin, une nouvelle accélération de la flamme, associée à une augmentation de la sortie du front de flamme du prototype, il semblerait que les variations d'intensité lumineuse restent associées aux variations de pression.

L'évolution de la hauteur du front de flamme avec le temps semble se décomposer en deux temps : avant et après la rupture du disque de rupture. En effet, après la rupture de ce dernier, la flamme commence à se propager plus rapidement. Une forte accélération du front de flamme est observée en sortie de prototype : la vitesse étant supérieure à 50 m/s à la sortie de la zone de visualisation.

#### **III.1.3) MISE EN EVIDENCE DE CERTAINS PHENOMENES**

Les essais présentés dans cette partie ont été réalisés afin d'étudier certains phénomènes spécifiquement. La première partie étudie l'influence du disque de rupture sur la propagation de la flamme. En effet, une accélération de la flamme a été observée au moment de la rupture de la membrane déformable. Ainsi, deux essais ont été réalisés sans disque de rupture. La deuxième partie étudie l'influence du coefficient de réflexion des parois sur la propagation du front de flamme. Pour cette étude, des feuilles de papier aluminium ont été déposées sur les parois en verre afin d'en modifier l'émissivité. Tous les tests présentés dans cette partie ont été réalisés avec les mêmes configurations d'injection au sein du prototype à un étage. La pression des réservoirs amont est de 4 bar et la durée d'ouverture des électrovannes est de 300 ms. La concentration en poussières est de 480  $g/m^3$ . Le délai entre la fin de l'injection de poussières et le début de l'arc électrique (intensité : 8 A, durée : 100 ms) est de 1 s.

## III.1.3.1) ETUDE DE L'INFLUENCE DU DISQUE DE RUPTURE

Deux essais ont été réalisés sans disque de rupture, afin d'observer si la rupture de ce dernier influe sur la propagation du front de flamme. Le résultat d'un essai en termes de propagation du front de flamme et de surpression est représenté sur la Figure 134. Sur le signal de pression, aucun pic d'une valeur de 50 mbar correspondant sur les tests précédents à une rupture de la membrane n'est observé. Seule une très légère augmentation de pression est observée lorsque le front de flamme sort du prototype : de l'ordre de 7 mbar. Dans la canalisation d'évacuation un pic de surpression est tout de même observé de l'ordre de 250 mbar. Par la suite, la pression montre encore un caractère pulsatoire, comme précédemment.



Figure 134: Evolution de la pression et de la propagation de la flamme lors d'un essai réalisé sans disque de rupture

L'évolution du front de flamme n'est aisément détectable que pour une flamme à une hauteur supérieure à 100 mm. La vitesse de propagation de cette dernière a alors été étudiée sur cette zone. La Figure 135 représente l'évolution de la vitesse de propagation en fonction de la hauteur du front de flamme au sein du prototype. Sur ce schéma, les résultats obtenus lors de tests réalisés avec et sans disques de rupture sont représentés. De plus importantes fluctuations de vitesse sont observées lors des tests réalisés avec disque de rupture. Il semblerait donc que la rupture de la membrane perturbe la propagation du front de flamme en accentuant le caractère pulsatoire de la flamme.



Figure 135: Evolution de la vitesse de propagation en fonction de la hauteur du front de flamme lors d'essais réalisés avec ou sans disque de rupture

Le Tableau 13 compare les paramètres utilisés dans chaque étude de comparaison obtenus lors des essais réalisés avec et sans disque de rupture. Lors des essais sans disque de rupture, la montée en pression au sein du prototype est plus faible. Concernant la vitesse maximale de propagation de la flamme, les valeurs obtenues restent relativement proches. Cependant, comme nous l'avons précédemment remarqué, la présence du disque de rupture entraîne de plus importantes fluctuations de cette vitesse. Par la suite, il serait donc préférable de faire les essais sans disque de rupture afin de ne pas perturber la propagation de la flamme. Pour rappel, ce disque permet de contrôler la concentration de la suspension formée, en déterminant le volume total. L'utilisation de sonde à extinction lumineuse pourrait permettre de contrôler cette mise en suspension en déterminant la hauteur du nuage formé, pour les essais réalisés sans disque de rupture.

Avec disque de rupture	Moyenne	Ecart- Type	Ecart	Sans disque de rupture	Moyenne	Ecart- Type	Ecart
(dP/dt)max (bar/s)	4,7	0,9	18%	(dP/dt)max (bar/s)	0,4	0,1	29%
Pmax (mbar)	36,8	7,0	19%	Pmax (mbar)	3,1	3,7	119%
Vmax (m/s)	12,0	2,1	18%	Vmax (m/s)	9,0	0,9	9%

Tableau 13: Influence du disque de rupture sur les paramètres de comparaison

### III.1.3.2) ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'EMISSIVITE DES PAROIS

Cette étude porte sur l'influence de l'émissivité des parois de l'enceinte utilisée sur la propagation du front de flamme. En effet, lors des essais réalisés avec un étage ou avec le prototype multi-étages, le pic de surpression s'est toujours produit dans la canalisation d'évacuation. Or cette dernière est en acier galvanisé, contrairement aux parois du prototype qui sont en verre. La flamme d'aluminium émet principalement dans le visible. Dans cette gamme, l'acier galvanisé présente un fort coefficient de réflexion alors que le verre présente un fort

coefficient de transmission. Ainsi, l'hypothèse présentée ici est que la différence de coefficient de réflexion entre l'acier galvanisé et le verre entraîne l'accélération de la flamme.

Des tests ont été effectués en fixant du papier aluminium sur les parois du prototype, afin d'augmenter leur émissivité. Le Tableau 14 présente les configurations expérimentales de chacun des tests effectués. La face en acier correspond à la face avec les capteurs de surpression. Pour le test « 2 faces » du papier aluminium est déposé sur cette plaque en acier avec une ouverture au niveau des deux capteurs de surpression. Lors de tous ces tests, aucun disque de rupture n'est positionné au sommet du prototype, afin de limiter la surpression au sein du prototype par mesure de sécurité.

Intitulé du tes	0 faces	1 face	2 faces
Nombre de faces en verre	3	2	2
Nombre de faces en acier	1	1	0
Nombre de faces en aluminium	0	1	2

Tableau 14: Configurations des essais d'influence de l'émissivité des parois

La Figure 136 présente l'évolution de la pression lors de ces essais : seule l'évolution de la pression lorsque le front de flamme est dans le prototype est affichée. Une augmentation de la pression dans l'enceinte est observée avec l'augmentation du nombre de faces en aluminium. Un caractère pulsatoire est observé, plus facilement identifiable dans le cas de l'essai avec 2 faces en aluminium : la pression étant plus élevée.



Figure 136: Evolution de la pression dans l'enceinte en fonction du nombre de parois en aluminium

La Figure 137 présente l'évolution de la vitesse de propagation au cours du temps pour les essais réalisés. Le test réalisé avec 1 face en aluminium présente une vitesse de propagation, en sortie de prototype, plus faible que celle obtenue avec aucune face en acier galvanisé. Cette différence est potentiellement due à la reproductibilité des essais et non pas à une conséquence physique. Une vitesse de propagation plus importante est obtenue avec deux faces en acier, cette dernière peut a priori s'expliquer par le changement d'émissivité de la paroi. Cette différence entre le passage d'une face à deux faces en acier s'explique par les pertes thermiques. L'effet avec une face est négligeable mais devient important lorsque deux faces opposées réfléchissent le flux thermique.



Figure 137: Evolution de la vitesse de propagation de la flamme en fonction du nombre de parois en aluminium

L'évolution des paramètres de comparaison utilisés lors des études en fonction du nombre de parois en aluminium est résumée sur la Figure 138. Ainsi, il semblerait qu'une augmentation de l'émissivité des parois entraîne une modification de la propagation du front de flamme : cette dernière devenant plus rapide. Cette étude a été réalisée lors d'essais de propagation de poussières d'aluminium, et devrait a priori aussi s'adapter aux autres poussières métalliques. Cependant, il serait intéressant de réaliser des essais complémentaires afin d'observer si de mêmes conclusions peuvent être obtenues avec une flamme de prémélange gazeux et une flamme de poussières organiques combustibles. En effet, si l'accélération de la flamme est moins influencée par l'émissivité des parois dans ces deux derniers cas, cela pourrait alors s'expliquer par la différence de type de transfert thermique influant sur la propagation. En effet, il semblerait que le transfert thermique par rayonnement est plus important lors d'explosions de poussières que lors d'explosions de gaz. La contribution du rayonnement thermique dans la vitesse de propagation du front de flamme est peut-être même plus importante encore dans le cas de poussières métalliques. Ainsi, ces essais complémentaires sont indispensables pour valider ces conclusions.

Au vue de cette étude, certaines conclusions en termes de sécurité et de modélisation peuvent être tirées. Tout d'abord, pour les essais présentés ici, il semblerait que remplacer le conduit d'évacuation par un matériel moins émissif permettrait de limiter la surpression au sein de notre prototype, permettant des essais avec des concentrations plus élevées. Sur le plan numérique, cette étude montre la grande importance des conditions aux limites utilisées en termes d'émissivité, et donc de pertes thermiques au milieu environnant. Sur le plan théorique, une propagation de flamme dans un tube métallique réfléchissant s'approche plus du cas d'une propagation au sein d'un nuage d'aluminium, comparé au cas d'une propagation dans un prototype en verre (pertes thermiques importantes). En effet, la vitesse de combustion déterminée dans un tube en verre sera donc a priori différente de celle obtenue au sein d'une suspension. Enfin, sur le plan de la sécurité industrielle, l'utilisation de conduits d'évacuation ayant une forte émissivité (acier galvanisé utilisé pour les ventilations par exemple) est à éviter. En effet, dans le cas d'une flamme se propageant dans un tel conduit, cette canalisation entraînera alors l'accélération de la flamme et des effets de surpression plus importants.



Figure 138: Evolution des paramètres de comparaison en fonction du nombre de parois en aluminium

## III.2) ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TURBULENCE SUR LA PROPAGATION DU FRONT DE FLAMMES

Dans cette partie, l'influence de la turbulence du mélange au moment de l'ignition sur la propagation de la flamme est étudiée. Cette étude se base sur les résultats obtenus dans la partie B portant sur la dispersion des particules dans l'enceinte. En effet, comme nous l'avons remarqué en conclusion de cette partie B, la configuration d'injection correspondant à une pression des réservoirs de 4bar et une durée d'ouverture des électrovannes de 300ms permet d'obtenir des niveaux de turbulence plus élevés. De plus, afin d'obtenir un bon compromis entre degré d'homogénéité et niveau de turbulence, il avait alors été choisi de fixer les délais entre la fin de l'injection des particules et le début de l'arc à 600 ms et 1 s. L'inflammation avec un délai de 600 ms correspond à une turbulence de 41 cm/s alors qu'un délai de 1 s avant inflammation entraîne un niveau de turbulence de 21 cm/s.

Les paramètres optiques utilisés pour la visualisation de la propagation du front de flamme sont les mêmes que ceux présentés à la partie III.1.1). 5 essais ont été analysés avec un délai d'inflammation de 1 s et 6 essais avec un délai de 600 ms. Tous ces essais ont été réalisés dans le prototype à un étage.

Les résultats en termes d'évolution de la pression et de la vitesse de propagation sont présentés dans le Tableau 15 pour chacun des essais réalisés. Le Tableau 16 expose les valeurs moyennes et les écart-types de ces paramètres pour les deux configurations étudiées : délai d'inflammation de 600 ms et de 1 s. Au vue de la répétabilité des essais, aucune influence majeure de l'intensité de la turbulence initiale ne peut être observée. Ainsi, l'intensité de la turbulence ne semble pas influer grandement sur la propagation du front de flamme dans la gamme étudiée : cette dernière variant de 21 cm/s à 41 cm/s. Ces niveaux de turbulence étudiés sont relativement faibles et proches. Ainsi, aucune variation significative, devant la répétabilité des essais, ne peut être observée. Ces niveaux de turbulence ont été choisis afin d'obtenir une suspension relativement homogène au moment de l'ignition, entraînant ainsi des délais correspondant à de faibles niveaux de turbulence. Il serait intéressant d'envisager d'autres systèmes d'injection de la poussière permettant d'obtenir un mélange homogène en termes de concentration mais avec des niveaux de turbulence initiale plus élevés.

Délai avant inflammation	Essai	Pmax (mbar)	(dP/dt)max (bar/s)	Vmax (m/s)
	1	31,2	4,0	13,9
	2	32,0	3,6	9,0
<b>1</b> s	3	40,5	5,4	13,8
	4	33,0	4,8	12,6
	5	47,4	5,5	10,7
600 ms	1	24,2	3,2	14,0
	2	45,1	5,5	13,9
	3	37,6	3,6	11,2
	4	44,4	3,6	8,8
	5	47,4	4,8	11,4
	6	34,3	4,3	11,4

Tableau 15: Résultats de pression et de vitesse de propagation obtenus pour les différents essais réalisés

Tableau 16: Influence de l'intensité de la turbulence sur les paramètres de comparaison

600 ms	Moyenne	Ecart- Type	Ecart	<b>1</b> s	Moyenne	Ecart- Type	Ecart
(dP/dt)max (bar/s)	4,1	0,8	20%	(dP/dt)max (bar/s)	4,6	0,8	18%
Pmax (mbar)	38,8	8,7	22%	Pmax (mbar)	36,8	7,0	19%
Vmax (m/s)	13 ,5	4,3	32%	Vmax (m/s)	12 ,0	2,1	18%

## III.3) ETUDE DE LA VITESSE DE COMBUSTION

Dans cette partie, la vitesse de combustion est étudiée : pour rappel, cette vitesse correspond à la vitesse de consommation des réactifs par le front de flamme. Cette vitesse sera déterminée par la méthode du tube ouvert présentée dans la partie II.2.2). Cette méthode nécessite, comme nous l'avons déjà remarqué, la détermination de l'aire de la surface 3D de la flamme. Il a été conclu dans la partie II.2.4) qu'une telle détermination est plus aisément réalisable à l'aide d'images obtenues par la méthode d'ombroscopie.

## III.3.1) ESSAIS REALISES

Les essais présentés dans cette partie ont été réalisés dans le prototype multi-étages. Pour ces essais, la pression des réservoirs amont est de 2,5 bar avec une durée d'ouverture des électrovannes de 800 ms. La concentration en poussières est de 320  $g/m^3$ . Après un délai de 1s, l'arc électrique est généré (intensité : 8 A, durée : 75 ms).

La vitesse de propagation globale de la flamme sur toute la hauteur du prototype est obtenue à partir d'une caméra Photron SA3 par visualisation directe. La résolution de la caméra est fixée à 1024x256 pixels permettant d'obtenir une fréquence d'acquisition de 10000 fps. Le temps de pause est fixé à 2  $\mu$ s. L'objectif est un objectif 17-35 mm avec une ouverture choisie à f/16.

Un montage optique a été mis en place afin d'effectuer deux visualisations d'ombroscopie sur deux zones différentes lors d'un même essai. Pour rappel, le montage d'ombroscopie mis en place est décrit dans la partie II.1.4). Les deux zones de mesure correspondent au 30cm supérieurs de chacun des deux étages d'injection. La zone de visualisation de 30cm est fixée par la taille des miroirs paraboliques utilisés. Chacun des deux montages d'ombroscopie est constitué d'un laser continu VERDI ( $\lambda$ =532nm) d'une puissance fixée à 2W. Pour rappel, pour chaque montage d'ombroscopie, un filtre spatial et deux miroirs paraboliques sont aussi utilisés. Enfin la visualisation est effectuée sur chaque ligne d'ombroscopie par une caméra rapide munie d'un filtre passe-bande (532nm +/- 10nm).

La caméra utilisée pour la visualisation par ombroscopie sur la partie supérieure du premier étage d'injection est une caméra Phantom V2512. La fréquence d'acquisition de cette dernière est fixée à 22500fps, correspondant à une résolution maximale de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 2µs avec un EDR de 1µs. L'objectif utilisé est un objectif Tamron 70-300mm avec une ouverture choisie à f/4.

La visualisation par ombroscopie sur la partie supérieure du deuxième étage est effectuée avec une caméra Phantom V711. La fréquence d'acquisition de cette dernière est fixée à 7500fps avec une résolution de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est de 4 $\mu$ s avec un EDR de 2 $\mu$ s. L'objectif utilisé est un objectif Tamron 70-300mm avec une ouverture choisie à f/4.

Les paramètres de ces trois caméras sont résumés dans le Tableau 17.

Technique utilisée	Camera	Fréquence d'acquisition	Résolution (px)	Temps d'exposition*	Objectif (mm)	Ouverture
Visualisation directe	SA3	10000 fps	1024x256	2µs	17-35	f/16
Ombroscopie Etage 1	V2512	22500 fps	1280x800	2 μs (1 μs)	70-300	f/4
Ombroscopie Etage 2	V711	7500 fps	1280x800	4 μs (2 μs)	70-300	f/4

Tableau 17: Synthèse des caractéristiques optiques des caméras utilisées

## III.3.2) RESULTATS OBTENUS

Les images obtenues à l'aide des différentes méthodes optiques mises en place lors d'un essai sont représentées sur les figures suivantes : Figure 139 (visualisation directe), Figure 140 (ombroscopie au niveau du premier étage) et Figure 141 (ombroscopie au niveau du deuxième étage). Pour les images par visualisation directe, les instants caractéristiques sont affichés ici. Ainsi, le temps entre le début de l'arc électrique et chacune des images est indiqué sous les images et le temps entre deux images peut varier. Par ailleurs, la sensibilité de ces images a été modifiée pour l'affichage : en effet, à cause de la variation d'intensité lumineuse de la flamme, une telle modification était nécessaire pour rendre possible la visualisation de la flamme tout au long de sa propagation.



Figure 139: Images de propagation de flamme obtenues par visualisation directe

Pour rappel, sur les images d'ombroscopie, le front observé correspond aux variations de température au passage du front de flamme. Le front de flamme obtenu sur chacune de ces images paraît complexe. De plus, des fronts secondaires peuvent être observables en-dessous du front principal. Ces fronts secondaires pourraient alors correspondre à des zones de combustion locale au sein de la flamme principale. Le front de flamme principal est globalement identifiable sur chacune des images obtenues au niveau du premier étage (Figure 140). Sur la Figure 141, le front de flamme est plus difficilement identifiable sur les dernières images : en effet, ce dernier est moins contrasté. Ces deux derniers affichages d'images sont obtenus en modifiant numériquement les niveaux de gris obtenus par la caméra. En effet, un léger défaut d'alignement du laser avec les miroirs paraboliques au niveau du second étage peut être responsable d'une luminosité plus faible sur la partie supérieure de la zone de visualisation. Ainsi, les images obtenues sont moins contrastées dans cette zone.



Figure 140: Images de propagation de la flamme obtenues par ombroscopie sur la partie supérieure du premier étage (temps entre images: 9,78ms)



Figure 141: Images de propagation de la flamme obtenues par ombroscopie sur la partie supérieure du deuxième étage (temps entre images: 1,87ms)

La Figure 142 représente l'évolution du front de flamme au cours du temps obtenue avec les trois méthodes optiques mises en place. Tout d'abord, les évolutions observées par les mesures par ombroscopie sont en accord avec celles obtenues par visualisation directe. De plus, on observe que les deux zones de visualisations par ombroscopie correspondent à deux zones de vitesse de propagation différentes : la vitesse de propagation étant nettement supérieure au niveau de l'étage 2. Ceci est en effet en accord avec les résultats précédemment exposés.



Figure 142: Comparaison de la propagation obtenue par visualisation directe et par ombroscopies

L'évolution de la vitesse de propagation au cours du temps, obtenue par la méthode de visualisation directe pour les trois tests étudiés par la suite, est représentée sur la Figure 142. Les comportements observés pour chacune des courbes sont similaires. Ainsi, il semblerait logique a priori que l'étude de la vitesse de combustion réalisée avec les images obtenues lors de chacun de ces essais donne des résultats similaires.



Figure 143: Evolution de la vitesse de propagation obtenue par visualisation directe

L'évolution de la vitesse de combustion obtenue pour chacun des tests et chacune des deux zones de visualisation par ombroscopie est représentée sur la Figure 144. Les évolutions obtenues entre les essais sont proches. Une forte augmentation de la vitesse de combustion est observée entre les deux zones de visualisation pour chaque essai. Pour la zone correspondant à la partie supérieure du premier étage, la vitesse de combustion est de l'ordre de 0,2-0,8m/s, alors que cette dernière est de l'ordre de 1,4-2m/s sur la partie supérieure du deuxième étage. De plus ces fluctuations semblent être associées aux fluctuations de vitesse de propagation observées par visualisation directe.



Figure 144: Evolution de la vitesse de combustion obtenue sur les deux zones de visualisation par ombroscopie

## IV.3.3) CONCLUSIONS/LIMITES POTENITELLES DE LA METHODE

La vitesse de combustion a été déterminée par la méthode du tube ouvert. Cette méthode nécessite la détermination de l'aire de la surface 3D de la flamme. Or cette flamme est observée sur un plan 2D. Ainsi, comme nous l'avons remarqué dans la partie II.2.5), cette détermination est compliquée et peut présenter certains biais dans le cas de flammes turbulentes (front de flamme complexe). Ainsi, des imprécisions peuvent apparaître dans la détermination de la vitesse de combustion.

De plus, une limite intrinsèque de la méthode, au vu des flammes obtenues lors de nos essais, apparaît. En effet, cette théorie de la méthode du tube ouvert s'appuie sur l'hypothèse d'un front de flamme d'épaisseur constante se déplaçant dans le milieu. Ce front est alors poussé par expansion thermique des gaz brûlés. Cet effet est corrigé en prenant en compte le facteur d'expansion thermique. Or, ce facteur est supposé constant pendant toute la propagation de la flamme au sein du prototype : ce dernier étant déterminé par la température du mélange non-brûlé (température ambiante) et de celle des gaz brûlés (température adiabatique de flamme). Tout d'abord, une première limite apparait en prenant en compte une température adiabatique de flamme alors que celle-ci se déplace dans une conduite en verre. En effet, comme nous l'avons précédemment remarqué dans la partie III.1.3.2), la propagation de la flamme est influencée par l'émissivité des parois de la conduite dans laquelle elle se propage : cette émissivité modifiant les pertes thermiques de la flamme. Ainsi, la température de notre flamme est a priori plus faible que sa température adiabatique de flamme.

La prise en compte de ce facteur d'expansion thermique semble poser une autre limite à cette méthode. En effet, ce facteur est constant tout au long de la propagation du front de flamme. Cette hypothèse semble être vérifiée dans le cas d'un front de flamme d'épaisseur constante au cours de la propagation. Dans ce cas, il semblerait a priori que la contribution de l'expansion thermique dans la vitesse de propagation reste alors constante. Or dans les images obtenues dans cette étude le front de flamme semble devenir de plus en plus épais au cours de la propagation. En prenant l'exemple des images obtenues exposées sur la Figure 145, un front de flamme d'épaisseur plutôt faible est observé au niveau du premier étage (image de gauche). Cependant, lorsque la flamme sort du prototype (image de droite), l'épaisseur de cette dernière est de l'ordre de la hauteur d'un étage (70cm). Ici, l'épaisseur du front de flamme est associée à l'épaisseur a priori de la zone lumineuse. Cependant, comme nous l'avons précédemment remarqué, cette épaisseur, tout comme la forme du front de flamme, peut varier selon les paramètres d'affichage utilisés (partie II.2.3)). Cette approximation donne toutefois une idée de la zone de réaction participant a priori à la vitesse de propagation, en poussant la flamme vers l'évacuation. Ainsi, il semblerait que, pour les flammes d'aluminium étudiées, l'approximation d'un front de flamme d'épaisseur constante se déplacant dans le prototype ne soit pas correcte. De plus, comme cela a pu être observé sur les images d'ombroscopie (Figure 140 par exemple), des fronts secondaires sont observés derrière le front de flamme principal. Ces derniers peuvent aussi augmenter la vitesse de propagation par expansion thermique au niveau de ces fronts secondaires. Une nouvelle fois, le coefficient d'expansion thermique devrait prendre en compte ces différentes contributions au cours du temps. Ainsi, l'utilisation de cette méthode pour la détermination de la vitesse de combustion semble inappropriée.



Figure 145: Images illustrant une limite de l'utilisation de la méthode du tube ouvert (augmentation de l'épaisseur de la flamme)

# III.4) PERSPECTIVE : NOUVELLE METHODE DE DETERMINATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION

Comme cela vient d'être remarqué, l'utilisation de la méthode du tube ouvert présente certaines limites intrinsèques dans le cas de la propagation de flammes d'aluminium présentée dans ces travaux. En effet, cette méthode s'appuie sur la détermination d'un coefficient d'expansion thermique constant sur toute la propagation de la flamme dans le prototype. Or, comme nous l'avons précédemment remarqué, il semblerait que cette contribution augmente au cours de la propagation (front de flamme plus épais et multiples fronts secondaires).

Une nouvelle méthode de détermination de la vitesse de combustion va ici être exposée. Cette dernière est appelée « méthode directe » puisqu'elle ne prend en compte aucun facteur correctif. Elle s'appuie en effet sur deux mesures de vitesse : la vitesse de propagation de la flamme (déjà déterminée précédemment) et la vitesse de l'écoulement en amont du front de flamme. Ainsi, la comparaison directe de ces deux grandeurs permet l'estimation de la vitesse de combustion.

Dans une première partie, le montage optique mis en place pour l'observation du mouvement des particules en amont du front de flamme est expliqué. Ensuite, la méthode de détermination de la vitesse de combustion à partir des images obtenues est détaillée. Par la suite, les premiers résultats obtenus sont présentés. L'intérêt de cette méthode, et son utilisation potentielle, sont alors mis en avant. Enfin, quelques limites potentielles de cette méthode sont exposées.

## III.4.1) OBSERVATION DU MOUVEMENT DES PARTICULES EN AMONT DU FRONT DE FLAMME

La propagation du front de flamme au sein de l'écoulement va entrainer une mise en mouvement de ce dernier, notamment par expansion thermique des produits de combustion. Il est ainsi intéressant d'étudier le mouvement des particules en amont du front de flamme, afin de quantifier cette contribution par exemple. Ceci est réalisé par un montage de PIV. Pour cela, une nappe laser est générée au sein de l'écoulement. Les particules d'aluminium présentent en amont de la flamme vont alors diffuser la lumière issue de la nappe laser dans toutes les directions, et notamment aussi vers une caméra positionnée à 90° de cette nappe. L'observation du déplacement des particules entre deux images permettra alors d'obtenir des données sur la vitesse des particules en amont du front de flamme.

Comme pour la mise en place des techniques d'ombroscopie et de schlieren, la mise en place de cette technique pour nos essais présente quelques difficultés. Tout d'abord, comme précédemment, une première difficulté provient du fait que la flamme à étudier est fortement lumineuse. Une première possibilité serait d'utiliser le même dispositif : un laser continu 5W ( $\lambda$ =532 nm) avec un filtre passe-bande centré sur 532 nm. Cependant, la puissance de ce laser était précédemment suffisante, puisque le faisceau laser passait au travers de la suspension avant d'être récupéré au niveau de la caméra. Or, dans le cas du montage de PIV en amont du front de flamme, la lumière diffusée par la suspension à 90° est obtenue au niveau de la caméra. Ainsi, cette puissance lumineuse, reçue au niveau de la caméra, est plus faible dans le cas présent. Dans le cas de l'utilisation d'un laser continu 5W et de ce filtre passe-bande, la contribution de la flamme est trop importante dans les images obtenues, empêchant la visualisation correcte du mouvement des particules en amont.

Pour pallier ces difficultés, un laser pulsé LITRON est choisi (30 mJ à 1 kHz,  $\lambda$ =527 nm) : un tel laser permet d'obtenir une forte puissance lumineuse pendant une courte durée. Un laser pulsé est généralement utilisé afin d'obtenir deux images espacées d'une courte durée, déterminée par le temps entre les deux pulses laser émis. Cependant, pour nos essais, une forte puissance laser étant nécessaire, les deux pulses laser, issus des deux cavités de ce dernier, sont émis simultanément, permettant ainsi d'augmenter la puissance de la nappe laser formée. La Figure 146 schématise le principe de mise en place de la mesure de PIV en amont du front de flamme. La caméra appelée « caméra PIV » permet d'observer le mouvement des particules en amont du front de flamme, alors que la caméra notée « caméra flamme » permet d'observer la propagation du front de flamme, sur la même zone d'étude, par visualisation directe.

Le laser émet des pulses lumineux (issus des deux cavités en simultanée), d'une forte puissance et d'une courte durée, espacés à une certaine fréquence. La puissance émise par ce laser est directement liée à cette fréquence, le laser ayant besoin d'un délai pour se « recharger » entièrement. La fréquence d'acquisition est ainsi limitée à 2 kHz lors de nos essais : au-delà, la puissance laser est trop faible pour visualiser le mouvement des particules. La « caméra PIV », disposant du filtre passe-bande, est alors synchronisée avec les pulses laser. Le temps d'exposition de cette caméra doit être le plus faible possible afin de limiter la contribution de la flamme dans l'image enregistrée. En effet, pendant toute la durée du temps d'exposition, la flamme émet de la lumière notamment en direction de la caméra. Au contraire, le laser émet seulement pendant une courte durée (de l'ordre de 100 ns). La « caméra flamme » permet de visualiser la propagation de la flamme et ainsi de connaître l'emplacement du front de flamme sur les images de la « caméra PIV ». Afin que cette caméra ne soit pas perturbée par le pulse laser, l'acquisition de cette dernière est désynchronisée des pulses, avec un délai de l'ordre de 5 µs. Ce temps étant relativement faible devant la vitesse de propagation de la flamme, la flamme

est considérée comme statique entre les images obtenues par la « caméra PIV » et la « caméra flamme ».

De même que pour la méthode PIV utilisée pour l'étude de la turbulence lors de la dispersion des particules, le logiciel Dantec Dynamic Studio est utilisé pour l'analyse des images obtenues. Avec ce logiciel, une cartographie des vecteurs vitesse est à nouveau obtenue. Cette analyse, ainsi que l'exploitation de cette analyse afin d'obtenir la vitesse de combustion, fait l'objet de la partie suivante.



Figure 146: Schéma de la mise en place de la PIV en amont du front de flamme

## III.4.2) METHODE DE DETERMINATION DE LA VITESSE DE COMBUSTION

A présent, une nouvelle méthode de détermination de la vitesse de combustion va être présentée, nommée « méthode directe ». Elle s'appuie notamment sur les images obtenues par la méthode de PIV en amont du front de flamme, précédemment présentée. Pour rappel, ces images sont obtenues à l'aide d'une tranche laser, générée par un laser pulsé, et d'une caméra rapide, munie d'un filtre passe-bande, appelée « caméra PIV ». Pour cette méthode directe d'évaluation de la vitesse de combustion, une deuxième caméra, nommée « caméra flamme », est utilisée afin de visualiser la propagation de la flamme, dans la même zone que la « caméra PIV », par visualisation directe. Cette caméra permet de déterminer la vitesse de propagation (notée  $V_p$ ), en s'appuyant sur la détection du contour de la flamme.

La « caméra PIV » est utilisée pour observer le mouvement des particules en amont du front de flamme. Pour ce faire, le logiciel Dantec DynamicStudio est utilisé pour réaliser l'algorithme de PIV, permettant d'obtenir la vitesse des particules au sein de chaque fenêtre d'interrogation. Cependant, les images brutes obtenues sont très sombres et contrastées. Sur la Figure 147, à gauche, une image brute est représentée après augmentation numérique de la sensibilité. La zone située à gauche (proche du laser) est très lumineuse, alors que la zone à droite est très sombre, à cause de l'atténuation de la puissance du laser lors de son passage à travers la suspension. L'algorithme de PIV est alors incapable de détecter le mouvement des particules dans toutes ces zones. Un traitement numérique a donc été appliqué à ces images. Tout d'abord, une image moyenne (en termes d'intensité lumineuse) est calculée : cette moyenne est une moyenne temporelle du niveau de gris des images obtenues. Par la suite, la valeur de chaque pixel de l'image brute est divisée par sa valeur correspondante dans l'image

moyenne. Enfin, chaque pixel est multiplié par 2047 : cela correspond à la valeur moyenne de la plage des valeurs possibles (codage en 12 bits). Après traitement numérique, on obtient l'image de droite, qui est plus homogène en niveau de gris. L'algorithme de PIV est alors appliqué à cette séquence d'images traitées numériquement.



Figure 147: Images obtenues par la technique de PIV en amont du front de flamme avant (à gauche) et après (à droite) traitement numérique

Le principe de la méthode directe de détermination de la vitesse de combustion est schématisé sur la Figure 148. La « caméra PIV » permet de déterminer la vitesse de l'écoulement dans toute la zone d'étude. La « caméra flamme » permet d'obtenir la vitesse de propagation  $(V_p)$  et de localiser le front de flamme (par la détection du contour). Ainsi, en combinant ces deux données, il est possible d'obtenir localement la vitesse de l'écoulement juste en amont du front de flamme (U). Dans le cas d'un front de flamme parabolique, en se plaçant au sommet de la parabole, la vitesse de combustion (S) est déduite directement :

$$S = V_p - U \tag{C3-1}$$

En effet, en ce point, les vecteurs  $\overrightarrow{V_p}$ ,  $\overrightarrow{U}$  et  $\overrightarrow{n}$  (vecteur unitaire normal au front de flamme) sont colinéaires. La formule pour le cas général est la suivante :

$$S = \overrightarrow{V_p} \cdot \overrightarrow{n} - \overrightarrow{U} \cdot \overrightarrow{n} \tag{C3-2}$$



Figure 148: Explication de la méthode directe d'évaluation de la vitesse de combustion

## **III.4.3) PREMIERS RESULTATS OBTENUS**

Des premiers essais ont été réalisés afin de vérifier la possibilité d'utiliser cette méthode avec les flammes d'aluminium étudiées. Pour ces essais, la propagation de la flamme est réalisée dans le prototype à un étage. L'injection de poussière est réalisée avec une pression des réservoirs amont de 2,5b et une durée d'ouverture des électrovannes de 800ms. Après un délai de 750ms, l'arc électrique est produit entre les électrodes (intensité : 4A, durée : 100ms). La concentration en poussières est de  $312g/m^3$ .

Le laser utilisé a été décrit dans la partie précédente. La « caméra PIV » est une caméra Phantom V711 munie d'un objectif Nikkor de focale fixe 105mm, avec une ouverture choisie à f/2.8. La fréquence d'acquisition est de 2000fps permettant une résolution de 1280x800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 1µs. La « caméra flamme » est une caméra Phantom V2512 dont la fréquence d'acquisition est fixée à 2000fps, avec une résolution correspondante de 1280x800 pixels. L'objectif est un objectif Nikkor 70-300mm avec une ouverture choisie à f/22. Le temps d'exposition est de 1µs.

Les résultats obtenus lors d'un essai sont présentés sur la Figure 149. La courbe rouge, notée  $V_p$ , représente la vitesse de propagation du front de flamme. La courbe bleue, notée U, représente la vitesse de l'écoulement en amont du front de flamme. La vitesse de l'écoulement peut être vue, par comparaison avec la méthode du tube ouvert, comme une correction de la vitesse de propagation, afin d'en déterminer la vitesse de combustion. Ainsi, contrairement au cas de la méthode du tube ouvert, ce facteur correctif évolue avec la propagation du front de flamme. En effet, ce dernier semble présenter un comportement similaire à la vitesse de propagation. Ce facteur tend a priori à limiter les variations de vitesse de propagation au niveau de la détermination de la vitesse de combustion.



Figure 149: Comparaison de la vitesse de propagation et de la vitesse de l'écoulement en mont du front de flamme

L'évolution de la vitesse de combustion, obtenue pour rappel par différence des deux courbes présentées précédemment, est présentée sur la Figure 150. Cette dernière n'est pas comparée aux résultats précédemment présentés, obtenus par la méthode du tube ouvert, car les configurations expérimentales sont différentes. En effet, comme nous allons le voir dans la partie suivante, de nouveaux essais doivent être réalisées afin de comparer les résultats obtenus avec ces deux méthodes. Cette étude est en effet une étude préliminaire permettant de présenter une méthode afin de s'affranchir a priori des limites de la méthode du tube ouvert précédemment décrites.



Figure 150: Evolution de la vitesse de combustion obtenue par la méthode de PIV en amont du front de flamme

## III.4.4) INTERET D'UTILISATION DE LA METHODE

Cette méthode présente l'avantage majeur, en comparaison à la méthode du tube ouvert, de ne pas nécessiter l'utilisation d'un facteur correctif déterminé a priori. En effet, celle-ci s'appuie uniquement sur deux vitesses mesurées expérimentalement. Les premiers tests réalisés montrent la possibilité de mettre en place ce montage optique pour l'étude de ces flammes d'aluminium. De plus, les résultats semblent cohérents. Cependant de nouveaux essais doivent être mis en place afin de comparer ces deux méthodes de détermination de la vitesse de combustion : méthode du tube ouvert et méthode directe. Ainsi, il semble intéressant de mettre en place cette technique sur chacune des deux zones d'étude de l'ombroscopie avec le prototype multi-étages, et de réaliser des tests dans les mêmes configurations expérimentales. Ainsi, l'évolution de la vitesse de combustion obtenue par la méthode directe pourra être comparée aux résultats présentés dans la partie III.3).

## **III.4.5) LIMITES POTENITELLES DE LA METHODE**

Cette méthode, bien que présentant des avantages par rapport à la méthode du tube ouvert, présente toutefois quelques limites. Tout d'abord, contrairement à la méthode du tube ouvert qui peut a priori être réalisée avec des images obtenues par la visualisation directe avec une caméra rapide (comme présenté dans les parties II.2.3) et II.2.5)), le montage permettant d'obtenir des images exploitables par la méthode directe est plus complexe. En effet, afin de visualiser l'écoulement en amont du front de flamme un laser pulsé de forte puissance est utilisé. A priori, une mesure par LDA de la vitesse de l'écoulement pourrait aussi être envisagée. Cependant, une telle mesure est aussi plus complexe à réaliser qu'une visualisation directe de la flamme. Une sonde, comme celles présentées dans la partie A pour l'étude de la turbulence, pourrait être utilisée à condition que son temps de réponse soit suffisamment rapide. Cependant, une telle sonde perturbe l'écoulement et donc la propagation du front de flamme.

L'utilisation de la PIV afin d'obtenir la vitesse de l'écoulement en amont du front de flamme présente aussi une limite a priori, schématisée sur la Figure 151. Sur cette figure, le front de flamme turbulent est représenté en rouge. La nappe laser, en vert sur le schéma, est positionnée au centre de l'enceinte. La croix orange représente la hauteur du front de flamme déterminée par la « caméra flamme ». L'accolade verte représente la zone de mesure PIV par traitement des images de la « caméra PIV », cette dernière étant déterminée à partir de la hauteur de la flamme précédemment déterminée. Ainsi, dans le cas d'un front de flamme dont le point le plus haut n'est pas sur le plan laser alors un biais apparaît. En effet, la mesure de PIV n'est alors pas réalisée juste en amont du front de flamme mais dans une zone plus éloignée.



Figure 151: Limite de la méthode de PIV en amont du front de flamme

## CONCLUSIONS DE LA PARTIE C

Dans cette partie, la propagation de la flamme a été étudiée au sein de deux prototypes. Le premier est une adaptation du prototype utilisé lors des essais d'étude de la mise en suspension de la poudre, présentés dans la partie B, afin de pouvoir enflammer le nuage après un délai ajustable après la fin de l'injection de la poudre. Le second prototype est une mise en série de trois étages similaires au prototype précédemment décrit. Les deux premiers étages permettent l'injection de poudre sur une hauteur plus importante, le troisième étage permettant la visualisation de la propagation du front de flamme après le disque de rupture.

Le phénomène général de propagation de la flamme a été observé. Les images obtenues par visualisation par caméra rapide de la flamme dans l'enceinte ainsi que les données obtenues par différents capteurs de pression ont été comparées. Cette comparaison a permis de comprendre le phénomène de propagation de la flamme. L'influence de la rupture du sac sur la propagation du front de flamme a aussi été investiguée : cette dernière perturbe la propagation en augmentant notamment le caractère pulsatoire de la flamme.

Un paramètre influant significativement sur la propagation a aussi été mis en évidence : l'émissivité des parois du prototype. En effet, une forte montée en pression a été observée au niveau de la canalisation d'évacuation, cette dernière étant en acier galvanisé. Une étude a alors été menée en modifiant l'émissivité des parois de notre prototype. Le lien entre surpression et émissivité des parois a été mis en évidence. Cette étude permet des conclusions à plusieurs échelles. Tout d'abord, pour nos essais, le remplacement de la conduite en acier galvanisé permettrait de limiter la pression dans le prototype et ainsi d'étudier des mélanges plus concentrés en poussières. Sur le plan numérique, la comparaison entre les essais expérimentaux et les résultats numériques nécessitent de prendre en compte l'émissivité des parois. Sur un plan plus théorique, l'étude de la propagation dans un prototype en verre semble éloignée du cas d'une explosion d'un nuage à l'air libre. En effet, le cas de la propagation de la flamme dans un nuage infini présente moins de pertes thermiques et s'approche donc plus des conditions de notre canalisation d'évacuation. Enfin sur le plan de la sécurité industrielle, il semblerait que les canalisations de ventilations présentant une forte émissivité (en acier galvanisé par exemple) soient à proscrire afin de limiter les conséquences d'une explosion de poussières au sein de ces dernières. L'ensemble de ces résultats a été obtenu pour une explosion de poussières métalliques (d'aluminium). Il serait intéressant de réaliser des essais similaires avec une flamme de prémélange gazeux et aussi avec une flamme de poussières organiques combustibles. Ainsi, la comparaison de l'influence de l'émissivité des parois sur chacune de ces flammes pourrait préciser l'importance respective du rayonnement sur la propagation de la flamme : la part de rayonnement étant a priori plus importante dans le cas d'explosions de poussières que dans le cas de flammes de prémélange gazeux (comme nous l'avons précédemment remarqué dans la partie A).

La vitesse de propagation, correspondant à la vitesse de déplacement du front de flamme dans le référentiel du laboratoire, est facilement déterminable à partir de la visualisation de la flamme. Cependant, cette vitesse est grandement dépendante du prototype utilisé pour sa détermination. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus lors de différentes études réalisées sur différents prototypes. Ainsi, la vitesse de combustion, correspondant à la vitesse de consommation des réactifs par le front de flamme, est plus intéressante à déterminer et à comparer entre différents essais. La méthode dite du tube ouvert est utilisée dans ces travaux afin d'évaluer cette vitesse de combustion. Des premières études sont présentées afin d'évaluer les limites de cette méthode et de proposer des solutions afin d'améliorer les résultats obtenus, notamment en évitant d'analyser des images de propagation saturées, ou encore en utilisant la visualisation du front de flamme par ombroscopie afin d'évaluer l'évolution du contour du front de flamme au cours de la propagation. Par la suite, cette méthode a été mise en place sur le prototype multi-étages afin d'évaluer l'évolution de cette vitesse de combustion au cours de la propagation. Une forte augmentation de la vitesse de combustion est alors obtenue.

Cette méthode du tube ouvert présente des limites, notamment par l'utilisation d'un facteur corrigeant l'expansion thermique des produits de combustion. En effet, ce facteur correctif est évalué a priori et est considéré comme constant tout au long de la propagation du front de flamme. Or, il semblerait au vu des images obtenues que ce dernier augmente au cours de la propagation. Une nouvelle méthode a alors été proposée afin d'évaluer cette vitesse de combustion. Cette méthode, appelée méthode directe, s'appuie sur la détermination expérimentale de deux vitesses : la vitesse de propagation du front de flamme et la vitesse de l'écoulement en amont de ce front. Des premiers essais ont montré la possibilité de mettre en place ces essais pour l'étude des flammes d'aluminium présentées ici. Cependant, ces derniers nécessitent l'utilisation d'un laser pulsé de forte puissance couplé à un filtre passe bande de longueur d'onde correspondante. Des essais complémentaires seront nécessaires afin de comparer ces deux méthodes de détermination de la vitesse de combustion.

## CONCLUSION GENERALE

Ces travaux portaient sur l'étude expérimentale de la propagation d'une flamme dans une suspension de poussières d'aluminium. Le but était d'observer et de comprendre le phénomène de propagation de la flamme, en vue d'une future modélisation numérique de cette dernière. En effet, une telle modélisation de l'explosion dans le cas de poussières métalliques ne semble pas complétement maitrisée en l'état actuel des connaissances. Une première partie des travaux a porté sur l'élaboration et la caractérisation d'un prototype permettant l'étude de ce phénomène. Après avoir étudié et synthétisé les travaux expérimentaux ayant été réalisés pour l'étude de la propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières, cette étude s'est séparée en deux problématiques. La première concerne l'étude de la mise en suspension de la poudre : les caractéristiques de la suspension formée (notamment concentration et turbulence) ayant une influence importante sur le phénomène de propagation. La deuxième problématique concerne l'étude expérimentale de la propagation de la flamme au sein des prototypes élaborés.

Dans un premier temps, la quantification du degré d'homogénéité de la suspension formée (par diffusion de Mie) et de la décroissance de la turbulence (par Particle Image Velocimetry (PIV) et Laser Doppler Anemometry (LDA)) est étudiée. L'étude de la concentration a permis d'optimiser le système d'injection afin d'obtenir une suspension homogène sur toute la hauteur du prototype. Pour l'utilisation de la méthode PIV, une étude préliminaire a été effectuée afin d'optimiser la détermination du niveau de turbulence. Cette étude permet alors de prescrire des recommandations pour l'étude de la propagation de la flamme : paramètres de mise en suspension de la poudre et délai avant ignition. En effet, le délai avant ignition (temps entre la fin de l'injection de poudre et l'inflammation du nuage formé) permet de contrôler et de modifier le niveau de turbulence au moment de l'ignition. De plus, cette étude permet de quantifier les conditions initiales à utiliser dans une modélisation numérique dans la perspective d'une comparaison aux résultats expérimentaux obtenues dans la partie suivante.

Par la suite, la propagation de la flamme au sein des deux prototypes est étudiée. Dans un premier temps, le phénomène général est analysé. Par la suite, l'influence de la turbulence sur la propagation de la flamme est investiguée. Cette partie de l'étude s'appuie alors sur la décroissance de la turbulence préalablement déterminée. Aucune influence de la turbulence sur la propagation n'est mise en avant. Une raison possible est le faible niveau de turbulence obtenu lorsque la concentration en poussières devient homogène au sein de la suspension. Ainsi, ces niveaux de turbulence faibles ont peu d'influence sur la flamme. Une perspective serait alors d'élaborer un système de mise en suspension de la poudre permettant d'obtenir des niveaux de turbulence plus élevés. Par la suite, la vitesse de combustion (vitesse de consommation des réactifs) a été étudiée sur deux zones de 30 cm sur le prototype de plus grandes dimensions. Une forte augmentation de cette vitesse est observée lors de la propagation de la flamme. Des limites potentielles de cette méthode de détermination de la vitesse de combustion ont alors été abordées. Ainsi, une nouvelle méthode de détermination de la vitesse de combustion a été proposée. Cette dernière est basée sur la détermination de la vitesse de l'écoulement en amont du front de flamme par une méthode de PIV.

Une partie de l'étude de la propagation de la flamme a mis en évidence un phénomène intéressant : la propagation de la flamme est a priori fortement influencée par l'émissivité des parois du prototype. En effet, au cours des différents essais, une forte augmentation de pression a été observée lorsque la flamme entre dans le conduit d'évacuation, ce dernier étant en acier galvanisé. Des tests ont alors été effectués en modifiant l'émissivité des parois de notre prototype : pour cela du papier aluminium était positionné sur les parois en verre. Une
augmentation de la pression au sein de l'enceinte ainsi que de la vitesse de propagation de la flamme ont alors été observées. Ce résultat induit des implications importantes. En vue d'une modélisation des essais réalisés, une attention particulière doit être mise sur la modélisation de l'émissivité des parois. De plus, sur le plan de la sécurité industrielle, pour les industries rencontrant potentiellement des risques d'explosions de poussières, les canalisations constituées de matériaux à forte émissivité (les canalisations de ventilation en acier galvanisé par exemple) sont à proscrire.

Ces travaux de thèse ont permis d'étudier la propagation de la flamme lors d'une explosion d'aluminium. Cette étude a notamment permis de mettre en place et d'optimiser divers moyens métrologiques. L'apport majeur de ce travail de thèse correspond à l'élaboration d'un prototype, et la mise en place expérimentale associée, permettant l'étude de la propagation de la flamme ainsi que l'étude des possibilités métrologiques associées (méthodes optiques couplées aux mesures de surpression). Ce travail ouvre ainsi la voie à plusieurs perspectives à court terme :

#### • <u>Etude de la vitesse de combustion par méthode directe :</u>

La méthode du tube ouvert généralement utilisée pour déterminer la vitesse de combustion semble présenter quelques limites dans le cas de poussières d'aluminium (et a priori plus généralement dans le cas de poussières métalliques). Une nouvelle méthode de détermination de cette vitesse basée sur la technique de PIV a été ici proposée. Les premiers essais réalisés montrent la faisabilité de tels essais. Il serait donc intéressant d'effectuer de telles mesures sur le prototype multi-étages sur les zones étudiées par ombroscopie. Ainsi, les résultats obtenus par ces deux méthodes (méthode du tube ouverte et méthode directe) pourraient être comparés. Il serait aussi intéressant d'observer si la vitesse de combustion obtenue par la méthode directe présente la même augmentation que celle observée avec la méthode du tube ouvert. De plus, il serait intéressant d'effectuer des essais avec des poussières organiques combustibles afin d'observer si les limites de la méthode du tube ouvert sont propres aux poussières métalliques ou si elles s'appliquent aussi aux poussières organiques.

#### • <u>Etude de l'influence de l'émissivité des parois :</u>

Comme nous l'avons rappelé l'émissivité des parois influe grandement sur le phénomène de propagation de la flamme dans le cadre des essais présentés. Pour rappel, ces essais concernent des particules d'aluminium. Il serait intéressant dans un premier temps d'effectuer de mêmes essais avec d'autres particules métalliques afin de vérifier que toutes les poussières métalliques présentent ce même comportement. Par la suite, ces mêmes types d'essais réalisés avec des poussières organiques, mais aussi dans le cadre de flammes de prémélange gazeux, seraient utiles. La comparaison de l'importance de l'émissivité des parois dans la propagation de chacune de ces flammes pourrait alors renseigner sur l'importance du rayonnement thermique dans chacune de ces flammes.

D'un point de vue scientifique, d'autres perspectives peuvent être envisagées à moyen terme :

• <u>Etude de l'influence de certains paramètres sur la propagation de la flamme :</u>

L'influence de certains paramètres sur la propagation de la flamme, notamment en termes de vitesse de combustion, pourrait être investiguée. Tout d'abord, l'influence de la granulométrie de la poudre étudiée pourrait faire l'objet d'essais complémentaires. Cette dernière permettrait alors de correspondre à une plus grande variété de poudres pouvant être rencontrées dans le domaine industriel.

L'étude de l'influence de la concentration sur les résultats de propagation est aussi intéressante. Comme nous l'avons déjà remarqué cette dernière nécessiterait a priori de modifier la canalisation d'évent afin de limiter les surpressions obtenues dans le prototype afin d'éviter la rupture de ce dernier.

Enfin, un autre paramètre pouvant être étudié est le niveau de turbulence initiale. Une étude de son influence sur la propagation a été menée au cours de ce travail. Cependant, au vu des faibles niveaux de turbulence obtenus avec le système de mise en suspension élaboré, aucun lien entre la turbulence et la vitesse de propagation de la flamme n'a pu être établi. Ainsi, il semblerait intéressant de concevoir un nouveau système permettant d'obtenir des niveaux de turbulence plus élevés.

#### Obtention de la vitesse de l'écoulement amont par tubes de Pitot :

Comme nous l'avons précédemment remarqué, la méthode directe de détermination de la vitesse de combustion nécessite la détermination de la vitesse de l'écoulement en amont du front de flamme. Dans la méthode proposée, cette vitesse est déterminée à l'aide de la technique de PIV, en utilisant un laser pulsé de forte énergie. Ainsi, la mise e place de cette mesure est complexe. Une idée serait alors d'approximer cette vitesse en mesurant la vitesse de l'écoulement plus en amont de la flamme, au sein de la canalisation d'évent. Ainsi, par conservation de la masse, et en considérant le fluide comme faiblement compressible dans la gamme de pression obtenue, la vitesse de l'écoulement juste en amont de la flamme et plus loin dans la canalisation d'évent devrait être proches. Des mesures comparatives des résultats obtenus avec les deux méthodes devraient être mises en place afin d'estimer l'erreur obtenue.

#### • <u>Adaptations des prototypes :</u>

L'élaboration du prototype multi-étages ouvre un grand nombre de perspectives sur les essais pouvant à présent être réalisés en modifiant les conditions expérimentales. Tout d'abord, l'étude de la propagation avec la mise en place d'obstacles au sein du prototype est un point important. La mise en place d'obstacles associés à des diagnostics de PIV en amont du front de flamme pourrait donner des informations sur l'influence de la turbulence sur la propagation.

Un autre exemple d'essai consisterait à placer l'arc électrique au niveau de l'inter-étage situé entre le premier et le deuxième étage. La propagation de la flamme en direction du premier étage serait alors moins sujette à l'expansion thermique des produits de combustion.

Des essais en champ libre pourraient aussi être envisagés. Ces essais permettraient notamment d'obtenir des données importantes sur la propagation de la flamme, n'ayant plus l'influence des parois sur la propagation (pertes thermiques, émissivité...).

- Andrews, G.E., Bradley, D., 1972. Determination of burning velocities: A critical review. Combust. Flame 18, 133–153. doi:10.1016/S0010-2180(72)80234-7
- Bachalo, W.D., Houser, M.J., 1984. Phase Doppler spray analyzer for simultaneous measurement of drop size and velocity distributions. Opt. Eng. 23, 583–590.
- Baudry, G., 2007. Etude de l'inflammabilité d'un nuage de particules d'aluminium partiellement oxydées.
- Bozier, O., 2004. Contribution à l'étude des caractéristiques de combustion isochore d'une suspension de particules solides réactives. Génération d ela suspension; influence de l'état initial du mélange.
- Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-8, 679–698. doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851
- Chang, C.C., Yeh, C.C., Chu, F.Y., 2016. Transfusion medicine in the Formosa Fun Coast water park explosion: The role of combined tissue and blood banking. Transfus. Apher. Sci. 55, 191–193. doi:10.1016/j.transci.2016.09.008
- Chen, Z., Fan, B., 2005. Flame propagation through aluminum particle cloud in a combustion tube. J. Loss Prev. Process Ind. 18, 13–19. doi:10.1016/j.jlp.2004.10.001
- Cuervo, N., 2015. Influences of turbulence and combustion regimes on explosions of gas-dust hydrid mixtures.
- Cuervo, N., Murillo, C., Dufaud, O., Bardin, N., 2014. Combining CFD simulations and PIV Measurements to Optimize the Conditions for Dust Explosion Tests. Chem. Eng. Trans. 36, 259–264. doi:10.3303/CET1436044
- D'Amico, M., 2016. Etude expérimentale et modélisation des explosions hybrides solides / solides : application au cas des mélanges de poussières graphite / métaux.
- Dahoe, A.E., 2000. Dust explosions: a Study of Flame Propagation.
- Dahoe, A.E., Cant, R.S., Scarlett, B., 2001a. On the transient flow in the 20-liter explosion sphere. Flow, Turbul. Combust. 14, 159–184. doi:10.1023/A:1015099110942
- Dahoe, A.E., de Goey, L.P.H., 2003. On the determination of the laminar burning velocity from closed vessel gas explosions. J. Loss Prev. Process Ind. 16, 457–478. doi:10.1016/S0950-4230(03)00073-1
- Dahoe, A.E., van der Nat, K., Braithwaite, M., Scarlett, B., 2001b. On the sensitivity of the maximum explosion pressure of a dust deflagration to turbulence. KONA Powder Part. J. doi:10.14356/kona.2001021
- Di Benedetto, A., Garcia-Agreda, A., Dufaud, O., Khalili, I., Sanchirico, R., Cuervo, N., Perrin, L., Russo, P., 2011. Flame propagation of dust and gas-air mixtures in a tube 11–13.
- Di Benedetto, A., Russo, P., Sanchirico, R., Di Sarli, V., 2013. CFD Simulations of Turbulent Fluid Flow and Dust Dispersion in the 20 Liter Explosion Vessel. Am. Institue Chem. Eng. J. 59, 2485–2496. doi:10.1002/aic

Ding, Y., Sun, J., He, X., QuiHong, W., Yin, Y., Xu, Y., Chen, X., 2010. Flame propagation

characteristics and flame structures of zirconium particle cloud in a small-scale chamber. Chinese Sci. Bull. 55, 3954–3959. doi:10.1007/s11434-010-4140-1

- Dyduch, Z., Toman, A., Adamus, W., 2016. Measurements of turbulence intensity in the standard 1 m3 vessel. J. Loss Prev. Process Ind. 40, 180–187. doi:10.1016/j.jlp.2015.12.019
- Eckhoff, R.K., 2003. Dust Explosion in the Process Industries, Online.
- Galmiche, B., 2014. Caractérisation expérimentale des flammes laminaires et turbulentes en expansion.
- Gao, W., Mogi, T., Rong, J., Yu, J., Yan, X., Dobashi, R., 2015. Motion behaviors of the unburned particles ahead of flame front in hexadecanol dust explosion. Powder Technol. 271, 125–133. doi:10.1016/j.powtec.2014.11.003
- Gao, W., Mogi, T., Shen, X., Rong, J., Sun, J., Dobashi, R., 2014. Experimental study of flame propagating behaviors through titanium particle clouds. Sci. Technol. Energ. Mater. 75, 14–20.
- Gao, W., Zhang, X., Zhang, D., Peng, Q., Zhang, Q., Dobashi, R., 2017. Flame propagation behaviours in nano-metal dust explosions. Powder Technol. 321, 154–162. doi:10.1016/j.powtec.2017.08.013
- Gordon, S., McBride, B.J., 1994. Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. NASA Ref. Publ. 1311. doi:NASA RP-1311
- Han, O.S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A., Ogawa, T., 2001. A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles' behavior. J. Loss Prev. Process Ind. 14, 153–160. doi:10.1016/S0950-4230(00)00049-8
- Han, O.-S., Yashima, M., Matsuda, T., Matsui, H., Miyake, A., Ogawa, T., 2000. Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct. J. Loss Prev. Process Ind. 13, 449–457. doi:10.1016/S0950-4230(99)00072-8
- Houim, R.W., Oran, E.S., 2015. Effect of Radiation on the Propagation of Planar Coal Dust Flames in Air, in: ICDERS. pp. 1–6.
- Julien, P., Vickery, J., Goroshin, S., Frost, D.L., Bergthorson, J.M., 2015a. Freely-propagating flames in aluminum dust clouds. Combust. Flame 162, 4241–4253. doi:10.1016/j.combustflame.2015.07.046
- Julien, P., Vickery, J., Whiteley, S., Wright, A., Goroshin, S., Bergthorson, J.M., Frost, D.L., 2015b. Effect of scale on freely propagating flames in aluminum dust clouds. J. Loss Prev. Process Ind. 36, 230–236. doi:10.1016/j.jlp.2014.12.022
- Kahlili, I., 2012. Sensibilité, sévérité et spécificités des explosions de mélanges hybrides gaz/vapeurs/poussières.
- Kalejaiye, O., Aymotte, P., Pegg, M., Cashdollar, K., 2010. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber. J. Loss Prev. Process Ind. doi:10.1016/j.jlp.2009.05.008
- Kolmogorov, a N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. Dokl. Akad. Nauk Sssr 30, 301–305. doi:10.1098/rspa.1991.0075
- Krause, U., Kasch, T., 2000. The influence of flow and turbulence on flame propagation through dust-air mixtures. J. Loss Prev. Process Ind. 13, 291–298.

- Liu, Q.M., Li, X.D., Bai, C.H., 2009. Deflagration to detonation transition in aluminum dust-air mixture under weak ignition condition. Combust. Flame 156, 914–921. doi:10.1016/j.combustflame.2008.10.025
- Mason, W.E., Wilson, M.J.G., 1967. Laminar flames of lycopodium dust in air. Combust. Flame 11, 195–200.
- Mendez, M.A., Simonini, A., Spaccapaniccia, C., 2018. Introduction to Image Velocimetry, Lecture no. ed. Von Karman Institute.
- Mercer, D.B., Amyotte, P.R., Dupuis, D.J., Pegg, M.J., Heij, W.B.C. De, Zevenbergen, J.F., Scarlett, B., 2001. The influence of injector design on the decay of pre-ignition turbulence in a spherical explosion chamber. J. Loss Prev. Process Ind. 14, 269–282.
- Murillo, C., Bardin-monnier, N., Blanchard, C., Munoz, F., Ratkovich, N., Vizcaya, D., 2016. CFD to Improve the Repeatability and Accuracy of Dust Explosion Tests in the 20-liters Sphere. Chem. Eng. Sci. 48, 115–120. doi:10.3303/CET1648020
- Murillo, C., Dufaud, O., Bardin-monnier, N., López, O., Munoz, F., Perrin, L., 2013. Dust explosions : CFD modeling as a tool to characterize the relevant parameters of the dust dispersion. Chem. Eng. Sci. 104, 103–116. doi:10.1016/j.ces.2013.07.029
- Olsen, K.L., 2012. A Comparative Study on the Influence of Obstacles on Flame Propagation in Dust and Gas Mixtures.
- Paquet, M., 2012. Etude de l'explosion de poussières ultra-fines issues de la raffinerie sèche de la biomasse végétale, en vue d'applications à la propulsion.
- Proust, C., 2017. Turbulent flame propagation in large dust clouds. J. Loss Prev. Process Ind. doi:10.1016/j.jlp.2017.05.011
- Proust, C., 2006. Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures. J. Loss Prev. Process Ind. 19, 89–100. doi:10.1016/j.jlp.2005.06.026
- Proust, C., Veyssiere, B., 1988. Fundamental Properties of Flames Propagating in Starch Dust-Air Mixtures. Combust. Sci. Technol. 62, 149–172. doi:10.1080/00102208808924007
- Pu, Y. kang, Hu, S., Jarosiński, J., 1995. Combustion tube studies of dust flame acceleration. Shock Waves 5, 103–108. doi:10.1007/BF02425041
- Pu, Y. kang, Jarosiński, J., Tai, C.S., Kauffman, C.W., Sichel, M., 1988. The investigation of the feature of dispersion induced turbulence and its effects on dust explosions in closed vessels. 22th Symp. Combust. 1777–1787.
- Pu, Y., Podfilipski, J., Jarosiński, J., 1998. Constant Volume Combustion of Aluminum and Cornstarch Dust in Microgravity. Combust. Sci. Technol. 135, 255–267. doi:10.1080/00102209808924160
- Pu, Y.K., 1988. Fundamental Characteristics of Laminar and Turbulent Flames in Cornstarch Dust-Air Mixtures.
- Pu, Y.K., Mazurkiewicz, J., Jarosinski, J., William Kauffman, C., 1988. Comparative study of the influence of obstacles on the propagation of dust and gas flames. Symp. Combust. 22, 1789– 1797. doi:10.1016/S0082-0784(89)80192-4
- Puri, P., 2008. Multi scale modeling of ignition and combustion of micro and nano aluminum particles.

Sabard, J., 2013. Étude de l'explosion de mélanges diphasiques : hydrogène et poussières.

- Schneider, H., Proust, C., 2007. Determination of turbulent burning velocities of dust air mixtures with the open tube method. J. Fluid Mech. 20, 470–476. doi:10.1016/j.jlp.2007.04.035
- Settles, G.S., 2001. Schlieren and Shadowgraph Techniques. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-56640-0
- Skjold, T., 2003. Selected aspects of turbulence and combustion in 20-Litre explosion vessels: Development of Experimental Apparatus and Experimental Investigation.
- Skjold, T., Castellanos, D., Olsen, K.L., Eckhoff, R.K., 2014. Experimental and numerical investigation of constant volume dust and gas explosions in a 3.6-mflame acceleration tube. J. Loss Prev. Process Ind. doi:10.1016/j.jlp.2014.05.010
- Skjold, T., Olsen, K.L., Castellanos, D., 2013. A constant pressure dust explosion experiment. J. Loss Prev. Process Ind. 26, 562–570. doi:10.1016/j.jlp.2012.08.003
- Sun, J., Dobashi, R., Hirano, T., 2006. Structure of flames propagating through aluminum particles cloud and combustion process of particles. J. Loss Prev. Process Ind. 19, 769–773. doi:10.1016/j.jlp.2006.01.002
- Sun, J., Dobashi, R., Hirano, T., 2003. Concentration profile of particles across a flame propagating through an iron particle cloud. Combust. Flame 134, 381–387. doi:10.1016/S0010-2180(03)00137-8
- Torrado, D., Cuervo, N., Pacault, S., Gaude, P.-A., Dufaud, O., 2017a. Influence of carbon black nanoparticles on the front fl ame velocity of methane / air explosions. J. Loss Prev. Process Ind. doi:10.1016/j.jlp.2017.02.006
- Torrado, D., Glaude, P.-A., Pacault, S., Dufaud, O., 2017b. Explosions de mélanges méthane/nanoparticules de carbone: influences de la turbulence et de la concentration en particules sur la vitesse de flamme. Récents Progrès en Génie des Procédés 110.
- Traoré, M., 2007. Explosion de poussières et de mélanges hybrides. Etude paramétrique et relation entre la cinétique de combustion et la violence de l'explosion.
- Vickery, J., Julien, P., Goroshin, S., Bergthorson, J.M., Frost, D.L., 2017. Propagation of isobaric spherical flames in hybrid aluminum-methane fuel mixtures. J. Loss Prev. Process Ind. 49, 472–480. doi:10.1016/j.jlp.2017.05.027
- Vissotski, A., Camou, A., Mannan, S., Petersen, E., 2012. Development of an Experimental Facility for Flame Speed Measurements in Powdered Aerosols. Spring Tech. Meet. Cent. States Sect. Combust. Inst. 2–8.
- Wang, S., Pu, Y., Jia, F., Gutkowski, A., Jaronsinski, J., 2006. An Experimental Study on Flame Propagation in Cornstarch Dust Clouds. Combust. Sci. Technol. 178, 1957–1975. doi:10.1080/00102200600790979
- Yu, J., Zhang, X., Zhang, Q., Wang, L., Ji, K., Peng, L., Gao, W., 2016. Combustion behaviors and flame microstructures of micro- and nano-titanium dust explosions. Fuel 181, 785–792. doi:10.1016/j.fuel.2016.05.085
- Zhang, C., Lin, B., Li, W., Zhai, C., Zhu, C., 2012. Comparative Experimental Study on Explosion Characteristics of Nano-aluminum Powder and Common Aluminum Powder in the Explosive Device of a Long Pipeline. Adv. Mater. Res. 341-342, 113–118. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.113

- Zhang, X., Yu, J., Sun, J., Gao, W., 2016. Effects of turbulent intensity on nano-PMMA flame propagation behaviors. J. Loss Prev. Process Ind. 44, 119–124. doi:10.1016/j.jlp.2016.09.001
- Zhen, G., Leuckel, W., 1996. Determination of dust-dispersion-induced turbulence and its influence on dust explosions. Combust. Sci. Technol. 113-114, 629–639. doi:10.1080/00102209608935518

# ANNEXE

Référence	Poudre étudiée	Prototype utilisé	Type d'injection	Etude de la suspension formée	Système d'ignition	Etude de la propagation	Remarques
(Baudry, 2007)	Alumi- nium	Tube vertical : hauteur 310mm (pour la propagation), diamètre 70mm Ouvert en haut	Type tube de Hartmann : décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers une buse	x	Générateur d'arc spécifique (proche du notre décrit dans la partie Matériels et Méthodes)	Visualisation directe	Comparaison de différentes définitions de vitesse de flamme
(Bozier, 2004)	Amidon	Enceinte fermée cylindrique : 500mm de hauteur, 230mm de diamètre	Réservoir pressurisé se déchargeant à travers des tubes perforés	Utilisation d'un prototype en PMMA : - concentration (Mie) - turbulence (LDA et PIV)	Seulement inflammateur pyrotechnique pour les mélanges avec l'amidon	A partir de la mesure de pression (pas de visualisation)	
(Chen and Fan, 2005)	Alumi- nium	Tube horizontal relié à un réservoir contenant la surpression : 12m de long et 0.14m de diamètre	20 systèmes réparti s: décharge d'un réservoir à travers une buse (hémisphère perforée)	Turbulence par anémomètre fil chaud	6 inflammateurs afin d'avoir une flamme plane : fils de résistance recouvert de poudre noire	Capteurs de pression et photodiodes	Etude l'accélération de la flamme et de la formation d'une onde de choc
(Cuervo, 2015)	amidon/ méthane	Tube vertical : Hauteur de 100cm et base carrée de 7cm de côté	Type tube de Hartmann	Utilisation d'un prototype semblable d'une hauteur de 40cm : Turbulence par PIV	Type tube de Hartmann	Visualisation directe	Méthode d'extraction du front de flamme Estimation de la

Tableau 18: Récapitulatif de quelques études de la propagation de la flamme

		Ouvert en haut					vitesse de combustion par la méthode du tube ouvert (Su°)
(Dahoe, 2000)	Fécule de maïs	Sphère de 20L	Décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers un anneau perforé	Turbulence par LDA	Inflammateur chimique positionné entre deux électrodes	A partir de la mesure de pression	Utilisation aussi d'un brûleur
(Dahoe et al., 2001a)	alumine	Sphère de 20L	Décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers un anneau perforé	Turbulence par LDA	Х	Х	u/u°=(t/t°)^n
(Di Benedett o et al., 2011)	Acide nicotiniq ue/méth ane	Tube vertical à base carré : 1m x 7cm x 7cm Ouvert en haut	Type tube de Hartmann	x	Type tube de Hartmann	Visualisation directe	Estimation de la vitesse de combustion par la méthode du tube ouvert (Su°)
(Ding et al., 2010)	Zirco- nium	Tube vertical à base carrée : 50cm x 8cm x 8cm	Type tube de Hartmann	x	Arc électrique : transformateur 30kV relié à des électrodes	Visualisation directe et Schlieren	Détermination de la vitesse de propagation
(Dyduch et al., 2016)	X	Sphère de 1m3	Type sphère de 1m3	Turbulence par sonde type Pitot (2 composantes) en plusieurs points	X	X	
(Gao et al., 2014)	Titane	Tube vertical à base carrée : 50cm x 8cm x 8cm	Type tube de Hartmann	x	Type tube de Hartmann	Visualisation directe	
(Gao et	Hexa-	Tube vertical semi-	Type tube de	X	Arc électrique :	Visualisation	Etude de la

al., 2015)	decanol	ouvert (parois)	Hartmann		transformateur 15kV relié à des électrodes	directe et avec une tranche laser	vitesse des particules en amont du front
							de flamme
(Han et al., 2001)	Lycopo- dium	Tube vertical à base carré : 180cm x 15cm x 15cm Ouvert en bas	Lit fluidisé	x	Arc électrique	Visualisation avec une tranche laser	Etude de la vitesse et de la concentration en amont de la flamme
(Han et al., 2000)	Lycopo- dium	Tube vertical à base carré : 180cm x 15cm x 15cm Ouvert en bas	Lit fluidisé	x	Arc électrique : environ 10J	Visualisation directe et Schlieren	Détermination de l'épaisseur de la zone de préchauffage et de combustion
(Julien et al., 2015b)	Alumi- nium	<ul> <li>Ballon : environ</li> <li>30cm de diamètre</li> <li>En extérieur :</li> <li>forme conique (4m</li> <li>de hauteur et 2m de</li> <li>largeur au sommet)</li> </ul>	- Ballon : décharge d'un réservoir d'air comprimé - En extérieur : par un piston au travers d'une buse	Visualisation directe	- Ballon : décharge de capacité à travers un fil - En extérieur : 2-3 g de poudre noire	Visualisation directe	Avec le ballon : détermination de la vitesse de combustion
(Vickery et al., 2017)	Mélange hybride aluminiu m- méthane	Ballon : environ 30cm de diamètre	décharge d'un réservoir d'air comprimé	Visualisation directe	- Ballon : décharge de capacité à travers un fil	Visualisation directe	
(Kalejaiye et al., 2010)	Gilsonite Purple K Charbon	Sphère de 20L	Décharge de réservoir d'air comprimé à travers une buse (2 types étudiées)	Concentration : utilisation d'une sonde à extinction lumineuse	x	x	

(Krause and Kasch, 2000)	-Lyco- podium - Fécule de maïs - Farine de blé	Tube vertical : hauteur de 2m et diamètre de 30cm Ouvert en haut	Lit fluidisé	-Concentration : sonde à extinction lumineuse - Turbulence : anémomètre fil chaud	Arc électrique	Visualisation directe	Modèle numérique de la dispersion de particules dans un silo taille réelle
(Mercer et al., 2001)	Alumine	Sphère de 20L	Décharge de réservoir d'air comprimé à travers une buse (3 types étudiées)	Turbulence par LDA	x	x	
(Paquet, 2012)	Poudres ligno- cellulo- siques	Enceinte fermée cylindrique : 500mm de hauteur, 230mm de diamètre	Décharge de réservoir d'air comprimé à travers une buse (3 types étudiées)	Concentration par diffusion de Mie Turbulence par PIV (seulement vecteurs vitesse)	- Arc électrique - Inflammateur pyrotechnique	Mesure de la pression	Modélisation numérique avec le code EFAE
(Proust, 2017)	Amidon	3 prototypes : 1m3, 10m3, 100m3	Décharge d'un réservoir d'air comprimé	Turbulence : sonde type Pitot	2x 5kJ ou 50 kJ selon les essais	Sondes à ionisation	Caractéristiques de la turbulence (intensité et échelle intégrale) et Vitesse turbulente de flamme
(Proust, 2006)	Amidon Lyco- podium Fleur de soufre	Prototype vertical à section carrée : 1,5m x 10cm x 10cm Ouvert en bas	Lit fluidisé	x	Fil chauffé	Visualisation directe et avec une tranche laser	Comparaison de deux méthodes de vitesse de combustion : tube ouvert et directe
(Proust	Amidon	Prototype vertical à	Lit fluidisé		Fil chauffé	Sones à	Flammes

and Veyssiere , 1988)		section carrée : 3m x 20cm x 20cm Ouvert en bas				ionisation Visualisation directe et avec une tranche laser	ascendantes et descendantes Distance de coincement
(Y. kang Pu et al., 1988)	Fécule de maïs	3 prototypes : 6 L, 26 L, 950 L	Décharge d'un réservoir d'air comprimé	Turbulence par anémomètre fil chaud (pour 6L et 29L) et LDA/anémomètre fil chaud (pour 950L)	Différents inflammateurs selon le prototype	Mesure de la pression	
(Pu et al., 1998)	Fécule de maïs Alumini um	Enceinte cylindrique verticale : hauteur de 36 cm et diamètre de 16 cm Enceinte fermée	Décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers des tubes perforés	Concentration par extinction lumineuse Turbulence par anémomètre fil chaud	Fécule de maïs : poudre noire Aluminium : allumeur au gaz	Mesure de la pression	Comparaison d'essais en gravité normale et en micro- gravité
(Pu, 1988)	Fécule de maïs	2 Enceintes cylindriques verticales : diamètre de 19cm et hauteur de 93 et 186cm Enceinte fermée	Décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers des tubes perforés	Concentration par extinction lumineuse Turbulence par anémomètre fil chaud	Inflammateur à poudre noire	Sonde à ionisation Visualisation directe et par Schlieren	Mise en place d'obstacles
(Sabard, 2013)	H2/C et H2/W	Sphère de 8L	Type sphère de 20L	Concentration par extinction lumineuse	Arc électrique Claquage laser	Visualisation par Schlieren	Comparaison de deux techniques pour obtenir la vitesse laminaire non étirée (Su°) : linéaire et non- linéaire
(Schneide r and	Fécule de	Prototype vertical à section carrée :	Décharge d'un réservoir d'air	Turbulence : sonde type Pitot	Inflammateur pyrotechnique	Visualisation directe	Détermination de la vitesse

Proust, 2007)	pomme de terre Alumi- nium	180cm x 30cm x 30cm	comprimé à travers des tubes perforés		(100J ou 5kJ)		turbulente en fonction de l'intensité de la turbulence
(Skjold, 2003)	Différen- tes poudres	Enceinte fermée de 20L (type USBM ou cubique)	Décharge d'un réservoir d'air comprimé à travers une buse	Turbulence par LDA	Arc électrique	Mesure de pression	
(Sun et al., 2006)	Alumi- nium	Tube vertical semi- ouvert (parois)	Type tube de Hartmann	х	Arc électrique	Visualisation directe et par Schlieren	Etude de la combustion d'une particule isolée
(Sun et al., 2003)	Fer	Tube vertical semi- ouvert (parois)	Type tube de Hartmann		Arc électrique	Visualisation par tranche laser	Concentration et vitesse en amont du front de flamme
(Torrado et al., 2017a)	Méthane /carbon e	Tube vertical : Hauteur de 100cm et base carrée de 7cm de côté Ouvert en haut	Type tube de Hartmann	Turbulence par PIV	Arc électrique	Visualisation directe	Estimation de la vitesse de combustion par la méthode du tube ouvert (Su°)
(Torrado et al., 2017b)	Méthane /carbon e	Tube vertical : Hauteur de 100cm et base carrée de 7cm de côté Ouvert en haut	Type tube de Hartmann	x	Arc électrique	Visualisation directe et par Schlieren	Estimation de la vitesse de combustion par la méthode du tube ouvert (Su°)
(Wang et al., 2006)	Fécule de maïs	Tube vertical à base carrée : 78cm x 16cm x 16cm	Lit fluidisé	Concentration par pesée Turbulence par PIV	Allumage par l'ignition de butane	Visualisation directe et par ombroscopie	Décroissance de la turbulence de la forme : U'=a.(1+t)^n

		Ouvert en bas					
(Yu et al., 2016)	Titane	Tube vertical semi- ouvert (parois)	Type tube de Hartmann	x	Arc électrique	Visualisation directe	
(Zhang et al., 2012)	Alumi- nium	Tube horizontal fermé	Non précisé	х	Non précisé	Mesure de pression et Détecteur de flammes	
(Zhang et al., 2016)	РММА	Tube vertical semi- ouvert (parois)	Type tube de Hartmann	Turbulence par PIV	Arc électrique	Visualisation directe	Caractérisation de la pulsation de la flamme
(Zhen and Leuckel, 1996)	Fécule de maïs	Sphère de 1m3	Décharge de réservoir d 'air comprimé	Turbulence par anémomètre fil chaud	Non précisé	Mesure de pression	Evaluation théorique du niveau de turbulence

### RESUME

L'explosion est un phénomène redouté dans les installations industrielles. Le risque d'explosions impliquant des poussières combustibles est présent dans un grand nombre d'industries d'activités différentes, compte tenu de la grande diversité de poussières combustibles : les poussières organiques (farine, charbon, sucre...) mais aussi les poussières métalliques (aluminium, magnésium...). En effet, toutes ces poussières combustibles si elles sont suffisamment fines, et si elles sont en suspension dans l'air, peuvent provoquer des explosions. Les industriels doivent donc quantifier et maîtriser ce risque au sein de leurs différentes installations. Dans le cas des explosions de gaz, l'état actuel des connaissances permet une compréhension et une modélisation précise du phénomène. Cependant, l'état des connaissances est plus limité dans le cas des explosions de poussières, notamment à cause de la plus grande difficulté à étudier ces dernières expérimentalement. Des modèles, basés sur les explosions de gaz, existent néanmoins dans le cas des explosions de poussières. Ces derniers semblent cohérents dans le cas d'explosions de poussières au cas des poussières métalliques.

Ces travaux de thèse s'intéressent à l'étude expérimentale de la propagation de la flamme lors d'une explosion de poussières d'aluminium. Afin de modéliser une propagation éventuelle de flamme lors d'une explosion, une première approche expérimentale est nécessaire. Pour cette étude expérimentale des prototypes ont été spécialement conçus, puis améliorés, au cours des différents tests réalisés. La description de ces travaux est divisée en deux parties.

Dans un premier temps, la mise en suspension de la poudre est étudiée. En effet, afin de pouvoir étudier ce phénomène d'explosion, un système de mise en suspension de la poudre a été élaboré. Une première partie de l'étude permet donc de s'assurer que la suspension obtenue est homogène en termes de concentration. Par la suite, le niveau de turbulence obtenue dans l'enceinte après la fin de la mise en suspension de la poudre est étudié. En effet, ce paramètre influe grandement sur la propagation de la flamme, augmentant ainsi les conséquences de l'explosion.

Par la suite, la propagation de la flamme est étudiée. Pour cela, la suspension précédemment obtenue est enflammée à l'aide d'un arc électrique. Le phénomène est étudié au travers de la visualisation de la propagation de la flamme et par l'évolution de la pression dans le prototype. Deux principales méthodes optiques, l'une basée sur la visualisation de la lumière émise par la flamme et l'autre sur la visualisation de variations d'indice de réfraction (liées à des variations de température), sont utilisées. A partir de ces dernières la vitesse de propagation de la flamme dans le référentiel du laboratoire est étudiée. Cependant, cette vitesse dépend fortement du prototype utilisé pour son étude. Ainsi, une méthode est utilisée afin d'en déduire la vitesse de combustion, correspondant à la vitesse de consommation des réactifs par la flamme. Des limites potentielles de cette méthode sont par la suite exposées, et une nouvelle méthode de détermination de cette vitesse est alors proposée.

## SUMMARY

Explosions are one of the most feared events in the industry. Risk of explosions with combustible dusts can occur in a large variety of industry of different fields, because of the large amount of combustible dusts: organic dusts (flour, carbon, sugar...) but also metallic dusts (aluminum, magnesium...). All of these combustible dusts, if they are fine enough, and if they are dispersed in the air, can cause explosions. Companies have to quantify this risk present in their plant. Concerning gas explosions, the current state of knowledge allows an understanding and a precise modelling of the phenomenon. However, the state of knowledge about dust explosions is more limited, especially because of the difficulty to study the explosions experimentally. Some models, based on gas explosions, exist for the case of dust explosion. These models seem coherent in the case of organic dust explosions but less adapted for metallic dust.

This PhD work focus on the experimental study of flame propagation during an aluminum dust explosion. To model an eventual propagation of the flame during the explosion, an experimental approach is required. For this experimental study, specific prototypes have been elaborated, and then improved, during the different tests. This work is mainly separated in two parts.

In a first part the dispersion of the dust is studied. Indeed, to study the explosion phenomenon, a system has been elaborated to disperse the dust. A first part of study allows checking that the dispersion is well homogeneous in terms of concentration. Then, the turbulence level inside the prototype after the end of the dispersion is studied. Indeed, this parameters influence a lot the flame propagation, increasing the consequences of the explosion.

Then, the flame propagation is studied. The dust dispersion, previously studied, is ignited by an electric spark. The phenomenon is studied thanks to visualization of the flame propagation and by the evolution of the pressure inside the prototype. Two main optical techniques, one based on the light emitted by the flame, the other one linked to refractive index variations (due to temperature variations) are used. Thanks to these methods, the propagation velocity in the laboratory referential is studied. However, this velocity depends mainly on the prototype used for his determination. A method is used to determine the burning velocity (consumption rate of the reactants by the flame front). Some potential limits of this method are then exposed, and a new method of determination of this burning velocity is proposed.