

UNIVERSITÉ DE PROVENCE
(AIX-Marseille I)
Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels
UMR CNRS 6595 Thèse

pour obtenir le grade de
DOCTEUR D'AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ
Discipline : Mécanique Énergétique
ECOLE DOCTORALE 353, Science pour l'Ingénieur
présentée et soutenue publiquement
par
L. Biamino
exemplaire provisoire

Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et
d'une structure mobile autour d'un axe

Directeur de thèse : Pr. Georges JOURDAN - Professeur des Universités -
Aix Marseille université université

JURY :

Pr. Ozer IGRA - Professeur des Universités Université de Ben-Gurion (Israël)
Pr. Christian TENAUD - Directeur de Recherche au CNRS - LIMSI/UPR 3251 Orsay
Pr. Lounès TADRIST - Professeur des Universités - IUSTI/CNRS 6595
Pr. Richard SAUREL - Professeur des Universités - IUSTI/CNRS 6595
Pr. Stéphane JAMME - Professeur Associé - ISAE Toulouse
Pr. Georges JOURDAN - Professeur des Universités - IUSTI/CNRS 6595

7 novembre 2011

Table des matières

1	INTRODUCTION	9
1.1	État de l'art	13
1.2	But de l'étude	20
1.2.1	Approche théorique	20
1.2.2	Limites de la théorie	23
2	OUTIL EXPÉRIMENTAL	25
2.1	Tube à choc T80	26
2.2	Diagnostic	28
2.2.1	Mesure de pression pariétale	28
2.2.2	Diagnostic optique	28
2.3	Maquette expérimentale	32
2.3.1	Présentation	32
2.3.2	Analyse dynamique	33
2.3.3	Assemblage et implantation des capteurs	36
2.3.4	Conception	37
2.3.5	Réalisation	39
2.4	Installation complète	41
2.5	Premier essai : gardons la porte fermée	43
2.5.1	Présentation	43
2.5.2	Résultats et discussion	44
2.5.3	Sur la réponse des capteurs	48
2.5.4	Synthèse	49
3	ÉTUDE FONDAMENTALE DE L'ÉCOULEMENT EN TUBE À CHOC OUVERT	50
3.1	Porte entièrement ouverte : à 90°	51
3.1.1	Configuration de l'expérience	51
3.1.2	Résultats et première analyse	51
3.1.3	Optimisation du diagnostic et poursuite de l'analyse	55
3.2	Étude paramétrique de l'évolution de l'écoulement en fonction de l'ouverture partielle de la porte	62
3.2.1	Porte entrouverte à 45°	63

3.2.2	Porte entrouverte à 30°	70
3.3	Analyse et discussion	75
3.4	Conclusion	82
4	OUVERTURE DE LA PORTE	83
4.1	Cas de référence	84
4.1.1	Présentation	84
4.1.2	Résultats	84
4.1.3	Observations et analyses préliminaires	86
4.1.4	Analyse théorique	87
4.2	Études paramétriques d'ouverture de porte	96
4.2.1	Effet d'une pré-ouverture de la porte	96
4.2.2	Effet du nombre de Mach	104
4.2.3	Effet de l'inertie de la porte	110
4.3	Conclusion	115
5	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	121

Table des figures

1.1	Trois exemples de visualisation strioscopique réalisées par G.S. Settles mettant en évidence des écoulement et discontinuité gazeuses (ondes des choc et ondes de souffle) : à gauche on distingue les fluctuations de l'air ambiant dans un bureau, à droite : la sortie d'une balle lors d'un tir de carabine et l'explosion d'un faible charge sphérique [29] [30] [31] [32] [33].	13
1.2	Exemple de résultats obtenus par H. Honma <i>et al.</i> [11] sur l'étude du vortex annulaire expulsé d'un tube à choc carré ouvert : comparaison à gauche de la reconstruction de l'écoulement à partir des relevés expérimentaux et à droite des résultats numériques équivalents.	15
1.3	Exemple de résultats obtenus par Q. Yu et H. Grönig [35] sur l'écoulement expulsé d'un tube à choc classique ouvert : comparaison à droite de la visualisation expérimentale par strioscopie couleur de l'écoulement et à gauche des résultats numériques équivalents.	17
1.4	Exemple de résultats obtenus par R.F. Meyer [25] lors de l'interaction d'une feuille d'acétate de cellulose avec une onde de choc plane se propageant de gauche à droite : sur le cliché a), on distingue de gauche à droite l'onde de choc réfléchie en noir, puis la feuille et en blanc, l'onde de choc transmise ; sur le cliché b), pris 180 microsecondes plus tard, la feuille s'est déplacée dans le sens de l'écoulement et l'onde de choc transmise a continué sa course.	18
1.5	Illustration montrant le comportement du montage expérimental.	20
1.6	Illustration du bilan des actions mécaniques s'appliquant sur la porte.	21
2.1	Présentation du tube à choc T80 dans différentes configurations de fonctionnement.	26
2.2	Architecture du montage strioscopique en "Z" utilisé lors des expériences.	29

2.3	Caméra ultra-rapide PHOTRON FASTCAM SA 1.1.	30
2.4	Solution préliminaire du banc d'étude des portes de surpression : vue latérale et perspective.	32
2.5	Représentation graphique du comportement dynamique d'ouverture de la porte de surpression adopté en hypothèse pour cette étude	34
2.6	Fond du tube à choc T80.	36
2.7	Projet de réalisation de la bride d'adaptation du manchon expérimental.	37
2.8	Projet de réalisation des portes de surpression, les dimensions sont en mm ; C_{bottom} , C_{side} , C_{top} et C_{door} représentent respectivement les emplacements des capteurs positionnés sur les faces inférieure, latérale et supérieure de la veine d'essai et au centre de la porte mobile.	38
2.9	Photographie de la maquette expérimentale en place sur le tube à choc T80.	39
2.10	Photographie de la bride d'adaptation de la maquette expérimentale.	40
2.11	Photographie des portes de surpression réalisées.	40
2.12	Présentation virtuelle de l'installation expérimentale équipée de la porte de surpression et des systèmes de diagnostic.	41
2.13	Photographie de la maquette expérimentale instrumentée avec les capteurs de pression ENDEVCO et équipée de la porte en aluminium.	42
2.14	Représentation volumique de la maquette avec la porte en configuration maintenue fermée.	43
2.15	Clichés strioscopiques enregistrés lors d'une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).	44
2.16	Signaux de pression enregistrés aux stations C12, C10, C7, C1 et C_{door} lors d'une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).	47
2.17	Signal de pression enregistré à la station C1 lors d'une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).	48
3.1	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, pour l'intervalle de 8,6 à 10,05 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 90° et l'onde de choc incidente se déplace vers la droite (T80#620).	52

3.2	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, pour l'intervalle de 10,7 à 39,2 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 90° et l'onde de choc incidente se déplace vers la droite (T80#620).	53
3.3	Signal de pression enregistré sur la face supérieure en sortie du tube à choc (T80#620).	54
3.4	Maquette modifiée avec les nouveaux emplacements de capteurs.	55
3.5	Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 90°. Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles vont vers la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#620).	56
3.6	Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 90°(T80#620).	58
3.7	Comparaison de l'évolution de la pression pariétale dans la veine d'essai (parois supérieure, latérale et inférieure) juste avant que la seconde onde de choc sw2 ne soit expulsée de la maquette avec la porte maintenue ouverte à 90°(T80#620).	59
3.8	Schéma détaillant les modifications apportées à la maquette pour positionner respectivement la porte à 45° et à 30°.	62
3.9	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, durant l'intervalle de 8 à 9,7 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 45° et l'onde incidente se propage vers la droite (T80#624).	65
3.10	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, durant l'intervalle de 9,85 à 40 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 45° et l'onde incidente se propage vers la droite (T80#624).	66
3.11	Rotated Caption	67
3.12	Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 45° (T80#624).	68
3.13	Comparaison de l'évolution de la pression pariétale aux abords de la sortie de la maquette (parois supérieure, latérale et inférieure et au centre de la porte) lors de la sortie de l'onde de choc incidente IS1 avec la porte ouverte à 45° (T80#624).	69

3.14	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 30° (T80#623).	71
3.15	Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 30° (T80#623).	72
3.16	Rotated Caption	73
3.17	Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 30° (T80#623).	74
3.18	Influence de l'ouverture de la porte (30° , 45° et 90°) sur l'évolution de l'onde de choc sw2 le long du tube à choc C1 et à la sortie de la maquette C_{side} ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).	76
3.19	Influence de l'ouverture de la porte (30° , 45° et 90°) sur l'évolution de l'onde de choc incidente IS1 à sa sortie de la maquette C_{bottom} ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).	77
3.20	Clichés strioscopiques mettant en évidence l'influence de la position de la porte (30° ou 45°) sur la formation des réflexions de l'onde de choc incidente lorsqu'elle sort de la maquette((T80#624) et (T80#623)).	78
3.21	Comparaison de la surpression OP1 générée en sortie de la maquette (C_{top}) après le passage de l'onde de choc incidente en fonction de l'ouverture de la porte à 30° , 45° ou 90° ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).	79
3.22	Série de clichés strioscopiques montrant la propagation des multiples réflexions de l'onde de choc incidente au niveau de la maquette pour chacune des positions étudiées (30° , 45° et 90°)((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).	81
4.1	Séquence de clichés strioscopiques montrant l'évolution de la porte en aluminium suite à l'impact d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$), pour l'intervalle de temps de 8,7 à 34,4 ms. L'onde de choc incidente se déplace vers la droite et l'origine des temps correspond à la rupture du diaphragme (T80#527e). . .	91
4.2	Séquence de clichés strioscopiques montrant l'évolution de la porte en aluminium suite à l'impact d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$), pour l'intervalle de temps de 34,5 à 49,2 ms. L'onde de choc incidente se déplace vers la droite l'origine des temps correspond à la rupture du diaphragme(T80#527e).	92

4.3	Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte en aluminium s'ouvrant de 0° à 90° sous l'action d'une onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$. Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles pointent la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#527).	93
4.4	Diagramme d'ondes (x-t) reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte en aluminium s'ouvrant de 0° à 90° sous l'action d'un onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527).	94
4.5	Superposition du signal de pression enregistré au centre de la porte (C_{door}) et de l'évolution angulaire de celle-ci reconstruite à partir de la visualisation ultra-rapide, enregistrés lors de l'expérience avec la porte en aluminium s'ouvrant de 0° à 90° sous l'action d'un onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527).	95
4.6	Séquence de clichés strioscopiques de l'évolution de la porte en aluminium pré-positionnée avec une ouverture initiale de 20° , sous l'effet du passage d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$); l'onde incidente se propage vers la droite (T80#637).	97
4.7	Comparaison de évolution angulaire de la porte en aluminium sous l'effet d'une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon trois ouvertures initiales de la porte $\theta_0=5^\circ, 45^\circ$ et 85° .	99
4.8	Comparaison de évolution de la surpression enregistrée au centre de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon trois positions initiales caractéristiques $\theta_0=5^\circ, 45^\circ$ et 85° .	100
4.9	Surpressions enregistrées au centre de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon sa position initiale θ_0 .	101
4.10	Réaction angulaire de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon sa position initiale θ_0 .	102
4.11	Reconstruction de l'évolution angulaire de la porte en aluminium lors de son ouverture sous l'action d'une onde choc avec les nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25,$)T80#525, 527, 528, 546).	105
4.12	Évolution de la surpression enregistrée au centre de la porte en aluminium, C_{door} , lors de ses ouvertures sous l'action d'une onde choc avec les nombres de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25,$ (T80#525, 527, 528, 546).	106

4.13	Vitesse angulaire atteinte par la porte dans la phase uniforme de son déplacement, calculée à partir des relevés expérimentaux lors des ouvertures de la porte en aluminium sous l'action d'une onde choc avec les nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).	108
4.14	Evolution de la pression adimensionnée enregistrée au centre de la porte en aluminium, C_{door} , lors de ses ouvertures sous l'action d'une onde choc avec les nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).	109
4.15	Clichés strioscopiques montrant l'ouverture des portes en composites, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde de choc $M_{is}=1.1$ (T80#527, 550, 563).	116
4.16	Reconstruction de l'évolution angulaire des portes en composites, en aluminium et en acier lors de leur ouverture respective sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527, 550, 563).	117
4.17	Évolution de la surpression enregistrée sur les faces inférieure, C_{bottom} , et supérieure, C_{top} , à 10 mm de l'extrémité de la maquette, lors de l'ouverture des portes en fibres de carbone, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).	118
4.18	Évolution de la surpression enregistrée sur la face supérieure à 10 mm de l'extrémité de la maquette, lors de l'ouverture des portes en fibres de carbone, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).	119
4.19	Vitesses angulaires maximales atteintes par chaque porte, présentées en fonction de l'inverse leur inertie respective. Les portes en composites, en aluminium et en acier sont ouvertes par l'action de l'impact d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).	120
5.1	Proposition d'une nouvelle configuration expérimentale permettant de supprimer les effets initiaux du poids dans l'expérience.	123
5.2	Proposition d'une nouvelle configuration expérimentale permettant de paramétrer uniquement les effets initiaux du poids dans l'expérience.	124
5.3	Proposition d'une nouvelle configuration expérimentale permettant de quantifier la baisse d'intensité subie par la pression appliquée sur la porte en fonction de la distance X qui la sépare de l'extrémité du tube à choc.	124

Chapitre 1

INTRODUCTION

Sommaire

1.1	Etat de l'art	13
1.2	But de l'étude	20
1.2.1	Approche théorique	20
1.2.2	Limites de la théorie	23

Les ondes de chocs sont des phénomènes physiques dont l'étude alimente les parutions scientifiques depuis plus d'un siècle. Au cours de leurs investigations, les chercheurs ont appris à les utiliser et maîtriser leurs propriétés physiques pour répondre au besoin de compréhension et d'évolution de la science. Les ondes de choc sont des phénomènes physiques généralement caractérisés par des grandes amplitudes et des très faibles temps caractéristiques. Elles correspondent à des modifications brusques dans un milieu. Depuis 1897 et l'invention du tube à choc par Paul Veille, il est possible de générer et de contrôler des ondes de choc en laboratoire. Dans un tube à choc, une onde de choc plane se propage à une vitesse supersonique et lors de son passage, elle modifie instantanément les propriétés physiques du milieu qu'elle traverse. Grâce à cet outil, de nombreux domaines de recherches ont vu le jour. Ces domaines concernent aussi bien l'astrophysique, l'aéronautique, la physique énergétique, la géologie que la médecine et tant d'autres... L'interaction d'une onde choc avec des milieux gazeux, des liquides ou des structures solides sont sources d'étude. Un pan de ces études concerne l'interaction des écoulements fluides avec des structures solides. Leur développement ont principalement conduit à comprendre comment un écoulement dans un tube à choc pouvait être modifié lorsqu'il interagissait avec un solide : étude de réflexion et diffraction des chocs, étude d'atténuation d'onde de choc, étude de stabilité de l'onde. Dans tous ces domaines d'études la structure qui interagit avec le fluide est indéformable ou du moins considérée comme telle.

En réalité, aucune structure n'est réellement indéformable. Et lorsque la structure devient très déformable, l'étude se complexifie nettement. Pour

se faire une idée, prenons un tuyau d'arrosage, ouvrons le robinet d'arrivée d'eau entièrement pour que le débit et la pression soient suffisants et observons l'évolution du tuyau laissé libre de tous mouvements. L'eau va s'écouler en formant un jet et le tuyau va se mettre en mouvement sous l'action de la sortie du jet. Le tuyau en se déplaçant et se déformant va modifier la direction du jet. Il en résulte une danse chaotique du tuyau et un arrosage de toute la zone alentour. Le jet d'eau crée des contraintes sur le tuyau, qui le déforme et le fait entrer en mouvement. Mais l'interaction d'un fluide avec une structure solide déformable ne se limite pas à la création de contraintes, de déformation ou de mouvement du solide. La complexité de ces phénomènes réside dans le fait que l'action du fluide va modifier les caractéristiques de la structure du solide (contraintes, dimensions, densité, température). La conséquence directe de cette action est de modifier les frontières du problème fluide et donc à terme, les caractéristiques physiques de ce fluide (vitesse, densité, température). Cette interaction va perdurer dans le temps et risque de ne jamais trouver de situation d'équilibre, les limites du problème n'étant jamais figées. D'autres exemples illustrent ce genre de phénomènes où les interactions fluide-structure gèrent la dynamique du système. Ces phénomènes bien que très répandus, sont très difficiles à mettre en équation, depuis quelque décennies. La difficulté dans l'étude de ces interactions s'accroît encore lorsque l'écoulement devient instationnaire et que des ondes de choc apparaissent. Le problème ainsi atteint dépasse les limites de notre maîtrise théorique. De nos jours, c'est l'outil informatique qui a pris le relais et qui permet de mieux comprendre la physique de ces interactions complexes. La gestion du couplage entre les parties fluide et solide du problème numérique représente l'essentiel des difficultés. Ces méthodes de résolution, bien que très puissantes doivent cependant être éprouvées pour vérifier leur adéquation au problème réel. Ainsi des expériences mettant en jeu des interactions fluide-structure parfaitement maîtrisées sont une nécessité au développement de ces outils numériques.

La situation présentée maintenant est le thème de ce travail de thèse : une approche expérimentale de l'étude de l'interaction fluide-structure. Considérons un solide indéformable auquel on laisse un degré de liberté en rotation autour d'un axe. Cette structure ferme un espace clos. Si le contenu de l'espace clos subit le passage d'une onde de choc, ce solide va être mis en mouvement et tourner autour de son axe. Concrètement, l'onde de choc va augmenter les caractéristiques physiques, en particulier sa pression, du fluide en contact avec la face impactée de cette porte. La face opposée de la porte ne subissant pas ou que très peu l'influence de l'onde de choc, une seule de ses faces est soumise à la surpression. Au moment de l'impact, le déséquilibre ainsi créé impose une action mécanique sur la porte qui va la faire accélérer et tourner autour de son axe de rotation. Jusqu'à ce stade tout est relativement simple. La difficulté intervient à l'instant où la porte commence à s'ouvrir, car les

frontières du volume dans lequel le fluide évolue sont modifiées. Des fuites apparaissent et le gaz qui était maintenu dans un volume clos peut maintenant s'écouler vers un milieu libre. Une communication entre les gaz agissant de chaque côté de la porte est créée modifiant leurs propriétés et par conséquent la pression agissant sur chaque côté de la porte. Les actions mécaniques qui s'appliquent sur la porte ne sont plus les mêmes, et par conséquent l'accélération que la porte subit aussi. Au fur et à mesure que la porte change de position, le problème fluide continue d'être modifié et change en retour son action sur la porte. Cette interaction perdure soit jusqu'à ce que les limites du problème cessent d'être modifiées, la porte ne peut plus bouger, ou bien lorsque les actions mécaniques agissant sur la porte s'équilibrent, les fluides de chaque côté de la porte étant dans le même état physique.

Le travail présenté ici est une étude des paramètres du fluide ou du solide en mouvement qui sont les acteurs de la loi comportementale gérant ce système complexe. Pour ce faire, nous avons réalisé une maquette expérimentale mettant en action la physique que nous venons de décrire et nous l'avons adaptée à un tube à choc. En éprouvant de nombreuses configurations expérimentales, nous avons pu déterminer comment l'écoulement interne d'un tube à choc évolue lorsqu'il est plus ou moins ouvert à son extrémité. Comment une porte fermée réagit-elle à l'impact d'une onde de choc et quelles en sont les conséquences sur l'évolution des fluides mis en jeu ? Quelles sont les conséquences d'une position différente de la porte au moment de l'impact avec l'onde de choc ? Ou encore, quel rôle joue l'intensité de l'onde de choc incidente ou l'inertie de la porte sur toute cette dynamique ?

Cette étude ne se justifie pas seulement par son côté fondamental, elle est aussi directement liée à une application industrielle en aéronautique. En effet, dans les nacelles des turboréacteurs d'un avion de ligne, de nombreux phénomènes physiques interagissent. Les réactions thermodynamiques qui assurent le fonctionnement d'un turboréacteur sont génératrices de températures et de pressions très élevées. Dans cet environnement hautement énergétique, il n'y a pas la possibilité de laisser la moindre place au hasard. Ainsi la sécurité aérienne impose au constructeur d'avion, comme AIRBUS, de maîtriser le niveau de pression dans l'enceinte de ces turboréacteurs. Par exemple, il est important en cas d'une rupture inopinée d'une conduite d'air chaud de pouvoir expulser la surpression qui en découle. Dans ce but, un des choix techniques d'AIRBUS a été de créer des soupapes de sécurité pour évacuer ces éventuelles surpressions. Ces soupapes assurent très bien leur fonction de sécurité, mais elles sont trop sensibles aux perturbations énergétiques du milieu dans lequel elles évoluent. En effet, les ondes de choc générées par le fonctionnement normal du turboréacteur créent des surpressions fugaces qui déclenchent les soupapes à mauvais escient et modifient ainsi le fonctionnement optimal du système. Il en découle des problèmes de surconsommation de carburant et de vibrations. Pour éviter ces problèmes, il est important que les soupapes arrivent à interpréter correctement l'action d'une surpres-

sion due à un problème technique, de celle imputable à une surpression fugace générée par le fonctionnement normal du turboréacteur. Or, il est quasiment impossible d'expérimenter en vol des solutions technologiques qui pourraient résoudre ce problème. La solution adoptée par AIRBUS est de simuler numériquement l'ouverture de cette soupape. L'intérêt de notre travail face à cette problématique, est de pouvoir servir de cas test afin qu'AIRBUS puisse éprouver les simulateurs. Une fois le modèle numérique mis au point, et répondant bien aux résultats de notre expérience, il pourra servir de support de recherche afin d'optimiser le fonctionnement des soupapes de sécurité des avions produits.

1.1 État de l'art

Depuis Paul Veille et l'invention du tube à choc, de nombreux chercheurs ont apporté leurs pierres à l'édifice. La problématique qui est en jeu dans ce document, est complexe et n'a jamais été mise en œuvre expérimentalement. Le travail qui a permis cette réalisation a nécessité la compréhension et la mise en application de savoirs qui découlent de plusieurs années de recherche sur la thématique des ondes de choc et des phénomènes qui leurs sont associés. L'expérience dont le principe a été décrit dans le paragraphe précédent, nécessite l'utilisation d'un tube à choc. C'est T80, le tube à choc de l'IUSTI [17] qui a été choisi. Sa souplesse d'utilisation et son adaptabilité à divers moyens de diagnostic en font un outil expérimental de grande qualité parfaitement adapté à cette étude.

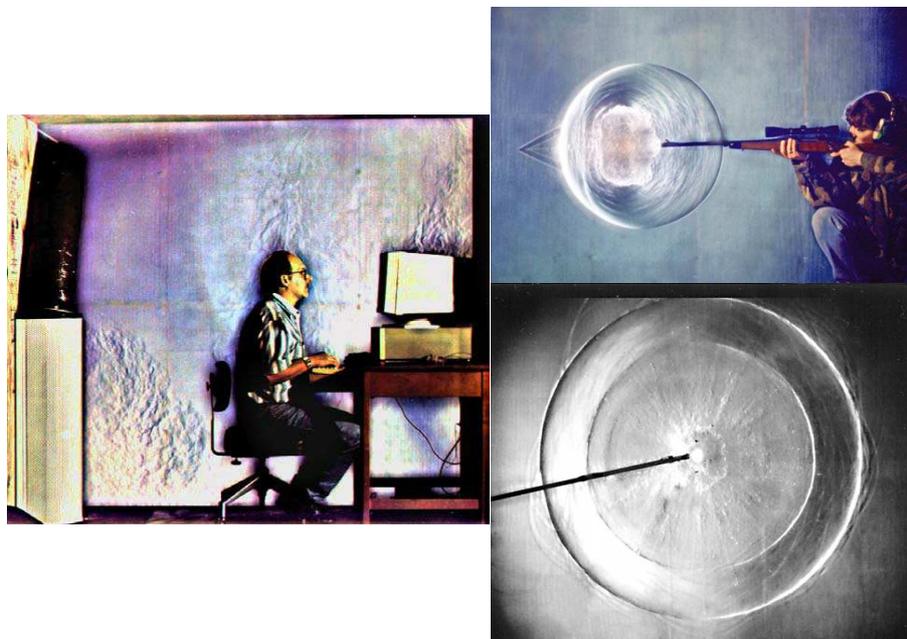


FIGURE 1.1 – Trois exemples de visualisation strioscopique réalisées par G.S. Settles mettant en évidence des écoulements et discontinuités gazeuses (ondes de choc et ondes de souffle) : à gauche on distingue les fluctuations de l'air ambiant dans un bureau, à droite : la sortie d'une balle lors d'un tir de carabine et l'explosion d'une faible charge sphérique [29] [30] [31] [32] [33].

Une partie de cette étude est basée sur l'analyse des écoulements qui évoluent aussi bien en périphérie de la porte lors de son ouverture, qu'à l'intérieur du tube à choc. Une autre partie s'attarde sur la réponse dynamique de la porte. Le choix de visualiser simultanément l'écoulement à la sortie du tube et le mouvement de la porte a nécessité l'utilisation d'un dispositif

optique spécifique. La strioscopie est une des méthodes permettant ce type de visualisation. Inventée en 1864 par August Toepler, elle a une sensibilité suffisante pour détecter les variations très faibles de densité d'un gaz. Depuis plusieurs décennies cette technique est exploitée par de nombreux chercheurs. Par exemple, W. Bleakney et A.H. Taub [8], en 1949, l'utilisaient couplée avec un appareil photographique pour visualiser l'interaction d'un choc avec une paroi. La visualisation strioscopie est depuis devenue un outil scientifique de base. L'amélioration des moyens techniques permet maintenant d'associer cette méthode de visualisation à un système d'acquisition vidéo ultra-rapide. Gary S. Settles, [29] [30] [31] [32] [33] en développant ce mode de prise de vue pour des applications très diverses, a permis d'approfondir les champs d'investigation sur les écoulements et les propagations d'ondes supersonique (figure 1.1).

Comme nous l'avons présenté dans le paragraphe précédent, les principes de physique mis en jeu pour mettre la porte en mouvement sont simples. Aussi bien la dynamique fluide dans un tube à choc, que l'évolution en rotation d'un solide causée par le déséquilibre des efforts auxquels il est soumis, sont des résultats scientifiques triviaux. Là où ce document apporte une contribution originale, c'est dans la manière dont ces principes interagissent et évoluent entre eux au cours du temps.

D'après la description du protocole expérimental, au début de l'expérience, le tube à choc est fermé. Les écoulements dans le tube vont se comporter comme dans le cas d'un tube à choc classiquement fermé. A l'instant où la porte va commencer à s'ouvrir, la physique du fluide et les limites du problème fluide vont être modifiées. Des ondes et du gaz contenus dans le tube vont sortir et la porte changée de position angulaire.

Plus tard dans le déroulement de l'expérience, les ondes de choc impactent la porte avec des formes de réflexion plus ou moins complexes. L'étude expérimentale de ces réflexions fut initiée par W. Bleakney et A. H. Taub [8] et a été poursuivie depuis par de nombreux chercheurs. H.G. Hornung et H. Oertel [12] [13] par exemple se sont concentrés au travers d'expériences sur la transition qu'il existe entre les différentes formes de réflexion. Plus tard, G. Ben-dor *et al.* [2] [3] ou encore H. Li [22] ont poursuivi cette thématique et synthétisé l'ensemble de ces résultats expérimentaux. Il découle de cette littérature que dans les conditions où nous utilisons des ondes de choc à faible nombre de Mach ($1.08 < M_{is} < 1.5$), ces réflexions sont caractérisées comme étant régulières.

En continuant leur progression, les ondes de choc vont se propager dans l'air ambiant de la salle d'expérience. En évoluant ainsi dans un milieu à pression atmosphérique, ces ondes vont perdre de leur intensité en se détendant via des vortex. O. Igra, J. Falcovitz *et al.* [14] ont très bien détaillé ce processus au travers d'une étude à la fois numérique et expérimentale, où une onde

choc plane se diffracte dans une cavité de forme carrée. Ici l'écoulement est contenu dans une veine d'essai rectangulaire, son évolution s'effectue en deux dimensions. Ils y mettent en évidence d'une part la structure de vortex qui se forme à partir de l'angle droit que forme la paroi le long de laquelle évolue le choc avec la cavité carrée. D'autre part, ils détaillent comment le choc plan se déforme et finit par s'atténuer en une onde de Mach.

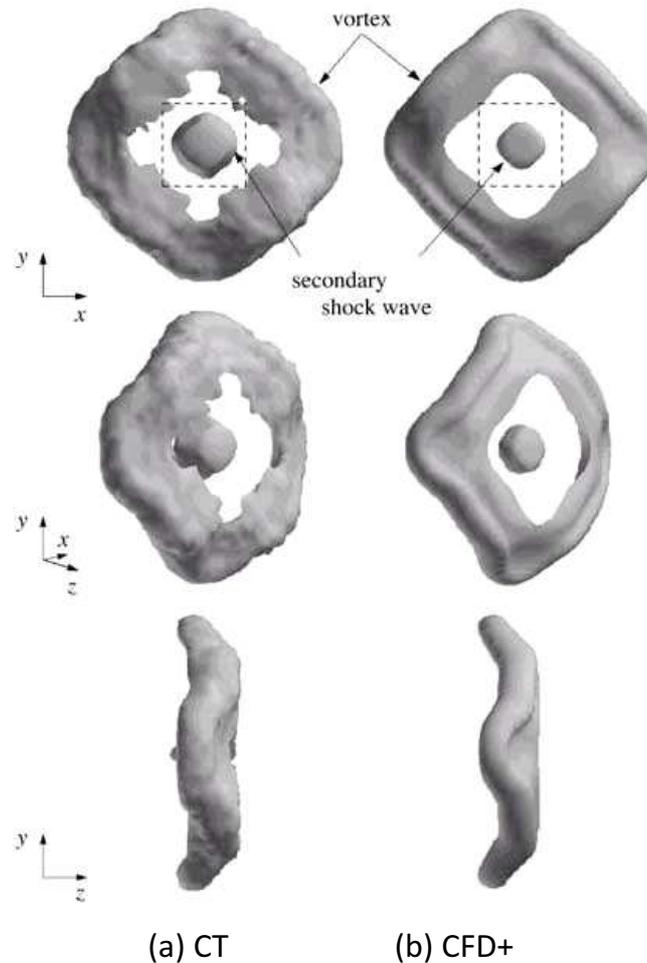


FIGURE 1.2 – Exemple de résultats obtenus par H. Honma *et al.* [11] sur l'étude du vortex annulaire expulsé d'un tube à choc carré ouvert : comparaison à gauche de la reconstruction de l'écoulement à partir des relevés expérimentaux et à droite des résultats numériques équivalents.

Contrairement à cette étude, dans notre expérience, une fois la porte ouverte à la sortie du tube, l'évolution du fluide se fait dans toutes les directions de l'espace. L'étude de la sortie des ondes de choc et des gaz en mouvement dans

cette configuration est nettement plus complexe. Les formations d'ondes et d'interfaces qui sont générées dans ces conditions intéressent la communauté scientifique depuis plusieurs décennies. Dans les années 1950 déjà, F.K. Elder *et al.* [10] et G. Rudinger [27] [28] étudiaient les ondes de choc et la formation du vortex annulaire qui en résulte à la sortie de la chambre basse pression d'un tube à choc ouvert. L'exploration expérimentale de cette physique complexe est encore aujourd'hui le sujet de beaucoup de travaux, et de nombreux chercheurs s'y intéressent en exploitant les techniques d'investigation les plus modernes. Ainsi, M. Brouillette *et al.* [9] l'ont aussi étudiée lors de la sortie d'une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.34$ grâce à de la visualisation stroboscopique. J.H. Arakeri *et al.* [1] ont apporté leur contribution par une analyse de vélocimétrie en utilisant une méthode de PIV (Particle image velocimetry). H.D. Kim *et al.* [19] ont exploré les effets sonores de cette sortie de l'onde de choc. Et surtout des travaux très pointus conduits par Z. Jiang *et al.* [16] et H. Honma *et al.* [11] traitent d'un point vue expérimental et numérique l'évolution d'une onde choc et du vortex annulaire qui suit sa sortie d'un tube à choc à section carrée. Ils s'appuient notamment sur des résultats obtenus avec un montage expérimental qui permet une visualisation spatiale de ces phénomènes fluides par interférométrie (figure 1.2). En complément de ces études, Q. Yu et H. Grönig [35] ont examiné l'influence de la forme de l'extrémité du tube à choc ouvert sur l'écoulement qui en sort. Bien que dédié à une application industrielle, ce travail souligne la complexité de ces écoulements et présente des résultats très complets sur la propagation d'une onde de choc et de l'interface qui lui succède lors de son expulsion dans un champ libre (figure 1.3). Malheureusement la totalité de ces études se limite à quelques millisecondes après la sortie de l'onde choc incidente. Dans l'expérience que nous avons menée, le temps caractéristique est celui de l'ouverture de la porte, soit plusieurs dizaines de millisecondes. Malheureusement, les phénomènes qui sont observables sur une telle durée d'expérimentation ne sont pas traités dans la littérature et nous ont demandés une attention particulière.

L'interaction des ondes de choc avec un solide est déjà en soit un thème de recherche largement éprouvé depuis des décennies. Le but principal de ces recherches est de comprendre comment une onde de choc est perturbée par la présence d'un solide avec des formes plus ou moins complexes sur son passage. C'est à dire comprendre comment l'onde est déformée, réfléchie, diffractée. Dans la littérature, de nombreux exemples traitent ce genre de problèmes. Parmi ces travaux, on retrouve ceux de K. Kontis *et al.* [20] qui a participé à l'analyse de ce type d'interaction avec des cylindres ou des sphères. On y trouve aussi ceux de K. Takayma et Z. Jiang [34] dont le travail expérimental se focalise sur l'interaction d'une onde de choc avec une rampe, un solide prismatique fixé le long d'une paroi de leur tube choc. La finalité de cette étude était de servir de cas test afin d'éprouver une méthode

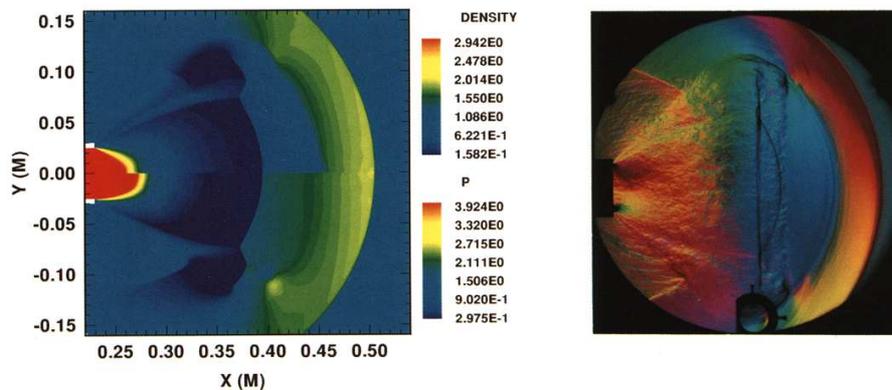


FIGURE 1.3 – Exemple de résultats obtenus par Q. Yu et H. Grönig [35] sur l'écoulement expulsé d'un tube à choc classique ouvert : comparaison à droite de la visualisation expérimentale par strioscopie couleur de l'écoulement et à gauche des résultats numériques équivalents.

de simulation numérique. Dans ces travaux, l'ordre de grandeur des solides est le même que celui de la veine d'essai du tube à choc ; malheureusement le solide que l'onde de choc rencontre est figé et on ne s'intéresse qu'aux effets subits par l'onde de choc incidente.

D'autres travaux, qui remontent eux aussi à plusieurs années, ont exploré unilatéralement, l'évolution d'un solide après qu'il ait subi l'action d'une onde de choc. O. Igra et K. Takayama [15], puis G. Jourdan *et al.* [18] ont étudié l'évolution du coefficient de traînée d'une sphère dans un écoulement non-stationnaire. L'expérience consistait à suivre le déplacement d'une sphère de petit diamètre à l'intérieur d'un tube à choc une fois qu'une onde de choc l'ait mise en mouvement. L'ordre de grandeur de la sphère est beaucoup plus petit que celui de la veine d'essai du tube à choc. Il en résulte que la perturbation de l'écoulement par le solide n'est pas perceptible. Seuls quelques travaux expérimentaux mettent en jeu l'interaction entre des solides et des ondes de choc qui ont la même échelle de grandeur. En 1957, R.F.Meyer [25] a placé une feuille d'acétate de cellulose perpendiculairement à l'écoulement d'un tube à choc (figure 1.4). Cette étude avait pour but de vérifier la théorie établie par Friedrich en 1948. Il a procédé à plusieurs expériences en modifiant l'épaisseur des feuilles d'acétate de cellulose. Il a choisi d'utiliser trois épaisseurs de feuilles différentes : 0.001, 0.0017 et 0.003 pouces, et les a fait percuter par une onde choc incidente avec un nombre de Mach de 1.5. Il analyse comment l'onde de choc transmise, l'onde de choc réfléchie et la feuille d'acétate de cellulose évoluent. Les résultats expérimentaux se superposent très bien aux prédictions de la théorie. Dans cette expérience, l'interaction fluide-structure est évidente, le mouvement de la feuille modifie

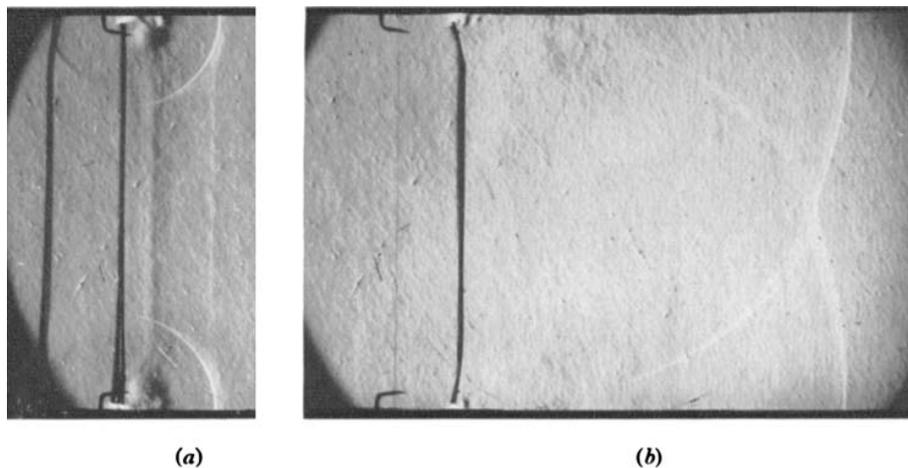


FIGURE 1.4 – Exemple de résultats obtenus par R.F. Meyer [25] lors de l'interaction d'une feuille d'acétate de cellulose avec une onde de choc plane se propageant de gauche à droite : sur le cliché a), on distingue de gauche à droite l'onde de choc réfléchi en noir, puis la feuille et en blanc, l'onde de choc transmise ; sur le cliché b), pris 180 microsecondes plus tard, la feuille s'est déplacée dans le sens de l'écoulement et l'onde de choc transmise a continué sa course.

les conditions de pression derrière le choc réfléchi, il y génère une détente, et derrière le choc transmis, une compression. Plus récemment, en 1992, S.M. Nabulsi et N.W. Page [26] ont approfondi cette étude en faisant varier les gaz de chaque côté de la feuille mobile et ont eux aussi vérifié l'adéquation de leurs résultats avec la théorie de Friedrich. Cependant aussi bien dans l'étude théorique que dans les deux expériences, la masse du solide en mouvement est nulle ou considérée comme telle. De plus cette étude est très limitée dans le temps : elle ne dure seulement que 4 millisecondes. Les résultats de cette expérience ne peuvent donc guère contribuer à nos travaux. Les portes que nous avons utilisées sont pesantes et notre temps d'étude est dix fois plus long.

Le travail conduit en 1992 par Mazor *et al.* [23] [24], est un des rares qui se soit intéressé à une interaction fluide-structure où le solide a une masse significative. Il présente des résultats sous la forme d'une comparaison entre une solution numérique et sa validation expérimentale. L'expérience prend place dans un tube à choc ; on y étudie l'évolution des contraintes mécaniques dans un bloc de caoutchouc. L'onde de choc incidente générée par le tube à choc impacte une plaque d'acier qui écrase un morceau de caoutchouc dont les formes et les dimensions servent de paramètres. Les résultats détaillent comment l'onde de choc qui évolue dans le fluide est transmise sous la forme

d'ondes de compression au bloc de caoutchouc. Ici, la partie dynamique du solide n'est pas traitée. C'est dans ce cadre que nous avons démarré notre investigation. L'absence de travaux concernant directement la thématique de notre étude nous a obligé à multiplier les études paramétriques. Ainsi, nous avons expérimentalement isolé chacun des facteurs pouvant agir aussi bien sur la dynamique du solide que sur la dynamique du fluide. Les résultats que nous avons obtenus mettent en lumière comment chacun influe sur l'interaction entre ces deux physiques. Nous apportons ainsi une contribution nouvelle à la communauté scientifique des ondes de choc.

1.2 But de l'étude

La dynamique d'une porte s'ouvrant sous l'effet d'une surpression est suffisamment simple pour pouvoir être caractérisée expérimentalement. Le fond de ce travail a été d'explorer le comportement d'une simple porte soumise au passage d'une onde de choc. La mécanique en jeu dans cette expérience est limitée puisqu'elle concerne un solide animé d'un seul degré de liberté : la rotation autour d'un axe. Cette porte est parfaitement caractérisée d'un point de vue de la mécanique du solide ; nous connaissons ses dimensions, sa matière, donc sa masse et ses propriétés inertielles. L'idée consiste à impacter cette porte avec une onde de choc dont, pour elle aussi, les caractéristiques sont parfaitement connues et maîtrisées. Sous l'effet de la surpression dynamique générée par l'onde de choc, la porte va se mettre en mouvement. Ce document s'intéresse à la dynamique de cette porte en tenant compte des différents éléments physiques pouvant l'influencer.

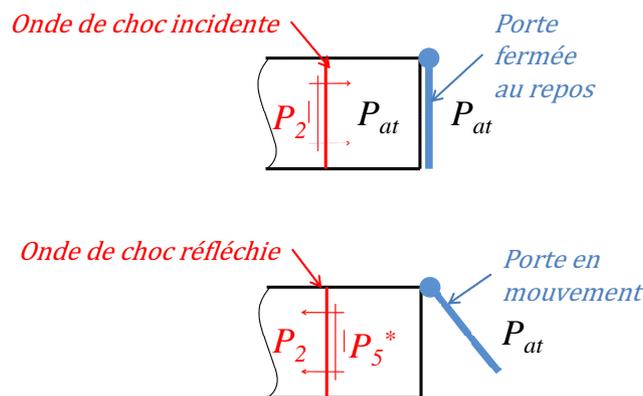


FIGURE 1.5 – Illustration montrant le comportement du montage expérimental.

Le cas échéant, pour approfondir cette étude, nous pouvons positionner initialement la porte avec une ouverture prédéfinie et éventuellement l'immobiliser en fin d'ouverture dans une position paramétrable. Ainsi il est possible d'analyser la modification des flux gazeux induits lors du mouvement de la porte ; mais aussi identifier le rôle de la géométrie de l'ouverture de l'extrémité du tube à choc dans cette évolution.

1.2.1 Approche théorique

Les hypothèses de l'approche théorique sont les suivantes.

- Les forces de frottement visqueux dues au déplacement dans l'air seront négligées, la vitesse de déplacement reste modérée,

- Le couple de frottement existant dans l'articulation qui assure le degré de liberté en rotation est négligeable. On s'en assurera lors de la conception de la maquette,
- Lors de l'interaction de l'onde de choc avec la porte, celle-ci est soumise à une surpression sur une seule de ses faces. L'autre face étant soumise à la pression atmosphérique.
- Le centre de poussée des forces de pression et le centre de gravité de la porte sont confondus.

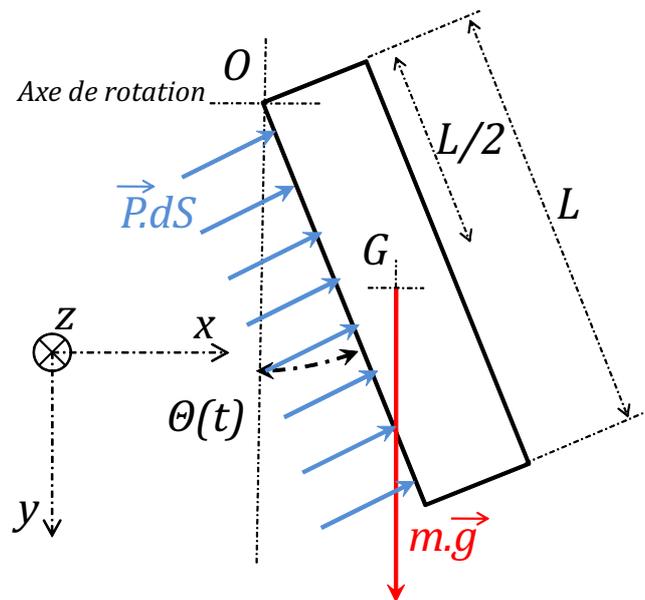


FIGURE 1.6 – Illustration du bilan des actions mécaniques s'appliquant sur la porte.

- m : masse de la porte
- $\bar{I}(O, x, y, z, t)$: la matrice d'inertie de la porte exprimée au point O
- I_z : moment d'inertie de la porte autour de son axe de rotation
- O : centre de la rotation
- G : centre de gravité de la porte
- g : accélération de la pesanteur
- l : largeur de la porte (80 mm)

- L : longueur de la porte (87 mm)
- S : surface d'action de la pression sur la porte
- \vec{a} : le vecteur accélération en translation de la porte
- $\vec{\ddot{\theta}}(t)$: vecteur accélération angulaire de la porte
- $\ddot{\theta}(t)$: accélération angulaire de la porte en projection sur son axe de rotation
- $\dot{\theta}(t)$: vitesse angulaire de la porte en projection sur son axe de rotation
- $\theta(t)$: position angulaire de la porte en projection sur son axe de rotation
- $\vec{P}(t, x, y)$: pression qui s'exerce sur la porte
- $\vec{R}_{maquette/porte}$: résultante de l'action mécanique de la maquette sur la porte au niveau de la charnière en O
- t : temps dont l'origine est l'instant de l'impact de l'onde choc incidente sur la porte
- x, y et z : paramètres géométriques définis sur la figures 1.6

En isolant la porte nous pouvons exprimer le principe fondamental de la dynamique qui gère son mouvement sous ses expressions en translation (équation 1.1) et en rotation (équation 1.2).

$$m \cdot \vec{a} = \int_S \vec{P}(x, y, z, t) \cdot dS + m \cdot \vec{g} + \vec{R}_{maquette/porte} \quad (1.1)$$

Avec ici $\vec{a} = \vec{0}$ car le seul degré de liberté de la porte est la rotation autour de son axe.

$$\vec{I}(O, x, y, z, t) \cdot \vec{\ddot{\theta}}(t) = \vec{OG} \wedge \int_S \vec{P}(x, y, z, t) \cdot dS + \vec{OG} \wedge m \cdot \vec{g} \quad (1.2)$$

Le choix de limiter le mouvement à un seul degré de liberté, la rotation autour de l'axe de la porte (O ; \vec{z}), permet de simplifier cette équation. Ainsi l'expression du principe fondamental de la dynamique en projection sur l'axe de rotation de la porte qui permet de gérer la dynamique de la porte peut

se réduire à l'équation 1.3.

$$I_z.\ddot{\theta}(t) = \int_0^L \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} y.P(x, y, z, t)dydz - \frac{L}{2}.m.g.\sin(\theta(t)) \quad (1.3)$$

Les seuls moments résultant des actions mécaniques extérieures responsables du mouvement de la porte sont ceux que créent l'action de la pression et le champ gravitationnel. Ainsi les paramètres à l'origine de la dynamique d'ouverture de la porte sont l'inertie de la porte, donc sa masse, et la pression appliquée sur cette dernière.

L'inertie de la porte est maîtrisée lors de sa fabrication par le choix des dimensions et du matériau (masse volumique).

La surpression est générée par le passage de l'onde de choc incidente. On connaît parfaitement son évolution temporelle et on sait parfaitement la maîtriser expérimentalement. Le problème est expérimentalement réalisable et contrôlable.

1.2.2 Limites de la théorie

Le problème du solide

Le développement du principe fondamental de la statique conduit à résoudre l'équation différentielle suivante se présentant sous la forme de l'équation du mouvement d'un pendule avec un second membre décrit par l'équation 1.4.

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{L.m.g}{2.I_z}.\sin(\theta(t)) = \frac{1}{I_z}.\int_0^L \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} y.P(x, y, z, t)dydz \quad (1.4)$$

La résolution de cette équation est complexe, mais de nombreuses méthodes (énergétique, par développement linéaire,..) y ont déjà apporté des résultats. D'autre part cette équation ne traduit absolument pas le couplage qui peut exister entre le mouvement du solide et le comportement du fluide.

Le problème du fluide

Toute la physique du fluide et son évolution dans le tube à choc est connue. Ainsi jusqu'à ce que l'onde de choc impacte la porte, le problème fluide est déjà résolu par les équations du choc droit. Mais la difficulté de poursuivre les calculs théoriques apparaît à l'instant de l'impact de l'onde choc sur la porte. La porte s'ouvre et des échanges de fluides apparaissent entre le milieu extérieur et l'intérieur du tube à choc. Les écoulements de fluides se propagent dans trois directions distinctes et sans la moindre symétrie. Ainsi le problème qui était unidimensionnel (la direction du tube à choc) jusqu'à présent devient tridimensionnel sans simplification possible. Et surtout, certaines limites du problème ne sont plus figées, la porte bouge ; et d'autres frontières n'existent plus, le fluide s'écoule par l'ouverture créée lors de la

mise en mouvement de la porte. Il est alors impossible de traiter ce problème de manière théorique. Aucun système d'équations ne peut nous aider à ce stade pour résoudre le problème fluide.

Le problème global

La dernière difficulté aurait été de pouvoir coupler les solutions des problèmes solide et fluide. Opération impossible d'un point de vue théorique dans un cas aussi complexe. Les seules approches possibles au problème posé sont l'expérimentation et l'utilisation d'une résolution numérique pour d'une part finir de résoudre le problème fluide et d'autre part essayer de coupler les deux problèmes. Dans cette thèse la principale réponse donnée est expérimentale. Bien qu'insuffisante pour résoudre le problème dans son ensemble, nous avons utilisé la solution du problème solide et la partie connue de la solution fluide et les équations du choc droit, pour dimensionner la maquette expérimentale.

Chapitre 2

OUTIL EXPÉRIMENTAL

Sommaire

2.1	Tube à choc T80	26
2.2	Diagnostic	28
2.2.1	Mesure de pression pariétale	28
2.2.2	Diagnostic optique	28
2.3	Maquette expérimentale	32
2.3.1	Présentation	32
2.3.2	Analyse dynamique	33
2.3.3	Assemblage et implantation des capteurs	36
2.3.4	Conception	37
2.3.5	Réalisation	39
2.4	Installation complète	41
2.5	Premier essai : gardons la porte fermée	43
2.5.1	Présentation	43
2.5.2	Résultats et discussion	44
2.5.3	Sur la réponse des capteurs	48
2.5.4	Synthèse	49

Ce chapitre décrit l'ensemble des moyens expérimentaux qui ont été mis en jeu pour cette étude. Il y est décrit le matériel existant que l'on a utilisé, aussi bien celui mettant en œuvre les phénomènes physiques que celui réalisant le diagnostic. D'autre part, une autre partie détaille la démarche de dimensionnement, de conception et de fabrication de la maquette expérimentale nécessaire à notre investigation. En fin de ce chapitre, nous détaillons comment l'ensemble de ce matériel a été assemblé et testé pour vérifier sa capacité à fournir les résultats scientifiques dont nous avons besoin.

2.1 Tube à choc T80

Le tube à choc T80 a été conçu en 1999 par Georges JOURDAN, Lazhar HOUAS et Richard GANAY (JOURDAN G. *et al.*) [17] ; la figure 2.1 en présente l'architecture. C'est un tube avec une section constante carrée de 80 mm de côté, dont la longueur totale est de 3.75 mètres. Il est composé de trois sections indépendantes guidées par un rail, devant être accouplées les unes aux autres pour constituer la totalité du tube à choc. La première section, la chambre haute pression (HP), en acier inoxydable et de 0.75 mètre de longueur, se raccorde à la chambre basse pression (BP) longue pour sa part de 2 mètres, elle aussi ayant été réalisée en acier inoxydable.

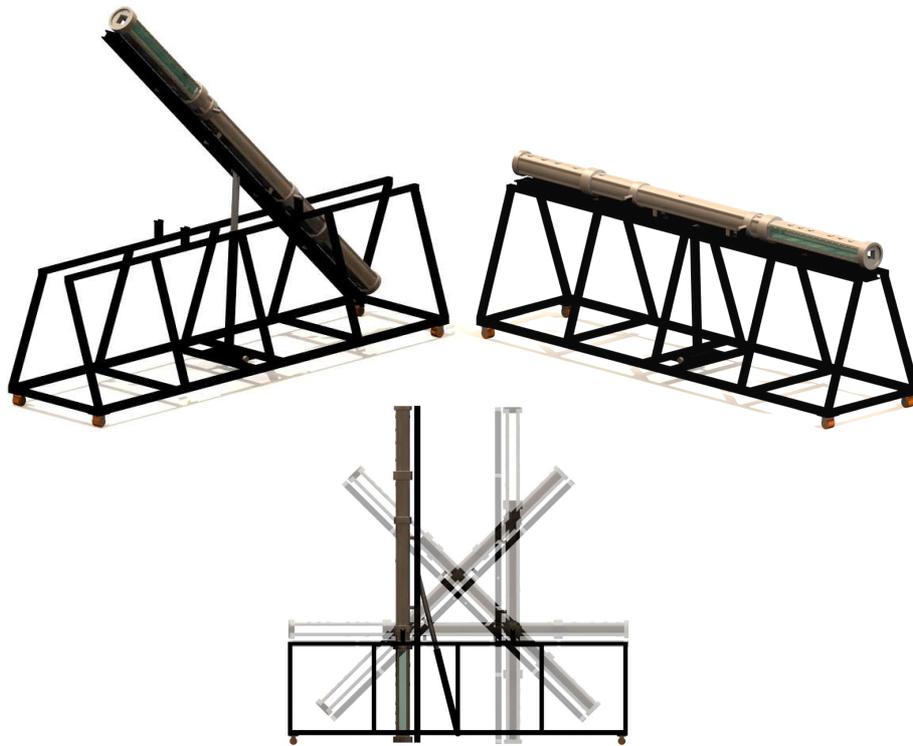


FIGURE 2.1 – Présentation du tube à choc T80 dans différentes configurations de fonctionnement.

Le système d'assemblage de ces deux sections permet la mise en place d'un diaphragme, qui au moment de sa rupture assurera la formation de l'onde de choc. Enfin une chambre expérimentale de 1 mètre de long complète la chambre basse pression. La chambre expérimentale, en acier inoxydable, est équipée de deux hublots en plexiglas permettant de visualiser les écoule-

ments à l'intérieur du tube. Un fond de tube amovible bouche l'extrémité de la chambre expérimentale et assure la fermeture étanche du tube à choc lorsque les trois sections sont assemblées. T80, une fois assemblé est un tube à choc conventionnel. Un compresseur ou une bouteille de gaz sous pression assure la montée en pression dans la chambre HP. Lorsque la pression est suffisante, le diaphragme qui a été parfaitement calibré, rompt quasi-instantanément. Il se propage alors dans la chambre basse pression un réseau d'ondes de compression qui vont très rapidement (sur quelques dizaines de centimètres) coalescer en une onde de choc. Pour maîtriser le nombre de Mach de l'onde de choc ainsi générée, nous avons la possibilité de contrôler la résistance mécanique du diaphragme, de modifier les gaz dans les chambres haute et basse pression ou encore de faire un vide partiel dans la chambre basse pression.

La plage de nombres de Mach que l'on peut obtenir ainsi va de Mach 1.01 à Mach 4, avec une précision de 2%. La principale originalité de ce tube à choc est de pouvoir aussi bien être utilisé horizontalement qu'avec une inclinaison quelconque, et ce jusqu'à la position verticale. Dans cette dernière configuration on peut choisir de positionner la chambre expérimentale dans la partie basse avec une onde de choc incidente se propageant de haut en bas, ou au contraire en position haute avec l'onde de choc incidente se propageant de bas en haut. Lors de mon travail de thèse, le tube à choc T80 a été utilisé exclusivement en position horizontale. La maquette expérimentale a été positionnée à l'extrémité de la chambre expérimentale, en lieu et place du fond de tube.

T80 possède 15 emplacements de 20 mm de diamètre permettant de recevoir des bouchons amovibles sur lesquels s'adaptent des capteurs de pression. Quatre de ces emplacements sont positionnés dans la chambre haute pression, 3 dans la partie intermédiaire de la chambre basse pression et 8 dans la chambre expérimentale. Sur les 15 emplacements, 13 donnent accès à la face supérieure de la veine d'essai et 2 dans la chambre expérimentale permettent d'avoir accès à la face inférieure. Le tableau 2.1 donne le détail de la position de ces emplacements.

Bouchons#	1	2	3	4/4'	5	6/6'	
Position (mm)	3630	3520	3410	3190	3080	2970	
Chambre	Essai	Essai	Essai	Essai	Essai	Essai	
Bouchons#	7	8	9	10	11	12	13
Position (mm)	2630	1770	900	615	415	265	115
Chambre	BP	BP	BP	HP	HP	HP	HP

TABLE 2.1 – Position des différents bouchons sur les sections d’essai, BP et HP ; l’abscisse zéro correspond à l’extrémité du tube, coté chambre HP (les ' signifient que les bouchons sont sur la paroi inférieure).

2.2 Diagnostic

2.2.1 Mesure de pression pariétale

Pour cette étude, nous nous sommes équipés de nouveaux capteurs de pression dynamiques piézo-résistifs de marque Endevco. Dans la gamme, nous avons choisi le modèle 8530B qui semble être le mieux adapté aux gammes de pression atteintes dans le tube à choc. Le modèle 8530B est un capteur piézo-résistif miniature de très grande sensibilité, permettant de mesurer des pressions différentielles. Il assure une tension de sortie pleine échelle de 300 mV pour de très hautes fréquences et pour des pressions variant de 0 à 200 psi (14 bars) absolues. Autonome et compensé en température, il reste stable et performant dans une large gamme de températures. Enfin, il présente aussi une excellente linéarité (même à 3 fois la gamme), une haute résistance aux chocs, et une bonne stabilité à haute température pendant les transitoires. Ces capteurs peuvent être implantés au moyen de " bouchons ", qui sont en fait des supports démontables, dans n’importe lequel des 15 emplacements du tube à choc décrits plus tôt. Les capteurs de pression ont été étalonnés par une série de tests préliminaires. Nous avons la possibilité d’utiliser seulement 8 capteurs en même temps ; cette limite étant fixée par le nombre de voies disponibles sur les deux oscilloscopes Tektronics que nous utilisons (quatre sur chacun).

2.2.2 Diagnostic optique

Le comportement des gaz dans la périphérie de la porte est complexe. La mesure de pression pariétale, bien que très précise, ne donne que des informations à l’emplacement des capteurs. Les informations quantitatives sont

donc limitées par le nombre de capteurs utilisés. Pour affiner notre compréhension des phénomènes mis en jeu, nous couplons la mesure de pression avec un système de visualisation des écoulements. Notre choix s'est porté sur un système de visualisation strioscopique couplé avec une caméra ultra rapide. La strioscopie est sensible à la variation de densité d'un gaz : ainsi toute variation de température ou de pression peut être détectée. Ce système de diagnostic ne permet cependant qu'une caractérisation qualitative des écoulements. Les phénomènes observés dans un tube à choc sont très brefs, souvent de quelques microsecondes ; un enregistrement ultra-rapide est nécessaire. Notre choix s'est porté sur une caméra rapide FASTCAM SA-1.1. Le montage optique permettant une visualisation strioscopique est un mon-

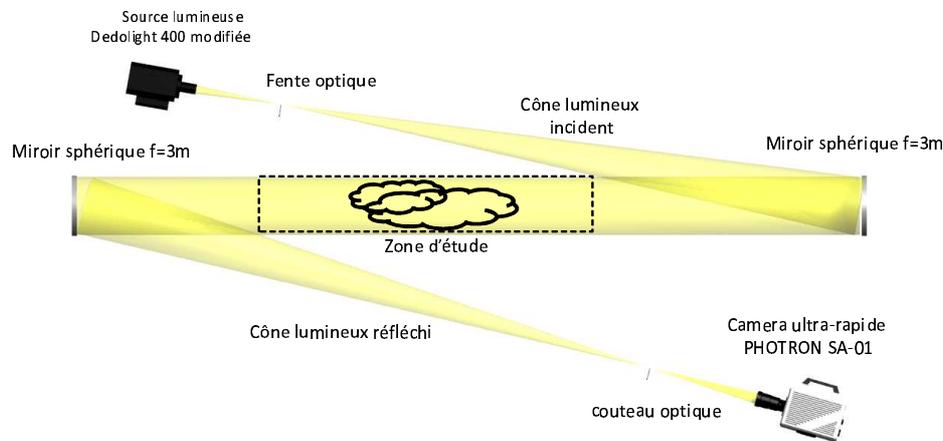


FIGURE 2.2 – Architecture du montage strioscopique en "Z" utilisé lors des expériences.

tage classique en Z ; il se compose d'une source lumineuse ponctuelle et de deux miroirs sphériques de 3 mètres de focale. La figure 2.2 détaille ce montage. La source lumineuse ponctuelle est en fait un projecteur à source froide continue Dedolight 400 qui a été modifié pour focaliser son flux lumineux en un point. Un jeu de lentilles permet de générer ce point de focalisation à seulement quelques centimètres du projecteur. En ce point, on a positionné une fente optique pour épurer le flux lumineux. Le faisceau issu de cette fente est alors projeté sur le premier miroir sphérique de 30 cm de diamètre. En faisant coïncider le point focal du miroir (3m) avec le centre de la source lumineuse, le faisceau lumineux réfléchi par le miroir est un parfait cylindre de 30 cm de diamètre, et dont l'axe est parallèle à celui du miroir. Ce cylindre parfait est le révélateur de montage strioscopique. Lorsqu'ils traversent un milieu fluide, les rayons lumineux sont réfractés par ce fluide. L'intensité de cette réfraction est fonction de la densité du milieu traversé. Ainsi, si un rayon de lumière du cylindre rencontre un milieu plus dense, il sera dévié

différemment de tous les autres rayons constituant le cylindre lumineux. Il ne sera plus parallèle à l'axe optique du miroir. Ce cylindre est ensuite refoca-



FIGURE 2.3 – Caméra ultra-rapide PHOTRON FASTCAM SA 1.1.

lisé lorsqu'il est réfléchi par le second miroir, formant ainsi un nouveau cône dont le sommet se trouve à la distance focale du miroir (3m). Tous les rayons lumineux ayant précédemment subi une déviation vont être réfléchis ailleurs qu'au sommet de ce cône. A ce nouveau point de focalisation ainsi créé, un couteau optique filtre le signal obtenu, il occulte en fait les rayons qui sont réfléchis ailleurs qu'au point focal. Ensuite le faisceau lumineux diverge et c'est dans ce faisceau divergeant qu'apparaissent les variations de densité de l'écoulement étudié ; les rayons lumineux précédemment occultés laissent des zones d'ombre. C'est à cet endroit que l'on positionne la caméra ultra rapide présentée sur la figure 2.3. Cette caméra ultra-rapide PHOTRON FASTCAM SA 1.1 permet d'obtenir des vitesses d'acquisition de 650 000 images par seconde et possède un capteur optique d'une résolution de 1024 pixels par 1024 pixels pour des cadences jusqu'à 5000 images par seconde. La durée de la visualisation est limitée par la mémoire interne de la caméra de 5 Giga-octets. Elle est fonction de la résolution et de la taille de la fenêtre de visualisation choisies.

Les données recueillies dans la mémoire interne de la caméra sont transmises par connexion Ethernet sur notre réseau et sont traitées par un logiciel Photron PFV Ver 0.3. La sauvegarde de ces données se fait au format .AVI, .JPG ou .TIFF et conserve tous les paramètres de réglage de la caméra utilisée pour l'acquisition (cadence d'enregistrement, vitesse d'obturation, définition de l'image). La caméra est équipée de plusieurs organes de communication avec l'extérieur lui permettant notamment de caler sa vitesse de prise vue sur la fréquence d'un laser ou à l'inverse d'imposer une fréquence de fonctionnement à un élément extérieur. La mise en route de l'acquisition de la caméra peut se faire manuellement, par l'intermédiaire d'un ordinateur ou d'une té-

lécommande ou par la réception d'un signal TTL ; celui-ci peut servir aussi bien à définir le début que la fin de la plage d'enregistrement. La souplesse de ce type de déclenchement permet ainsi de synchroniser parfaitement la caméra avec le phénomène à visualiser.

2.3 Maquette expérimentale

2.3.1 Présentation

Il s'agit de dimensionner et de concevoir une porte de surpression s'adaptant sur le tube à choc T80 s'ouvrant autour d'un axe de rotation fixe. La maquette doit permettre de mesurer et d'analyser l'évolution de la pression aux abords de la porte, d'étudier son comportement dynamique, et aussi de visualiser la propagation des différentes ondes de choc et de détente lors de son ouverture. Dans le cadre de cette étude on s'impose un temps d'ouverture de la porte de l'ordre de 40 ms sous l'action d'une de choc de Mach 1.25.

Pour faciliter l'implantation des portes de surpression sur le tube à choc T80 nous avons conçu un manchon additionnel qui doit se fixer à son extrémité. Celui-ci devant permettre la visualisation de l'écoulement, ses parois latérales sont réalisées en plexiglas ; pour les deux parois (supérieure et inférieure) nous avons utilisé de l'aluminium pour des facilités de fabrication. Les épaisseurs de ces éléments ont été choisies pour résister à des pressions statiques de 20 bars. Ainsi les flancs en plexiglas ont une épaisseur de 40 mm et les flancs en aluminium une épaisseur de 20 mm.

Pour assurer la continuité entre la paroi supérieure du tube à choc et la porte, une solution consistait à déporter l'articulation à l'extérieur de la maquette. Ainsi l'axe de rotation de la porte peut être confondu avec l'intersection du plan de la porte et de la face supérieure du tube (fig. 2.4).

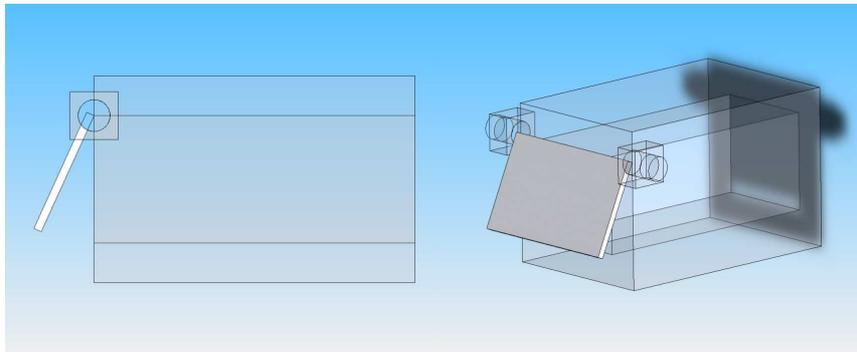


FIGURE 2.4 – Solution préliminaire du banc d'étude des portes de surpression : vue latérale et perspective.

Cependant, cette solution obstrue le champ de vision perpendiculaire à la porte et l'articulation masque une partie de l'écoulement dans la partie supérieure de la veine d'essai. Il lui a été préféré une articulation par charnières classiques en veillant à ce que celles-ci soient les plus fines possibles pour que

les discontinuités sur les parois du tube soient les plus faibles.

2.3.2 Analyse dynamique

Le comportement des solides soumis à des ondes de choc étant difficilement modélisable, il nous a été nécessaire d'imposer des hypothèses de calcul pour estimer de manière assez cohérente l'inertie que doivent avoir les portes de surpression. Ce calcul a eu pour but de nous éviter de mauvaises surprises lors des premiers essais sur les portes de surpression.

Hypothèses

L'action de la gravité et les frottements dans l'articulation sont négligés devant les efforts dynamiques mis en jeu.

On considère que la pression derrière le choc réfléchi s'applique uniformément sur la porte de surpression pendant 2 ms (c'est la durée caractéristique pendant laquelle la surpression derrière le choc réfléchi s'applique en fond de tube). De même on suppose qu'une fois ce délai passé, la porte est ouverte et la pression chute instantanément.

On a ciblé un temps d'ouverture de porte entre 30 ms et 50 ms. Pour nos calculs on se fixera à un temps d'ouverture de 40 ms.

On a estimé la surpression sur la face intérieure de la porte à 1.65 bars (donnée théorique de la pression derrière le choc réfléchi calculée à partir des équations de Rankine-Hugoniot pour un nombre de Mach de 1.25).

On suppose que le centre de poussée de la pression est au centre de la section du tube et que l'articulation de la porte se trouve sur la paroi supérieure du tube.

Détermination de l'inertie d'une porte

On a adopté comme modèle de comportement cinématique de la porte le graphique donné ci-dessous, avec dans un premier temps une accélération constante de la porte pendant un temps de 2 ms correspondant au temps où elle subit la surpression, puis une vitesse constante jusqu'à ce qu'elle ait couvert un angle de 90° , dans un délai de 40 ms (figure. 2.5). θ caractérise l'angle d'ouverture de la porte exprimé en radian. Pour la résolution suivante nous avons utilisé les équations temporelles de la position, de la vitesse et de l'accélération angulaire. Pour $t_0 < t < t_1$

$$\ddot{\theta}_1(t) = cste = \ddot{\theta}_0 \quad (2.1)$$

$$\dot{\theta}_1(t) = \ddot{\theta}_0 \times (t - t_0) + \dot{\theta}_0 \quad (2.2)$$

$$\theta_1(t) = \ddot{\theta}_0 \times \frac{(t - t_0)^2}{2} + \dot{\theta}_0 \times (t - t_0) + \theta_0 \quad (2.3)$$

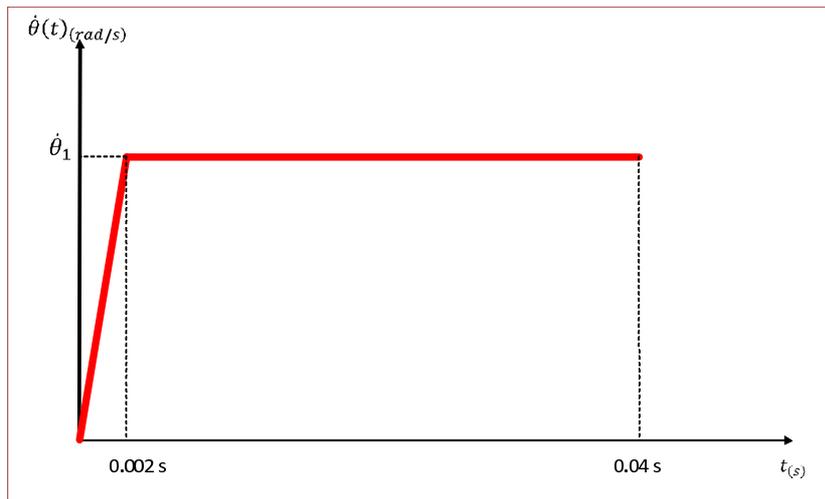


FIGURE 2.5 – Représentation graphique du comportement dynamique d'ouverture de la porte de surpression adopté en hypothèse pour cette étude

Détermination de l'accélération subie par la porte.

Pour $0 < t < 2$ ms

$$\theta_1(t) = \ddot{\theta}_1 \times \frac{t^2}{2} \quad (2.4)$$

$$\theta_1 = \theta_1(0.002) = \ddot{\theta}_1 \times \frac{0.002^2}{2} \quad (2.5)$$

Pour $2 \text{ ms} < t < 40 \text{ ms}$

$$\theta_2(t) = \ddot{\theta}_1 \times 0.002 \times (t - 0.002) + \theta_1 \quad (2.6)$$

$$\theta_2 = \theta_2(0.04) = \frac{\pi}{2} = \ddot{\theta}_1 \times 0.002 \times (0.04 - 0.002) + \ddot{\theta}_1 \times \frac{0.002^2}{2} \quad (2.7)$$

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\frac{\pi}{2}}{\frac{0.002^2}{2} + 0.002 \times (0.04 - 0.002)} \quad (2.8)$$

$$\ddot{\theta}_1 = 20138 \text{ rad.s}^{-1} \quad (2.9)$$

Détermination du moment d'entraînement de la porte.

Soit C le moment d'entraînement en N.m.

Soit P la surpression sur la face intérieure de la porte en pa

Soit S la surface de la section du tube à choc en m^2

Soit R la distance entre le centre de poussée de la pression sur la porte et l'axe de rotation de celle-ci en m

Soit I l'inertie de la porte autour de l'axe de rotation en kg.m^2

$$C = P \times S \times R = 1.65.10^{-1} \times (80)^2 \times 40.10^{-3} = 42.2 \text{ N.m} \quad (2.10)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique appliqué autour de l'axe de rotation de la porte :

$$C = I \times \ddot{\theta}_1 \Rightarrow I = \frac{C}{\ddot{\theta}_1} \quad (2.11)$$

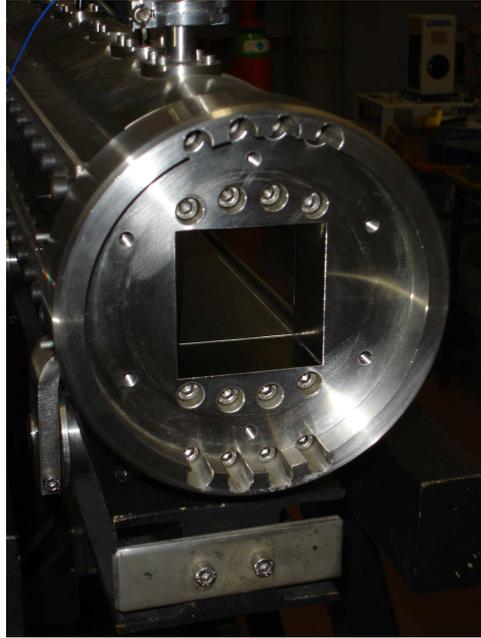


FIGURE 2.6 – Fond du tube à choc T80.

$$\Rightarrow I \simeq 2.1.10^{-3} \text{ kg.m}^2 \quad (2.12)$$

Nous avons choisi de concevoir plusieurs portes de surpression dont les valeurs différentes d'inerties encadrent la valeur que nous venons de déterminer.

2.3.3 Assemblage et implantation des capteurs

Le manchon supportant la porte de surpression doit se fixer sur le fond du tube T80 (fig. 2.6). Pour cela nous avons choisi de concevoir une bride d'adaptation (fig. 2.7). Les différents capteurs de pression (Endevco, modèle 8530B) retenus pour cette expérience ont des dimensions imposant notamment une épaisseur minimale de la porte de 18 *mm*. Leur implantation se fera directement sur la maquette et pas à l'aide de "bouchon" comme sur le tube à choc.

Pour stopper le mouvement de la porte dans une position prédéfinie, la solution retenue est l'utilisation de cales interchangeableables. Quatre cales sont conçues pour identifier des comportements correspondants à des positions caractéristiques d'ouverture de la porte (0°, 30°, 45°, 90°). Nous avons choisi d'apposer sur ces cales de la bande auto-agrippante dans le cas où la porte doit être maintenue en position ouverte.



FIGURE 2.7 – Projet de réalisation de la bride d'adaptation du manchon expérimental.

Nous avons choisi d'apposer sur ces cales de la bande auto-agrippante dans le cas où la porte doit être maintenue en position ouverte.

2.3.4 Conception

Les différents critères de dimensionnement et d'adaptabilité détaillés dans le chapitre précédent nous ont conduit à concevoir trois portes identiques mais avec des matériaux différents : aluminium, acier et sandwich carbone/nid d'abeilles. Elles peuvent s'adapter sur un manchon dont les plans sont présentés sur la figure 2.8. Ainsi, en utilisant la différence entre leur masse volumique, nous avons obtenu des inerties différentes.

Les trois portes réalisées sont : une en aluminium, une en acier inoxydable et la troisième en sandwich composite carbone/nid d'abeille.

Les inerties des portes sont respectivement de : 1.10^{-3} kg.m², de 3.10^{-3} kg.m² et $0.2.10^{-3}$ kg.m². Sur la même figure 2.8, est présenté le détail de l'implantation des quatre capteurs utilisés sur la maquette. Leur position a été choisie pour avoir une information de l'évolution de la pression sur toutes les faces de la veine d'essai. Ainsi, un capteur est installé sur la face inférieure du manchon, un autre sur sa face supérieure, et un troisième sur une face latérale. Le système expérimental possède un plan de symétrie vertical. Un capteur sur une seule des faces latérales suffit. Le quatrième et dernier capteur est implanté au centre de la porte.

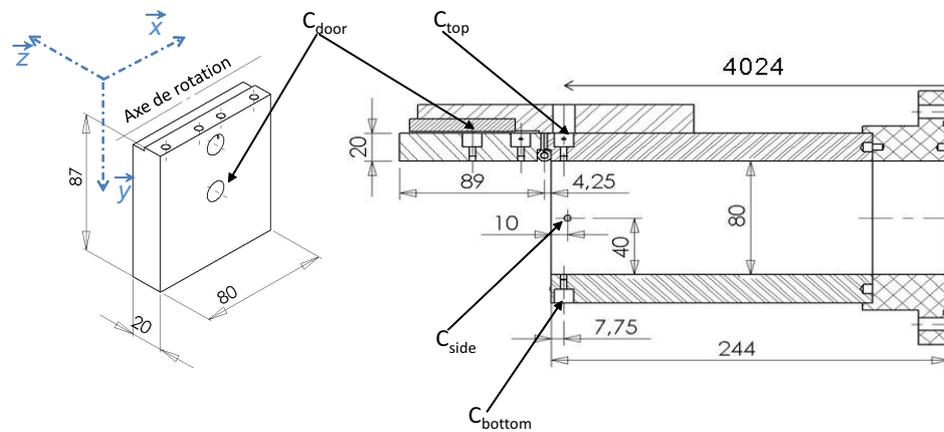


FIGURE 2.8 – Projet de réalisation des portes de surpression, les dimensions sont en mm; C_{bottom} , C_{side} , C_{top} et C_{door} représentent respectivement les emplacements des capteurs positionnés sur les faces inférieure, latérale et supérieure de la veine d'essai et au centre de la porte mobile.

2.3.5 Réalisation

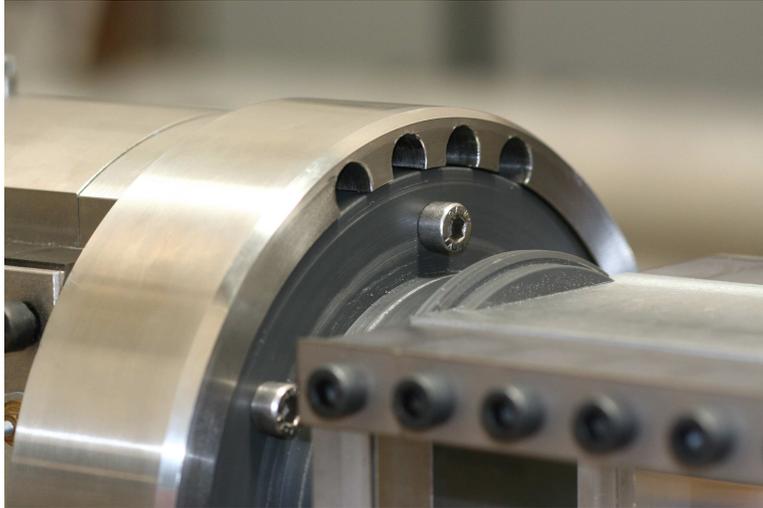


FIGURE 2.9 – Photographie de la maquette expérimentale en place sur le tube à choc T80.

Suite à notre étude de conception, la fabrication et l'assemblage de la maquette de test ont été réalisés au sein de nos ateliers par messieurs Sady NOEL, Frédéric RATOUCNIAK et Paul CERVETTI.

Présentation de la maquette

Conformément à l'étude de conception, la maquette s'adapte parfaitement en bout du tube à choc T80 grâce à sa bride d'adaptation. Nous avons choisi de réaliser cette bride en PVC pour ses qualités d'usinabilité et ses caractéristiques mécaniques suffisantes pour cette application. La figure 2.10 présente le détail des formes de la bride de fixation. Elle est maintenue sur le fond du tube par l'intermédiaire de six vis Chc M8-35 permettant une liaison suffisamment rigide pour supporter le flux de contraintes présent dans le tube lors d'un tir (figure 2.9). L'étanchéité de la jonction se fait à l'aide d'un joint torique placé dans une gorge usinée dans la bride.

Réalisation des portes

Les trois portes ont été réalisées, comme la photo présentée figure 2.11 le montre, de manière à ce que leurs dimensions soient identiques. On assure ainsi une position identique du centre de gravité de la porte quelque soit

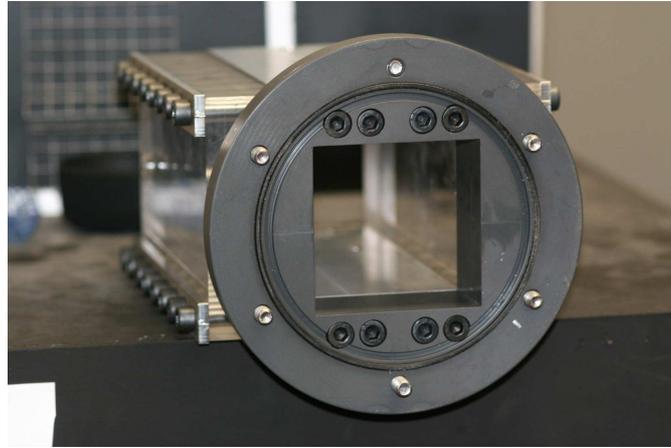


FIGURE 2.10 – Photographie de la bride d'adaptation de la maquette expérimentale.

le modèle choisi. La porte en carbone n'étant pas réalisée avec un matériau homogène, il a fallu y ajouter des masselottes d'équilibrage pour assurer cette condition.

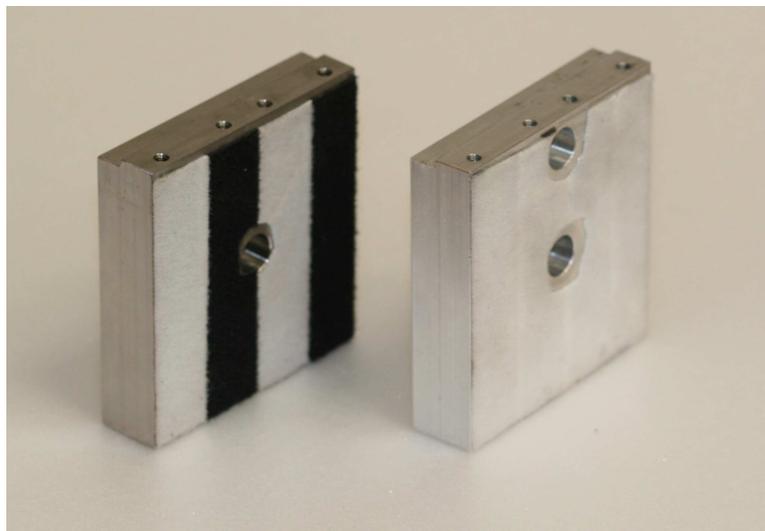


FIGURE 2.11 – Photographie des portes de surpression réalisées.

2.4 Installation complète

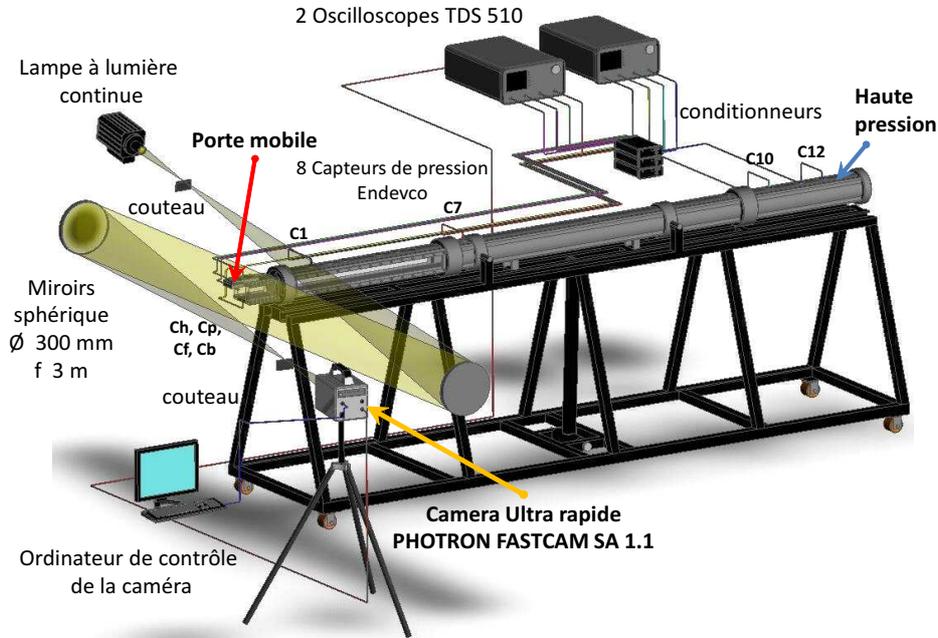


FIGURE 2.12 – Présentation virtuelle de l'installation expérimentale équipée de la porte de surpression et des systèmes de diagnostic.

La figure 2.12 présente une vue du montage expérimental dans son intégralité. On y retrouve le tube à choc T80 en position horizontale équipé de la maquette expérimentale. Le système de diagnostic optique a été positionné de manière à pouvoir visualiser les écoulements à la fois dans la veine d'essai et à l'extérieur du tube à choc une fois la porte ouverte. Enfin, on y voit le détail de l'implantation des capteurs le long du tube à choc, deux dans la chambre HP, C10 et C12, et deux autres dans la chambre basse pression, C7 et C1. La photo figure 2.13 montre la maquette instrumentée avec les quatre capteurs ENDEVCO. Telle qu'on la voit, elle est équipée de la porte en aluminium et est configurée pour pouvoir s'ouvrir intégralement (de 0° à 90°). Une fois l'ouverture maximale atteinte, la bande auto-agrippante immobilise la porte.

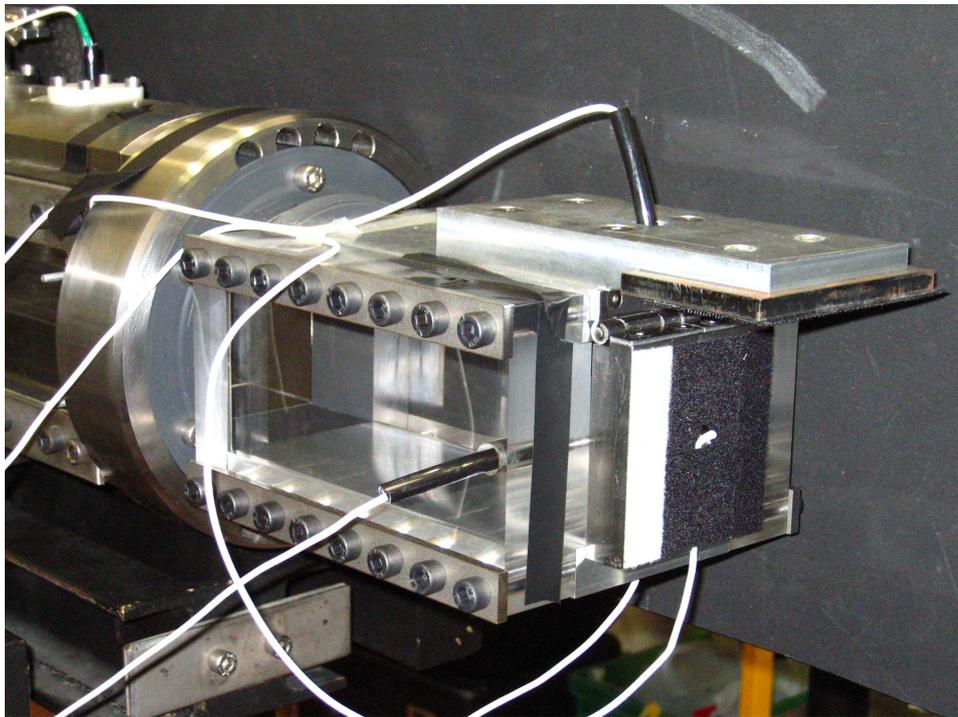


FIGURE 2.13 – Photographie de la maquette expérimentale instrumentée avec les capteurs de pression ENDEVCO et équipée de la porte en aluminium.

2.5 Premier essai : gardons la porte fermée

Ce premier essai a pour but d'éprouver la résistance de la maquette ainsi que son système de diagnostic. Pour ce faire nous avons choisi d'immobiliser la porte en position fermée. Il sera aussi intéressant d'identifier l'influence du manque d'étanchéité entre la porte fermée et l'extrémité de la maquette. La question est de savoir dans quelles mesures ces fuites peuvent modifier l'écoulement dans le tube à choc.

2.5.1 Présentation

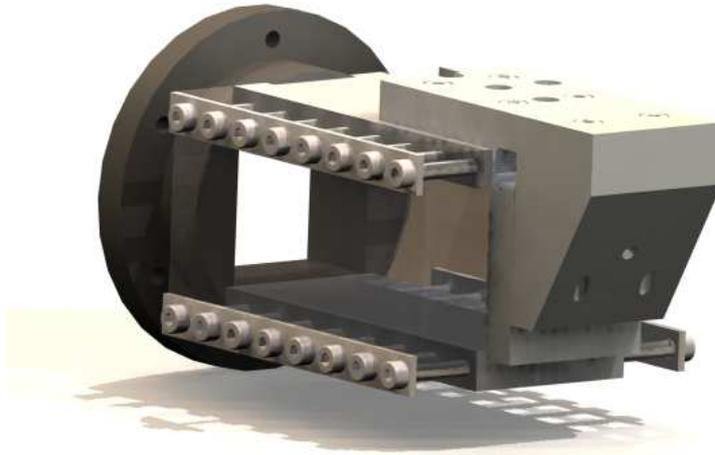


FIGURE 2.14 – Représentation volumique de la maquette avec la porte en configuration maintenue fermée.

La figure 2.14 montre comment la maquette a été configurée pour maintenir la porte fermée. Aucune étanchéité n'est réalisée, ni au niveau des charnières ni au niveau du contact entre la porte et la maquette. Nous générons une onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ en utilisant un diaphragme constitué de deux feuilles de papier aluminium. Grâce à la visualisation stroboscopique et à la caméra ultra-rapide, nous filmons ce qui se passe au niveau de la porte.

La pression est enregistrée aux huit stations de mesure présentées dans le tableau 2.2. Quatre capteurs sont placés le long du tube à choc et quatre

Capteurs	C12	C10	C7	C1	C_{top}	C_{bottom}	C_{side}	C_{door}
Position (mm)	265	615	2630	3630	4024	4024	4024	4029
Face	Haute	Haute	Haute	Haute	Haute	Basse	Flanc	Porte

TABLE 2.2 – Position des différents capteurs sur l’installation expérimentale ; la position est donnée par rapport à l’extrémité du tube, coté chambre HP

autres au niveau de la porte fermée.

2.5.2 Résultats et discussion

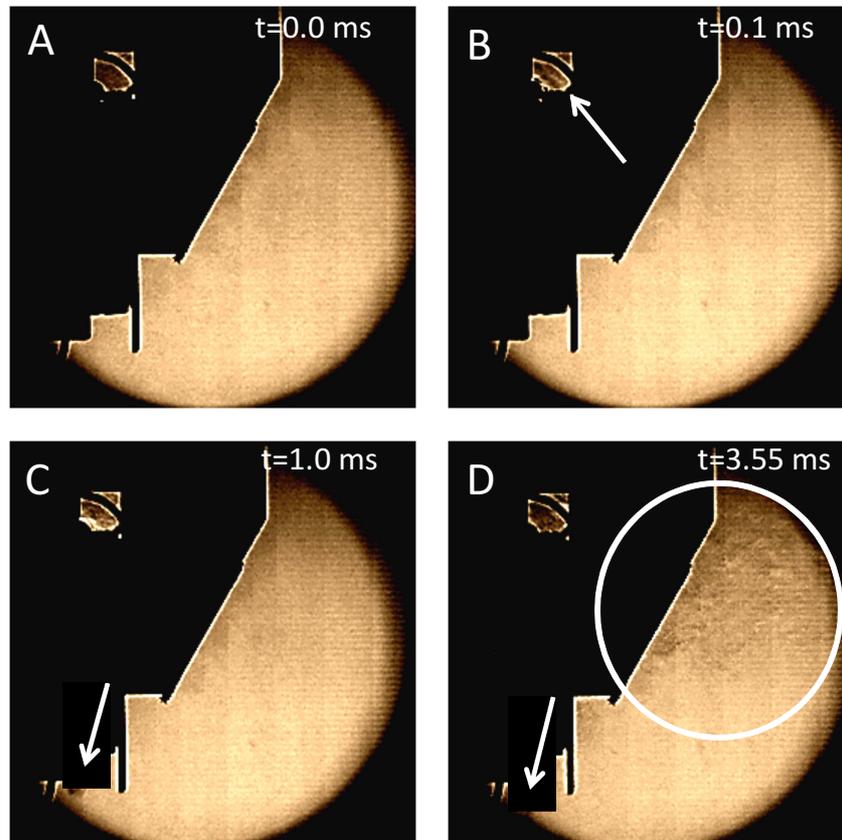


FIGURE 2.15 – Clichés strioscopiques enregistrés lors d’une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).

La majeure partie des ondes générées lors de cette expérience se sont propagées à l'intérieur du tube à choc. Seuls quelques phénomènes fluides externes ont pu être observés avec le système de visualisation optique. La figure 2.15 présente quatre clichés enregistrés lors de l'expérience; l'origine des temps correspondant à l'impact de l'onde de choc incidente plane avec la porte. La photo A est prise à $t=0$ ms à l'instant de l'impact. On peut constater à $t=0.1$ ms, sur l'image B, que des ondes sont transmises au milieu extérieur au niveau des charnières. De $t=0.5$ ms et jusqu'à $t=6.7$ ms, des écoulements de fluide sont visibles sur tous les côtés de la porte. Les photos C et D, prises aux instants $t=1$ ms et $t=3.55$ ms, montrent la propagation des ces écoulements dans l'atmosphère. Tous ces clichés confirment que dans la configuration avec la porte fermée, des fuites existent et doivent par conséquent modifier l'écoulement dans le tube à choc.

Les signaux de pression enregistrés lors de cette expérience sont présentés sur la figure 2.16. Sur cette figure, les ondes sont identifiées et leur sens de propagation est indiqué par des flèches. Lorsque les flèches pointent la droite, les ondes se propagent de la chambre haute pression vers la chambre basse pression, et inversement. Ces signaux de pression permettent une étude plus quantitative de l'écoulement interne du tube à choc. D'une manière générale l'évolution des ondes dans cette expérience est similaire à celle que l'on peut observer dans un tube à choc fermé de manière étanche. A la rupture du diaphragme, à $t=-8.6$ ms, un faisceau d'ondes de détente rw_1 et un faisceau d'ondes de compression sont générés. Les ondes de compression coalescent très rapidement en une onde de choc sw_1 . Le niveau de pression maintenu derrière le passage du choc incident atteint un niveau de 0.25 bar, niveau correspondant à une onde de choc incidente avec un nombre de Mach de 1.1. Les ondes de détentes remontent la chambre haute pression et se réfléchissent à son extrémité; à partir de cet instant elles sont identifiées par Rrw_1 . Ensuite, elles continuent leur progression vers la chambre basse pression.

Après leur passage, le niveau de pression est ramené à un niveau proche de celui de la pression atmosphérique. A $t=0$ ms, sur le signal (e), enregistré au centre de la porte, l'onde de choc sw_1 impacte la porte fermée et se réfléchit en Rsw_1 en direction de la chambre haute pression. Derrière ce choc réfléchi, le niveau de pression augmente encore jusqu'à atteindre cette fois une surpression de 0.57 bar. Ce niveau de pression est toujours conforme au résultat obtenu au même instant dans un tube étanche. Environ 3 millisecondes plus tard, toujours sur le même signal, le faisceau d'onde de détente Rrw_1 qui remontait le tube à choc, atteint la porte et se réfléchit à son tour sur celle-ci en R^2rw_1 . Il est intéressant de noter qu'en tenant compte du bruit de mesure, la surpression entre le choc réfléchi et la réflexion des détentes est restée constante. Il semble que les fuites observées sur la figure 2.15 n'aient pas d'influence sur la pression dans cette phase. Toujours sur le signal (e), on note aussi que le niveau de pression résiduel après le passage des détentes, après $t=10$ ms, est très légèrement supérieur à celui que l'on avait avant le

passage du choc incident, avant $t=0$ ms. Là aussi cette légère élévation de pression apparaît dans le cas où le tube à choc est parfaitement étanche. Donc d'un point de vue de la pression, jusqu'ici cette expérience est identique à celle que l'on aurait menée dans un tube à choc étanche.

L'onde de choc réfléchie Rsw_1 et la réflexion des ondes de détente R^2rw_1 traversent tout le tube à choc et se réfléchissent, aux environs de $t=11$ ms sur le fond de la chambre haute pression, signal (a) de la figure 2.16. Suite à cette réflexion, on nomme Rsw_1 par sw_2 et R^2rw_1 par rw_2 . Une nouvelle fois ces ondes vont faire un aller retour dans le tube à choc, et se réfléchir à $t=22$ ms sur la porte toujours fermée (signal (e)). Leurs réflexions sont identifiées par Rsw_2 et Rrw_2 . Ces deux réflexions vont à leur tour retournées dans la chambre haute pression et se réfléchir à son extrémité pour devenir sw_3 et rw_3 . Ces cycles de réflexion continuent jusqu'à ce que la pression dans le tube à choc ait trouvé un niveau d'équilibre. Dans notre cas, à cause des fuites au niveau de la porte, cette pression sera ramenée au niveau de la pression atmosphérique. En conclusion, malgré la présence des fuites au niveau de la porte, on peut considérer que le résultat de l'expérience menée avec la porte fermée est identique à celui que l'on aurait obtenu avec une étanchéité parfaite du tube, du moins sur les temps caractéristiques d'observation du phénomène d'ouverture (environ 50 ms).

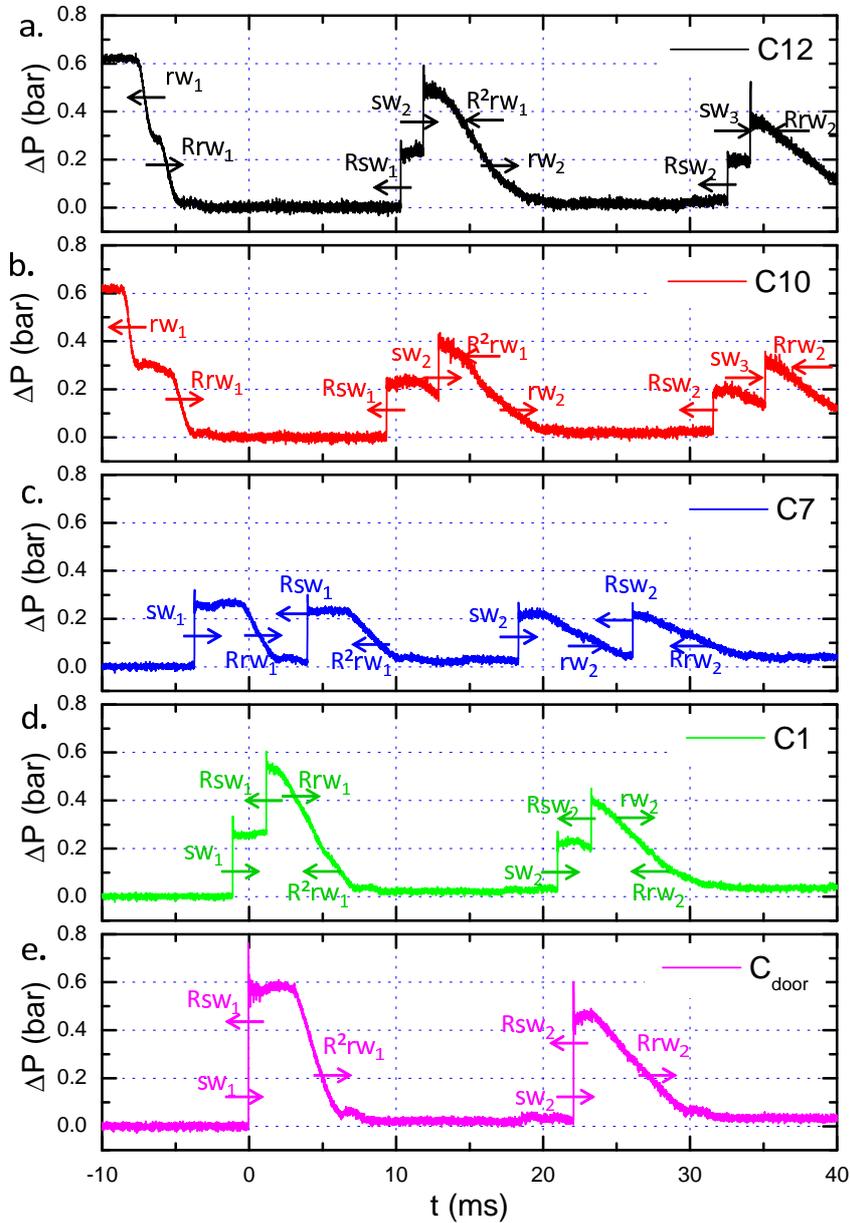


FIGURE 2.16 – Signaux de pression enregistrés aux stations C12, C10, C7, C1 et C_{door} lors d’une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).

2.5.3 Sur la réponse des capteurs

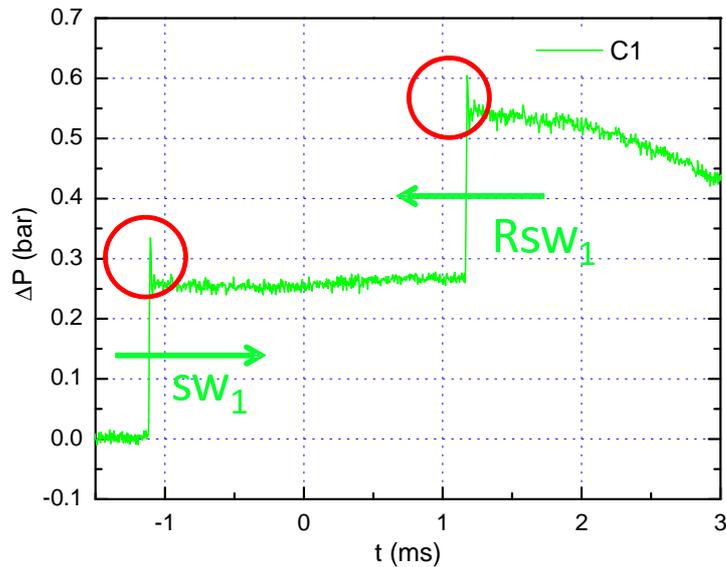


FIGURE 2.17 – Signal de pression enregistré à la station C1 lors d’une expérience avec la porte en aluminium maintenue fermée et impactée par une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#541).

Cette expérience a aussi permis d’éprouver la réponse des capteurs et d’appréhender leurs éventuels défauts. La figure 2.17 est un zoom du signal de pression enregistré par le capteur en position C1 lors du passage de l’onde de choc incidente sw_1 et de sa réflexion. Comme précédemment, le sens des flèches indique le sens de propagation des ondes identifiées. Sur cette figure, lorsque le choc est détecté, le signal de pression marque bien une marche : il est conforme à l’évolution théorique de la pression. Cependant au sommet de cette marche vient se superposer une impulsion signalée par les ronds rouges, il en est de même pour la détection du choc réfléchi Rsw_1 . Cette impulsion est un artefact de mesure dû à la conception des capteurs. Le cristal piézo-résistif étant positionné au fond d’un petit tube, lorsqu’une onde choc pénètre dans ce tube, des réflexions sont créées et très brièvement la pression s’élève plus haut que le normalement généré par l’onde choc. Ainsi, tous les signaux de pression enregistrés avec les capteurs de type ENDEVCO 8530B présentent au passage d’un choc cette impulsion. Il sera très important pour la justesse de l’étude, de considérer la pression établie après un choc seule-

ment après la fin de cette impulsion. Cette opération sera très facile à faire dans la majorité des cas, mais sera plus délicate lorsque l'onde détectée est une onde de souffle dont la durée est très limitée. Enfin toujours sur ces signaux de pression un bruit de mesure de quelques millivolts (millibars après conversion) est visible. Ce bruit est régulier en amplitude et en fréquence quelque soit la valeur de pression détectée. Une nouvelle fois il faudra tenir compte de ce bruit lors de la lecture de mesure.

2.5.4 Synthèse

Cette expérience préliminaire a été une bonne introduction à notre étude. D'une part, elle a démontré que la présence de fuites au niveau de la porte en position fermée n'avait pas d'impact significatif sur les premiers instants de l'expérience. Il n'est donc pas nécessaire d'approfondir la conception de la porte et de sa fermeture pour les rendre étanches avant l'impact de la première onde de choc incidente. D'autre part, nous avons considéré les problèmes liés à la prise de pression. Des défauts ont été identifiés sur les capteurs ENDEVCO 85320 B. Ainsi, au cours de cette étude, nous allons pouvoir prendre les dispositions nécessaires pour éviter des erreurs de mesure significatives.

Chapitre 3

ÉTUDE FONDAMENTALE DE L'ÉCOULEMENT EN TUBE À CHOC OUVERT

Sommaire

3.1	Porte entièrement ouverte : à 90°	51
3.1.1	Configuration de l'expérience	51
3.1.2	Résultats et première analyse	51
3.1.3	Optimisation du diagnostic et poursuite de l'analyse	55
3.2	Étude paramétrique de l'évolution de l'écoulement en fonction de l'ouverture partielle de la porte	63
3.2.1	Porte entrouverte à 45°	64
3.2.2	Porte entrouverte à 30°	66
3.3	Analyse et discussion	76
3.4	Conclusion	83

Les écoulements dans un tube à choc conventionnel fermé sont connus et maîtrisés depuis plus d'un demi siècle. Dans cette étude la configuration dans laquelle le tube à choc T80 a été utilisé, diffère un peu de son utilisation conventionnelle. En effet, le fait qu'à son extrémité une porte s'ouvre, permet un échange entre les milieux interne et externe du tube à choc et modifie donc l'écoulement interne. Ce chapitre détaille l'étude qui a permis de comprendre les influences d'une ouverture à l'extrémité d'un tube à choc conventionnel. Notamment, on y explique comment, une fois l'onde de choc incidente sortie du tube à choc, les interactions entre les ondes résiduelles dans le fluide en écoulement engendrent la formation de nouvelles ondes de choc qui se propagent à nouveau à l'intérieur du tube.

3.1 Porte entièrement ouverte : à 90°

3.1.1 Configuration de l'expérience

Pour cette étude, la maquette est configurée pour permettre la sortie d'une onde de choc d'un tube à choc conventionnel ouvert. On positionne la porte mobile de manière à ce qu'elle n'obstrue pas la veine d'essai, comme sur la figure 2.13. La porte en aluminium est installée sur la maquette et est bloquée en position ouverte à 90° avec de la bande auto-agrippante. On génère une onde choc avec un nombre de Mach de 1.1 et on étudie les phénomènes qui résultent de l'expulsion de cette onde par l'extrémité du tube à choc. D'une part on visualise l'écoulement en périphérie de la porte ouverte grâce au montage strioscopique à camera ultra rapide, et d'autre part on enregistre la pression évoluant le long de l'installation et aux abords de la porte. Les stations de mesures utilisées sont celles illustrées sur les figures 2.12 et 2.13 et définies dans le tableau 2.2.

3.1.2 Résultats et première analyse

Les figures 3.1 et 3.2 présentent une série de clichés réalisés grâce au montage strioscopique en Z couplé avec la caméra rapide. Ces clichés ont été réalisés à une cadence de 20000 images par seconde et avec un temps d'obturation de 10 μ s.

Sur ces séquences le temps indiqué correspond au temps écoulé depuis la rupture du diaphragme. Le nombre de Mach de l'onde de choc incidente a été mesuré à $M_{is}=1.1$ et le déplacement de cette dernière se fait de gauche à droite. A $t=8.7$ ms (image A) de la figure 3.1, on observe clairement l'onde de choc incidente générée par la rupture du diaphragme. Sa forme est parfaitement plane. De l'instant $t=8.8$ ms, (image B) où elle atteint l'extrémité ouverte de la maquette jusqu'à l'instant $t=9.1$ ms (image D), on peut observer son évolution lors de sa sortie du tube à choc dans le milieu ambiant. Durant cette période, l'onde de choc se transforme en une onde de souffle sphérique et sa vitesse décroît. Ce schéma de propagation en trois dimensions d'une onde de choc sortant d'un tube choc à section carrée ouvert a été traité par JIANG *et al.* [16]. Cette étude compare des résultats numériques et expérimentaux détaillant notamment la formation complexe des vortex de détente en périphérie de l'ouverture du tube. Dans notre étude la forme de la sortie de la maquette est différente de celle étudiée par JIANG *et al.* [16], la position ouverte de la porte prolonge la face supérieure de la veine d'essai. Ainsi on constate pendant la phase de sortie de l'onde de choc incidente une dissymétrie entre les parties inférieure et supérieure de la veine d'essai.

Dans la partie inférieure, à $t=8.8$ ms, l'onde de choc est exposée à un espace libre et commence à s'arrondir, tandis que dans la partie supérieure l'onde continue sa propagation le long d'une paroi plane (la porte ouverte). L'écoulement suivant le passage du choc est alors tridimensionnel et plus complexe

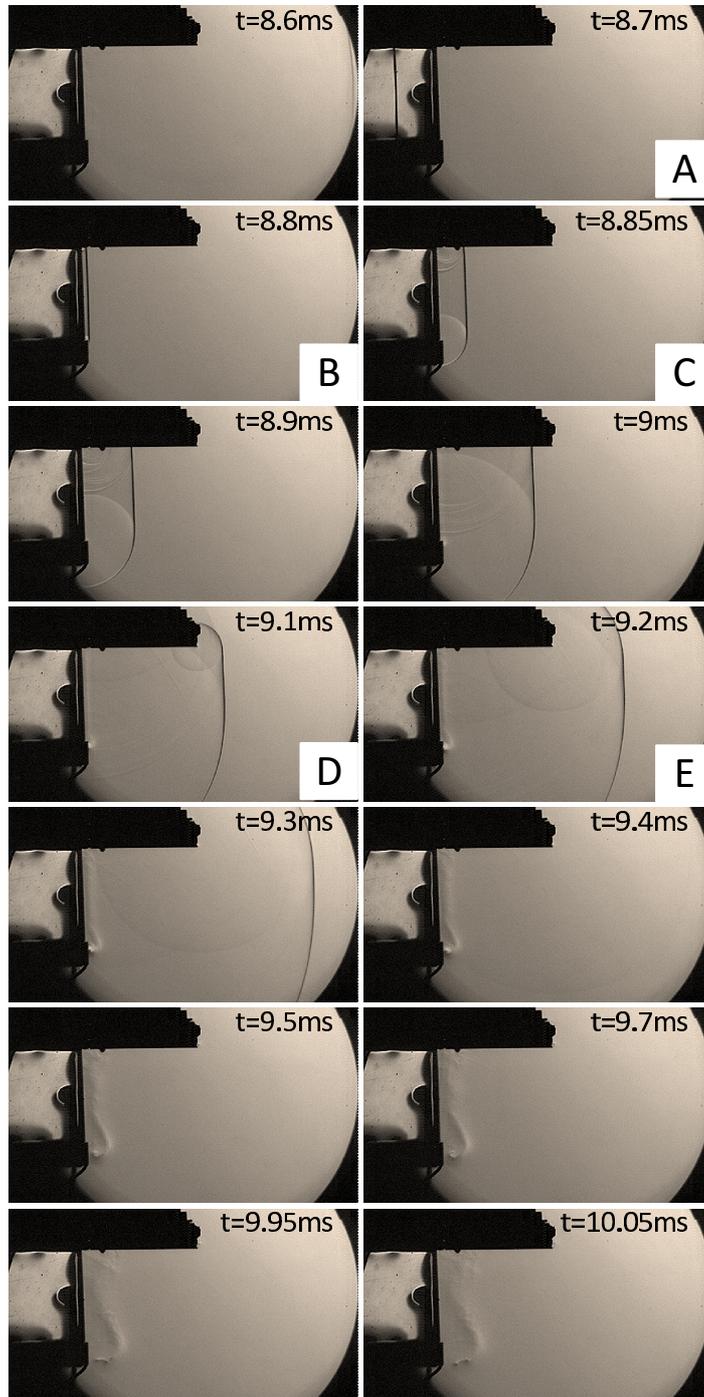


FIGURE 3.1 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, pour l'intervalle de 8,6 à 10,05 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 90° et l'onde de choc incidente se déplace vers la droite (T80#620).

L. Biamino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

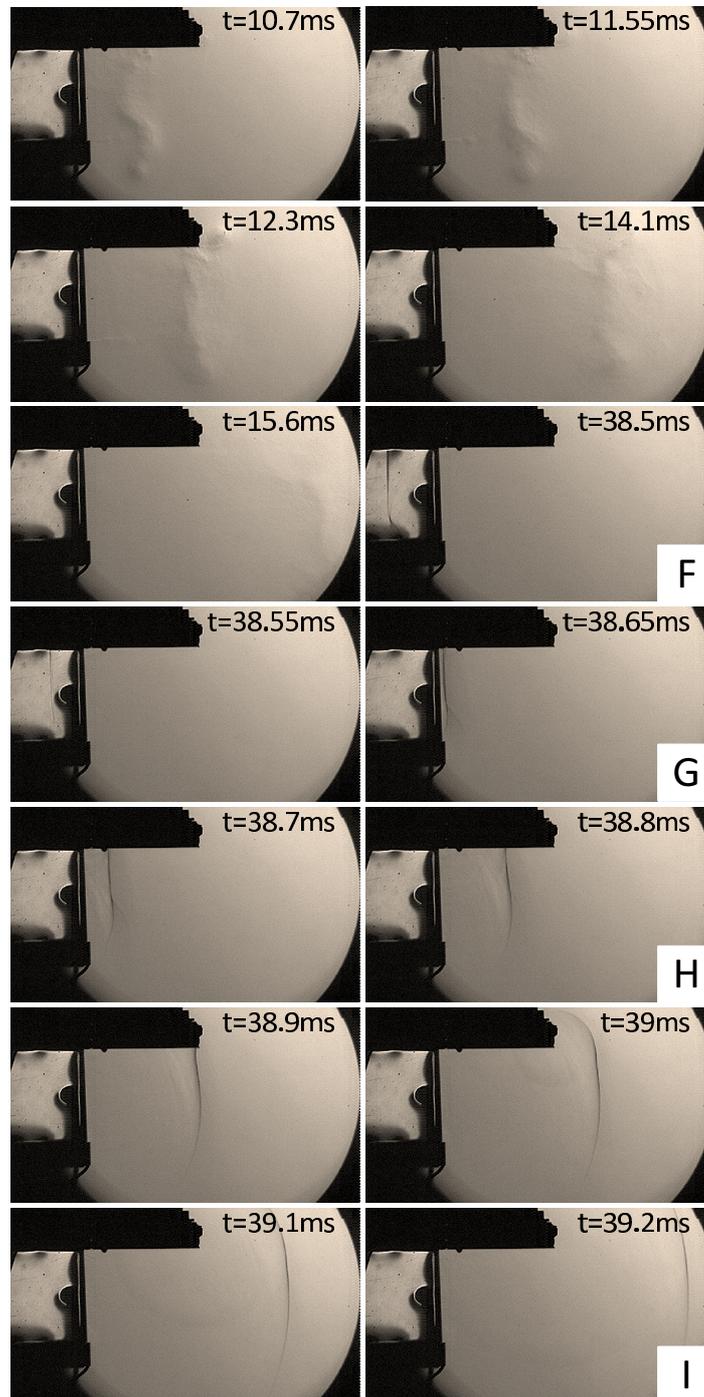


FIGURE 3.2 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, pour l'intervalle de 10,7 à 39,2 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 90° et l'onde de choc incidente se déplace vers la droite (T80#620).

L. Bianino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

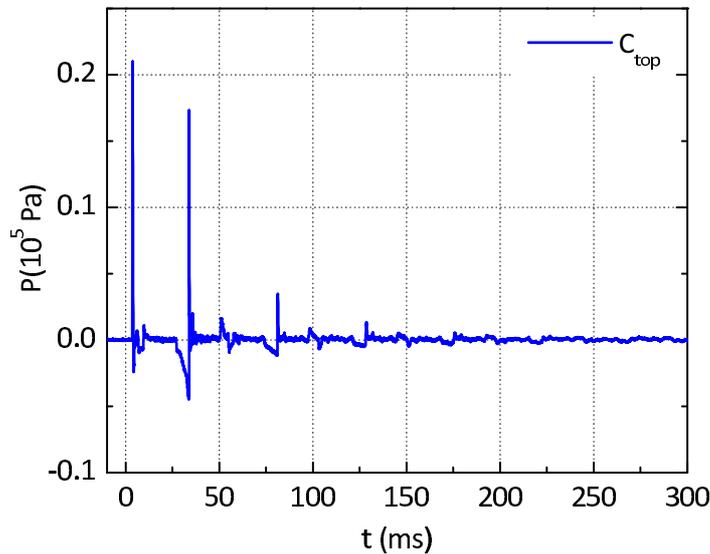


FIGURE 3.3 – Signal de pression enregistré sur la face supérieure en sortie du tube à choc (T80#620).

que celui présenté dans [16]. Une observation un peu plus approfondie de la partie inférieure permet d'identifier à $t=8.85$ ms (image C) l'expansion de l'écoulement en vortex lorsque l'onde de choc quitte l'extrémité du tube à choc. Un autre vortex est visible à $t=9.1$ ms (image D) dans la partie supérieure lorsque l'onde de choc dépasse l'extrémité de la porte ouverte. Rapidement, après ces instants, l'onde de choc s'atténue en onde de souffle sphérique qui, à son tour, se réduit très vite en onde de compression. Une fois l'onde de choc incidente sortie du tube, les ondes de détentes produites par la rupture du diaphragme et réfléchies sur le fond de la chambre haute pression atteignent à leur tour l'extrémité de la maquette et sont expulsées. A partir de l'instant $t \geq 9.2$ ms (image E) l'écoulement perturbé du fluide ayant subi les passages successifs de l'onde de choc incidente et des ondes de détente reste visible pendant plusieurs millisecondes.

Les ondes initiées par la rupture du diaphragme ayant été expulsées de notre système, il est intéressant d'observer à $t=38.5$ ms (image F), sur la figure 3.2, une nouvelle onde de choc. Sa forme n'est cependant pas totalement plane ; elle présente dans sa partie inférieure une forme en lambda. Sa progression la conduit elle aussi à sortir du tube à choc et son trajet est observable jusqu'à $t=39.2$ ms (image I). L'analyse des relevés de pression confirme la formation

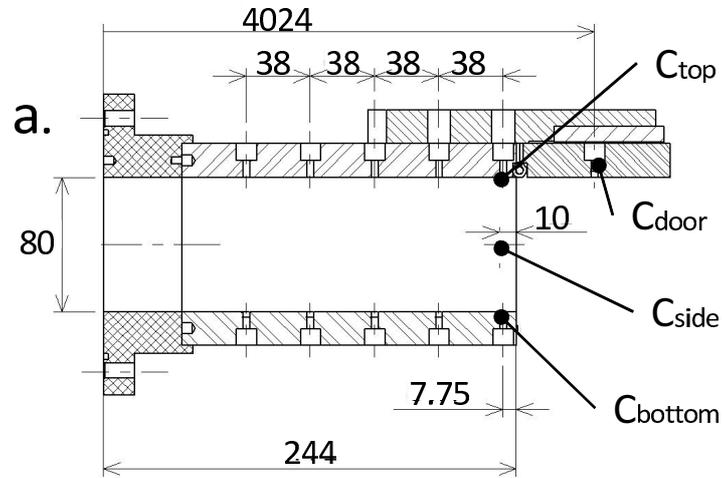


FIGURE 3.4 – Maquette modifiée avec les nouveaux emplacements de capteurs.

de cette deuxième onde de choc. En considérant l'évolution de la pression pendant un temps bien plus long, on observe plusieurs autres ondes de choc se propageant dans T80. Ces ondes sont notamment visibles sur le signal de pression enregistré au capteur C_{top} (face supérieur en sortie du tube) présenté sur la figure 3.3. On y observe au moins quatre ondes de choc distinctes durant la durée de l'enregistrement.

3.1.3 Optimisation du diagnostic et poursuite de l'analyse

Les huit stations de mesure de pression utilisées dans cette expérience permettent d'observer ces ondes, mais ne suffisent cependant pas à comprendre avec certitude comment elles se forment. Pour parfaire cette étude en construisant notamment le diagramme d'ondes $x-t$, il a été nécessaire d'augmenter le nombre d'informations de pression. La zone où l'évolution de la pression semble la plus complexe est située un peu en amont de la sortie de la maquette. Nous avons donc du modifier la maquette dans cette partie pour y ajouter de nouveaux capteurs. La figure 3.4 détaille les nouveaux emplacements usinés sur la maquette et le tableau 3.2 présente leur nouvelle désignation. En amont de la sortie sur les faces supérieure et inférieure nous avons ajouté huit emplacements. Ainsi, au total, 27 emplacements de capteurs sont disponibles sur la maquette et sur T80, 18 sont placés sur la face supérieure du tube à choc, 7 sur la face inférieure, 1 sur la face latérale et 1 dernier au centre de la porte (tableau 3.1 et tableau 3.2). Ne disposant que de huit voies d'acquisition de pression, nous avons utilisé les excellentes propriétés de répétabilité de T80 en réalisant la même expérience à plusieurs reprises.

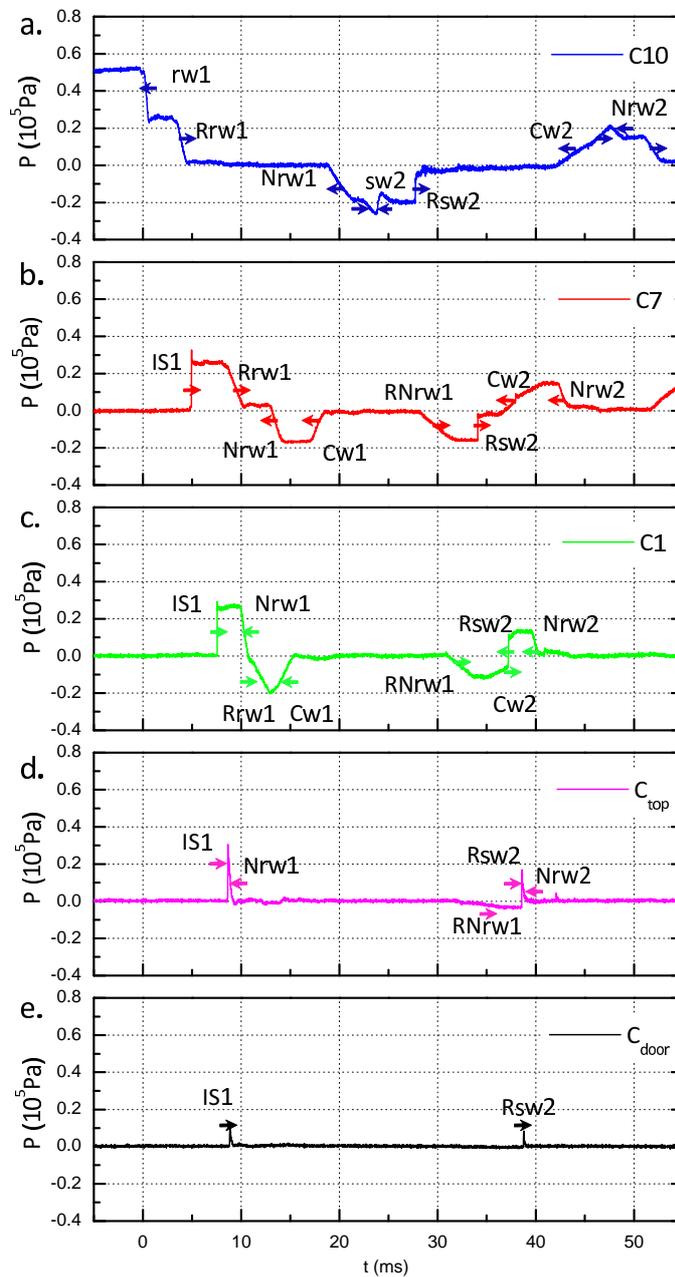


FIGURE 3.5 – Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 90° . Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles vont vers la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#620).

L. Biamino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

Pour chaque expérience, nous avons conservé la position de deux capteurs afin de s'assurer que tous les tirs soient similaires et nous avons modifié la position des six autres pour couvrir l'intégralité des emplacements disponibles. Un exemple de ces signaux de pression enregistrés à 5 emplacements est présenté sur la figure 3.5.

	Haute pression					diaphragme	Basse pression									
positions (mm)	0	115	265	415	615	750	900	1770	2630	2970	3080	3190	3410	3520	3630	
capteurs sur la face supérieure	C13	C12	C11	C10			C9	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
capteurs sur la face inférieure										C6'		C4'				
capteurs sur la face latérale																

TABLE 3.1 – Positions des capteurs implantés le long du tube à choc T80.

	maquette					
positions (mm)	3872	3910	3948	3986	4024	4075
capteurs sur la face supérieure	Cd1	Cd2	Cd3	Cd4	C_{top}	C_{door}
capteurs sur la face inférieure	Cd1'	Cd2'	Cd3'	Cd4'	C_{bottom}	
capteurs sur la face latérale					C_{side}	

TABLE 3.2 – Positions des capteurs implantés sur la maquette adaptée au bout du tube à choc T80 (le schéma correspondant est présenté sur la figure 3.4).

Les quatre premiers sont placés sur la face supérieure : ce sont C10, C7, C1 et C_{top} , le dernier et celui positionné au centre de la porte, C_{door} . Sur les signaux présentés apparaissent des flèches ; elles indiquent le sens de propagation des ondes identifiées. Lorsqu'elles pointent la droite, les flèches désignent des ondes qui se propagent de la chambre haute pression vers la chambre basse pression et inversement. A partir des 18 signaux de pression enregistrés sur la face supérieure, nous avons pu construire le diagramme d'onde x-t sur une période de 55 ms débutant à la rupture du diaphragme. Ce diagramme présenté sur la figure 3.6, détaille les principales ondes se propageant dans l'écoulement interne du tube à choc et au niveau de la maquette.

A la rupture du diaphragme, un faisceau d'ondes de détente (rw1) se propage dans la chambre haute pression et simultanément une onde de choc incidente (IS1) ($M_{is}=1.1$) se forme dans la chambre basse pression. Comme on peut le voir sur la figure 3.6, une fois que les ondes de détente ont atteint l'extrémité de la chambre haute pression, elles se réfléchissent et remontent la chambre basse pression (Rrw1). Lorsque l'onde de choc incidente atteint la sortie ouverte de la maquette et est expulsée dans l'air ambiant, elle se modifie en une onde souffle courbée et au même instant des ondes (Nrw1) de détente pénètrent dans la maquette. Sur la figure 3.5, on retrouve cette onde de souffle, dans l'évolution de la pression au niveau du capteur de la

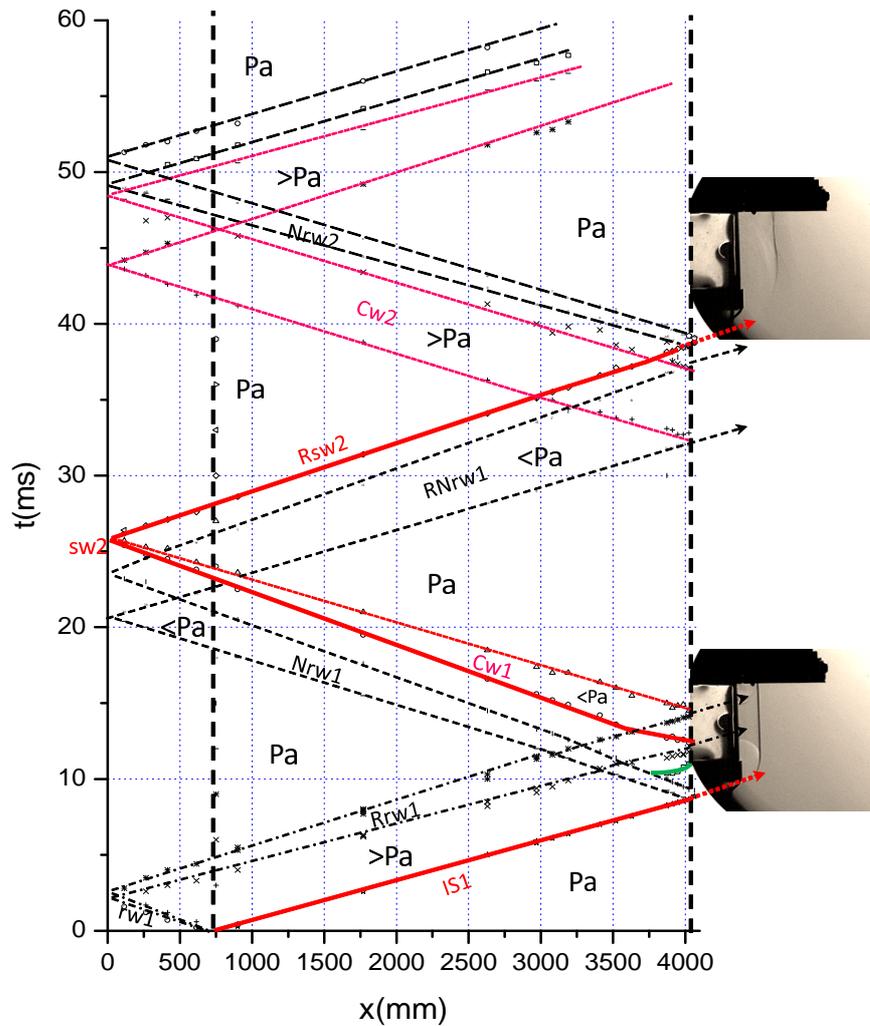


FIGURE 3.6 – Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 90° (T80#620).

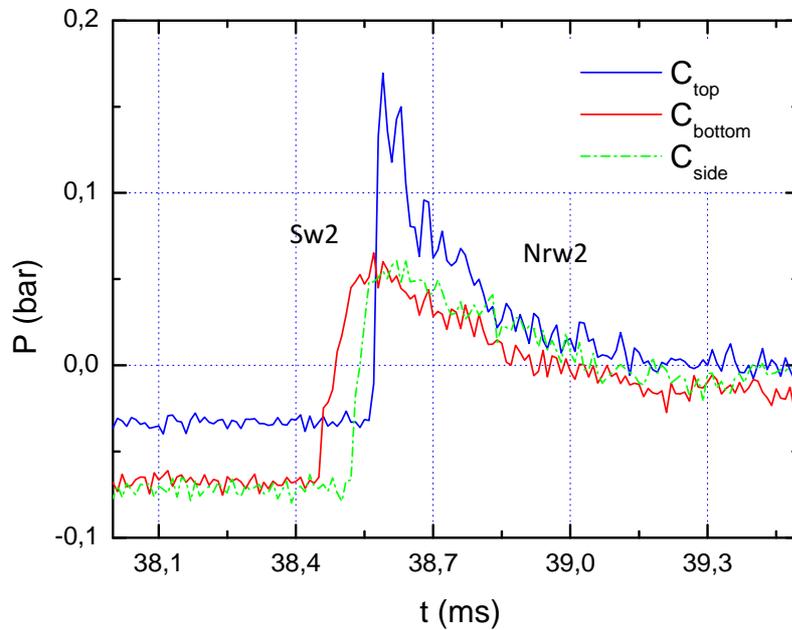


FIGURE 3.7 – Comparaison de l'évolution de la pression pariétale dans la veine d'essai (parois supérieure, latérale et inférieure) juste avant que la seconde onde de choc sw2 ne soit expulsée de la maquette avec la porte maintenue ouverte à 90° (T80#620).

porte C_{door} et de la face supérieure C_{top} . Clairement sur ces deux signaux, le brusque saut de pression est suivi d'une rapide baisse de la pression (détente). Dans cette zone, la proximité de l'ouverture avec le milieu ambiant impose un rééquilibrage permanent de la pression à la pression atmosphérique. C'est ce qui impose à la suite de cette dernière détente, un réseau d'ondes de compression délimité en vert sur la figure 3.6.

La pression à l'extrémité tube est alors revenue au niveau de la pression atmosphérique. Lorsque les détentes réfléchies R_{rw1} y parviennent, la pression chute sous le niveau de la pression atmosphérique. Une onde de compression (CW1) est alors immédiatement générée pour compenser cette détente et maintenir la pression à 10^5 Pa. Il apparaît sur le diagramme d'ondes x-t que ce faisceau de compression va coalescer en une onde de choc (sw2) juste avant de rencontrer le fond de la chambre haute pression. L'onde de choc (sw2) va se réfléchir sur ce dernier aux alentours de $t=26$ ms. L'onde de choc ainsi

réfléchi (Rsw2) va à son tour parcourir le tube à choc et sortir à $t=38.6$ ms. C'est cette onde de choc que l'on identifie clairement à $t=38.8$ ms (image H) sur la figure 3.2. Le saut de pression dû au passage de cette onde de choc Rsw2 est aussi facilement repérable sur les cinq signaux de pression de la figure 3.5. Pendant la même période, les ondes de détentes précédemment décrites (Nrwl) se sont aussi réfléchies sur le fond de la chambre haute pression (RNrw1) à $t=21$ ms sur la figure 3.6. Elles atteignent la sortie du tube à choc quelques millisecondes avant le choc Rsw2. A leur sortie et toujours pour des raisons de rééquilibrage de pression, de nouvelles ondes de compression (Cw2) pénètrent dans l'installation (voir le signal de pression de C1 sur la figure 3.5c et le diagramme x-t de la figure 3.6). A nouveau, quand l'onde de choc réfléchi (Rsw2) est expulsée du tube à choc, des détentes (Nrwl) sont introduites dans l'installation. Ce processus alternatif de compression et de détente se poursuit ainsi pendant plusieurs dizaines de millisecondes jusqu'à ce que les ondes de compression soient suffisamment faibles. Cette décroissance dans ce processus est clairement visible sur le signal de pression du capteur C_{top} de la figure 3.3 lorsqu'on l'étudie sur un temps plus long (environ 300 ms).

Après s'être attardé sur le processus général de propagation des ondes dans le tube, une attention doit être portée aussi aux dissymétries qui apparaissent dans l'écoulement. Les formes de la maquette présentées sur la figure 2.8 montrent une différence de géométrie entre ses parties supérieure et inférieure. Il en résulte une différence de comportement de l'écoulement entre ces deux parties. Lorsqu'une onde de choc émerge du tube à choc et se propage le long de la porte ouverte, son comportement est conforme à celui d'une onde choc normale : elle reste bien plane dans cette partie. Dans la partie inférieure et dans les parties latérales de la veine d'essai, lorsqu'une onde de choc émerge, elle se propage dans l'air ambiant et se courbe. Cette partie de l'onde de choc se diffracte via une expansion en vortex le long des faces inférieure et latérale de la maquette et visible sur la figure 3.1 (image C) à $t=8.85$ ms. La première onde de choc incidente, IS1, est plus intense que la suivante Rsw2 et est parfaitement plane juste avant sa sortie du tube à choc (image A à $t=8.7$ ms sur la figure 3.1). Ce n'est pas le cas de Rsw2 visible à $t=38.5$ ms (image F) ; cette nouvelle onde de choc présente une forme en lambda dans sa partie basse. Quand ce choc quitte le tube (image G), sa partie basse est réduite à une faible onde de compression, il en résulte que l'expansion par vortex ne génère pas un gradient de densité suffisamment intense pour être visualisé.

La figure 3.7 permet de comprendre la différence entre chaque partie de cette onde de choc. Ici la prise de mesure est faite sur un seul et même plan positionné à dix millimètres de la sortie du tube ; on y retrouve les signaux de pression enregistrés sur les faces supérieure C_{top} , latérale C_{side} et inférieure C_{bottom} . Sur le capteur C_{top} , on distingue clairement la signature d'un choc bien formé ; par contre sur les deux autres capteurs, C_{side} et C_{bottom} ,

l'évolution du signal suggère plutôt le passage d'une onde de compression. Comme nous l'avons détaillé un peu plus tôt, la sortie de l'onde choc R_{sw2} est précédée par la sortie du faisceau d'ondes réfléchies R_{Nr1} (figure 3.6). Lorsque R_{Nr1} atteint la sortie, le schéma de compensation de la pression se met en place, le fluide qui provient de l'air ambiant pénètre dans le tube à choc (C_{w2}). La porte en position ouverte fait obstacle à cet écoulement réintroduit, il en résulte dans la veine d'essai une différence de comportement du gaz entre les zones laissées libres (faces latérales et inférieure) et la zone qui est obstruée (face supérieure). Le long des parois latérales et sur la paroi inférieure, un écoulement contraire au sens de l'évolution de l'onde de choc s'établit, alors que le long de la paroi supérieure cet écoulement est plus faible, voir quasi nul. Ainsi dans la partie basse de la veine d'essai, le gaz initialement au repos à l'extérieur du tube est mis en mouvement ; ses autres paramètres, notamment sa densité, vont diminuer. La densité du milieu étant plus faible, la célérité du son y est plus élevée, les ondes s'y propagent plus vite que dans le milieu au repos. De plus, dans un milieu raréfié, les ondes de compression mettent plus de temps à coalescer en onde de choc. Ceci explique que sur les signaux de pression de la figure 3.7, le niveau de pression du milieu dans lequel est positionné chaque capteur n'est pas le même. La pression est la plus faible en C_{bottom} et la plus élevée en C_{top} . Toujours sur la même figure on constate que les premières ondes observées sont les ondes de compression sur le capteur C_{bottom} . Il est aussi intéressant d'observer que c'est sur ce signal que l'élévation de pression est la moins brusque. Sur le signal de C_{side} , les ondes de compression sont visibles un peu plus tard (dans cette zone la célérité du son est un peu plus basse : milieu plus dense). Et enfin c'est au niveau du capteur C_{top} que l'on observe en dernier le passage de la surpression qui ici se présente quasiment sous la forme d'un choc. C'est dans cette zone que le gaz a une densité plus élevée. Les mêmes conclusions peuvent être issues de l'observation de l'image G de la figure 3.2. Sur cette photo, le λ au pied de l'onde $sw2$ est en avance sur sa partie supérieure où le choc est déjà formé : d'une part le choc ne s'est pas encore formé dans la partie inférieure d'autre part les ondes de compression (le λ) se sont déplacées plus vite que l'onde de choc.

La différence de comportement entre les parties haute et basse de l'onde de choc est due à un gradient de densité transversal du fluide dans la veine d'essai.

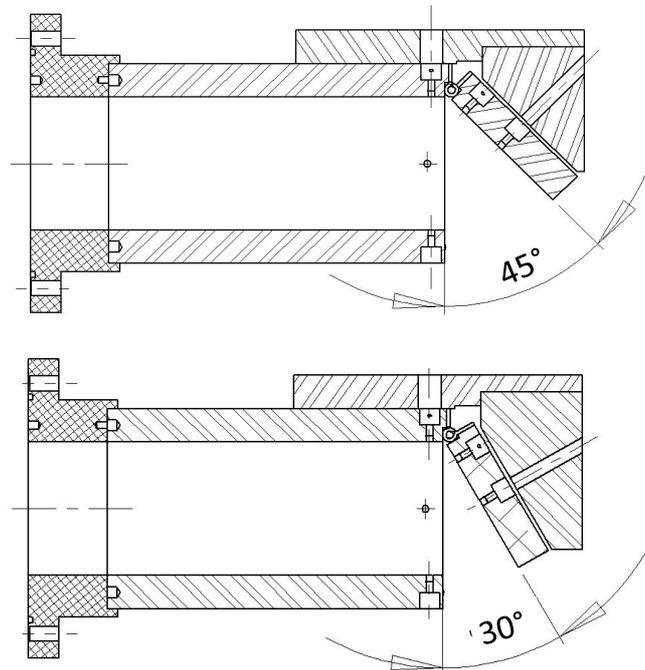


FIGURE 3.8 – Schéma détaillant les modifications apportées à la maquette pour positionner respectivement la porte à 45° et à 30° .

3.2 Étude paramétrique de l'évolution de l'écoulement en fonction de l'ouverture partielle de la porte

Le paragraphe précédent a détaillé les phénomènes qui régissent les écoulements dans le tube à choc T80 avec la porte entièrement ouverte (90°). Ces écoulements sont très différents de ceux observés dans un tube à choc classique fermé, l'influence de l'ouverture à l'extrémité de la maquette étant prépondérante. Dans l'étude qui va suivre, celle de la phase d'ouverture de la porte, le tube à choc va passer d'une configuration fermée à une configuration ouverte ou partiellement ouverte. Il semblait donc fondamental d'étudier les écoulements évoluant dans le tube à choc lorsque la porte n'était pas entièrement ouverte. Nous avons choisi deux positions singulières afin de prolonger notre investigation. La première configuration correspond à une ouverture intermédiaire à 45° . La seconde position choisie correspond à une ouverture de 30° , ce choix présente une configuration où l'ouverture est faible. La figure 3.8 détaille les modifications apportées sur la maquette expérimentale. Des cales maintiennent la porte bloquée dans les configurations choisies.

Comme précédemment nous générons une onde de choc incidente avec un nombre de mach de $M_{i_s}=1.1$. Les systèmes de diagnostic de visualisation et de prise de pression sont ceux utilisés au préalable.

3.2.1 Porte entrouverte à 45°

Les figures 3.9 et 3.10 présentent la série de clichés strioscopiques enregistrés par camera ultra-rapide. A $t=8.65$ ms (image J), on distingue l'onde de choc incidente juste avant qu'elle ne sorte du tube à choc. Jusqu'à ce qu'elle sorte du tube, cette onde est parfaitement plane. A sa sortie, elle présente trois parties distinctes. Dans sa partie inférieure le choc se courbe, il se diffracte via un vortex le long de la face inférieure du tube à choc. La partie centrale de cette onde reste plane alors que sa partie supérieure se réfléchit de manière régulière sur la porte entrouverte (images K et L). Ce choc réfléchi a la particularité de se propager de haut en bas, perpendiculairement à l'axe du tube. Une partie de ce choc retourne dans le tube et une autre est expulsée vers l'extérieur. Cette dernière diffracte à $t=9$ ms (image M) sur l'extrémité de la porte. La partie de l'onde choc retournée à l'intérieur du tube va se réfléchir à plusieurs reprises entre les faces inférieure et supérieure ; ces multiples réflexions sont visibles de $t=9.1$ à 9.2 ms (images N et O) sur la figure 3.9. Ce processus de réflexion va perdurer jusqu'à ce que l'onde de choc s'atténue en une onde de compression. A la suite du passage de cette onde, on distingue de $t=9.2$ à 10.15 ms la propagation de la surface de contact à l'extérieur du tube et l'écoulement perturbé qui en résulte.

A $t=38.6$ ms sur l'image P de la figure 3.10, une seconde onde choc est visible à la sortie du tube. Comme lors du cas précédent, le pied de cette onde présente une forme en lambda dans sa portion proche de la face inférieure. Comme ce choc est nettement plus faible que le choc incident, sa réflexion sur la porte inclinée est moins prononcée, et est visible sur les clichés à $t=38.8$ (image Q), $t=38.9$ (image R) et 39 ms (image S). Une fois que le choc est sorti de la maquette, il se réduit à une faible onde de compression qui n'est plus visible sur la séquence de cliché de la figure 3.10.

La figure 3.11 où sont représentés les signaux de pression enregistrés lors de la même expérience aux positions C10, C7, C1, C_{top} et C_{door} confirme cette analyse. A partir de ces signaux, les principales ondes qui ont été identifiées sont représentées dans le diagramme d'onde x-t, figure 3.12. Conformément à nos attentes, dans les premières millisecondes de l'expérience, les signaux enregistrés par C10, C7 et C1 sont identiques à ceux de la figure 3.5.

Dans ce cas aussi, on distingue la formation du faisceau de détente (rw1) et de l'onde de choc incidente (IS1) initiés par la rupture du diaphragme. Après leur réflexion sur le fond de la chambre haute pression, les ondes de détente sont identifiées par (Rrw1). De son côté, l'onde de choc incidente (IS1) est

expulsée de la maquette et au même instant, un faisceau de détente (Nr_{w1}) pénètre dans le tube. Une fois que les détentes Rr_{w1} sortent à leur tour, des ondes de compression (Cw₁) sont transmises à l'intérieur du tube à choc et rééquilibrent la pression interne au niveau de la pression atmosphérique, (figures 3.11c et 3.12). Cette compression va traverser le tube à choc, se réfléchir sur le fond de la chambre haute pression et, lors de son retour vers la sortie, coalescer en une nouvelle onde de choc Sw₂. En comparant les figures 3.6 et 3.12, on s'aperçoit que contrairement au cas initial avec la porte ouverte à 90°, le second choc (sw₂) se forme après la réflexion sur le fond du tube. Ce retard est dû à la différence de taille de l'espace laissé entre la porte et l'extrémité du tube à choc. Avec la porte ouverte à 45°, cet espace est beaucoup plus faible et réduit le passage des flux gazeux introduits dans le tube. Ainsi, les ondes transmises dans la veine d'essai sont affaiblies. Ceci est aussi visible si on compare le saut de pression engendré lors du passage de la seconde onde de choc au niveau du capteur C1, de sw₂ dans le cas de la porte positionnée à 45°, (figure 3.11c) et de Rsw₂ pour le cas à 90° (figure 3.5c).

Dans cette deuxième expérience, les ondes qui se propagent dans le tube et qui sont dues au rééquilibrage de la pression ambiante sont affaiblies. Cependant, à cause de la géométrie de la sortie, lorsqu'une onde de choc est expulsée du tube, des réflexions remontent l'écoulement amont à l'intérieur du tube. Ainsi la pression enregistrée lors du passage de l'onde de choc incidente (IS1) au niveau du centre de la porte (C_{door}) à 45° (figure 3.11e) est nettement supérieure à celle correspondant au cas de la porte à 90° (figure 3.5e). Cette élévation de pression traduit le point de réflexion du choc incident IS1 sur la porte. Ceci est clairement visible sur la figure 3.13 où sont présentés les signaux des trois capteurs positionnés légèrement en amont de la sortie de la maquette (C_{top}, C_{side} et C_{bottom}) et celui au centre de la porte (C_{door}). Le saut de pression le plus important est celui enregistré sur la porte : il atteint 0.58 bar. Cette valeur est similaire au niveau de pression théorique que l'on obtient derrière la réflexion plane d'une onde de choc incidente (Mach 1.1), 0.54 bar. Sur cette figure 3.13, on distingue aussi cette onde réfléchie sur les autres capteurs.

On peut la suivre après le passage de l'onde incidente IS1, d'abord en haut de la veine d'essai C_{top}, puis sur le côté C_{side} et enfin sur le bas C_{bottom}. Cette réflexion, comme expliquée précédemment, se propage verticalement et va se réfléchir entre les faces supérieure et inférieure pendant plusieurs millisecondes. Il en résulte une surpression (OP1) à la sortie du tube à choc qui est visible sur les quatre capteurs de la figure 3.13. La proximité de l'ouverture et par conséquent la pression atmosphérique du milieu ambiant vont finir par affaiblir suffisamment cette onde de choc réfléchie. Le niveau de pression dans le tube va redescendre à la pression atmosphérique, (figures 3.11d et 3.11e). Notons toutefois que cette surpression n'existait pas dans l'expérience avec la porte ouverte à 90°, (figures 3.5d et 3.5e).

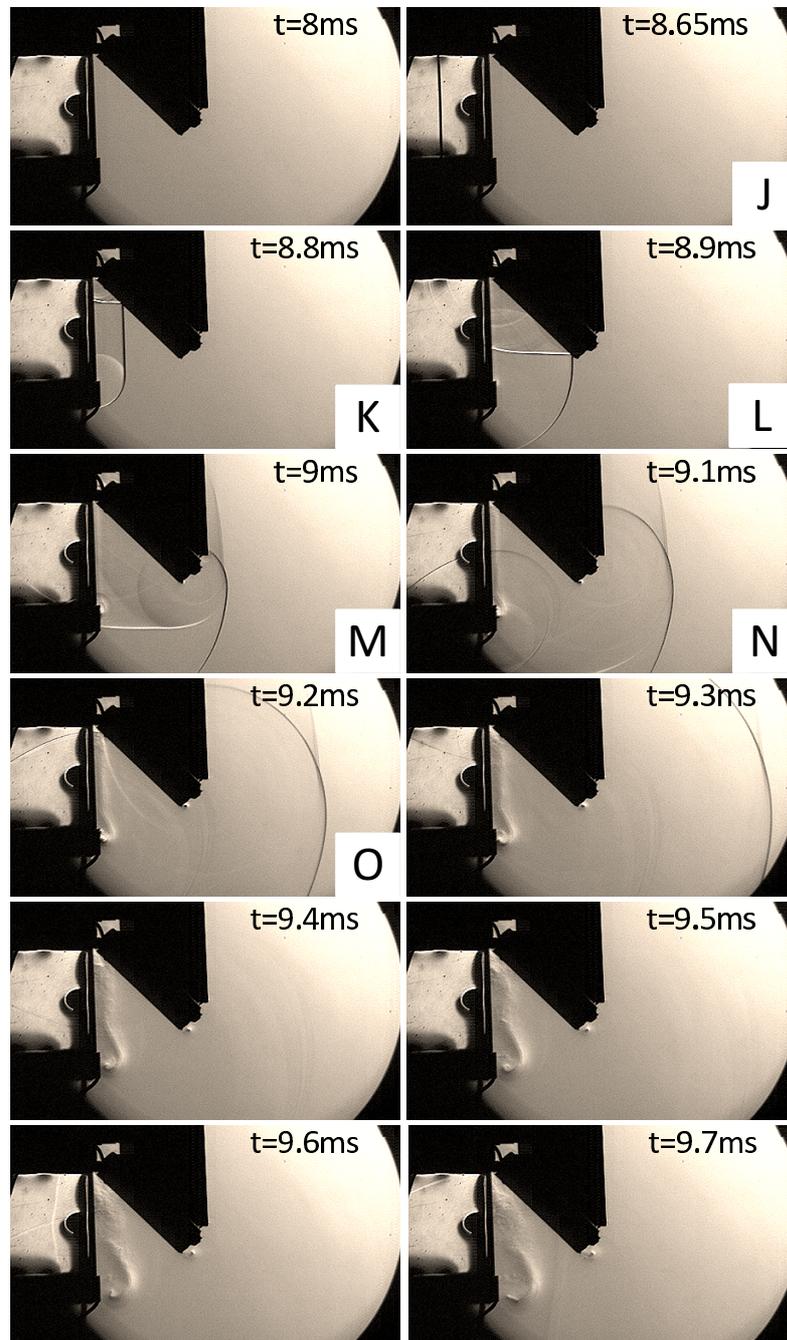


FIGURE 3.9 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, durant l'intervalle de 8 à 9,7 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 45° et l'onde incidente se propage vers la droite (T80#624).

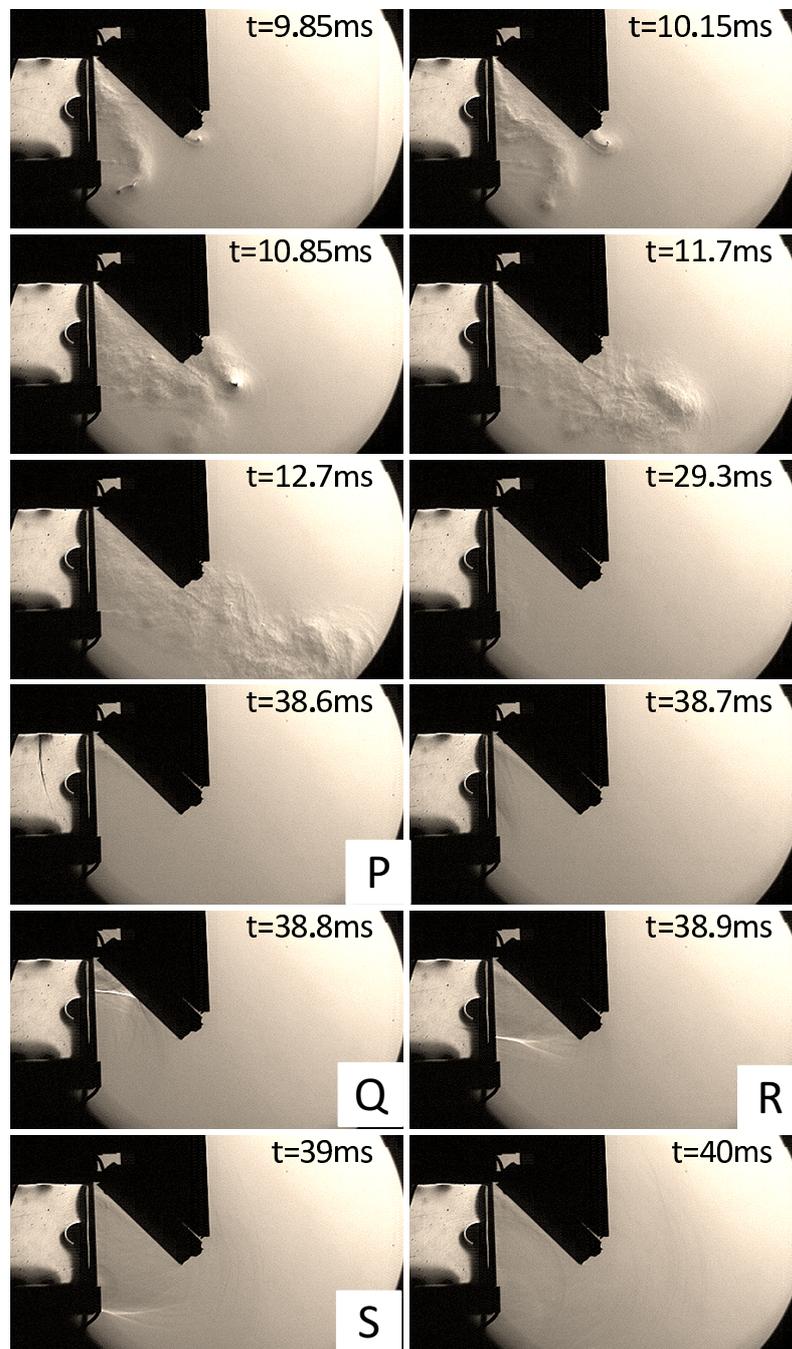


FIGURE 3.10 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale, durant l'intervalle de 9,85 à 40 ms. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 45° et l'onde incidente se propage vers la droite (T80#624).

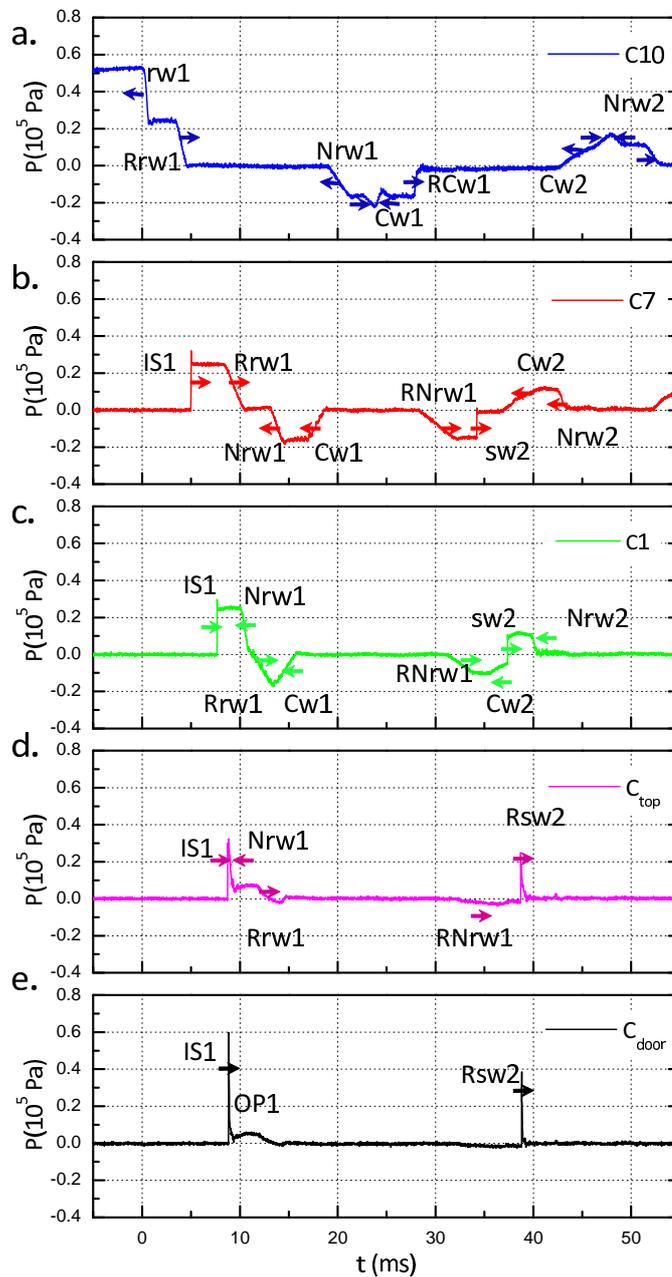


FIGURE 3.11 – Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 45° . Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles vont vers la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#624).

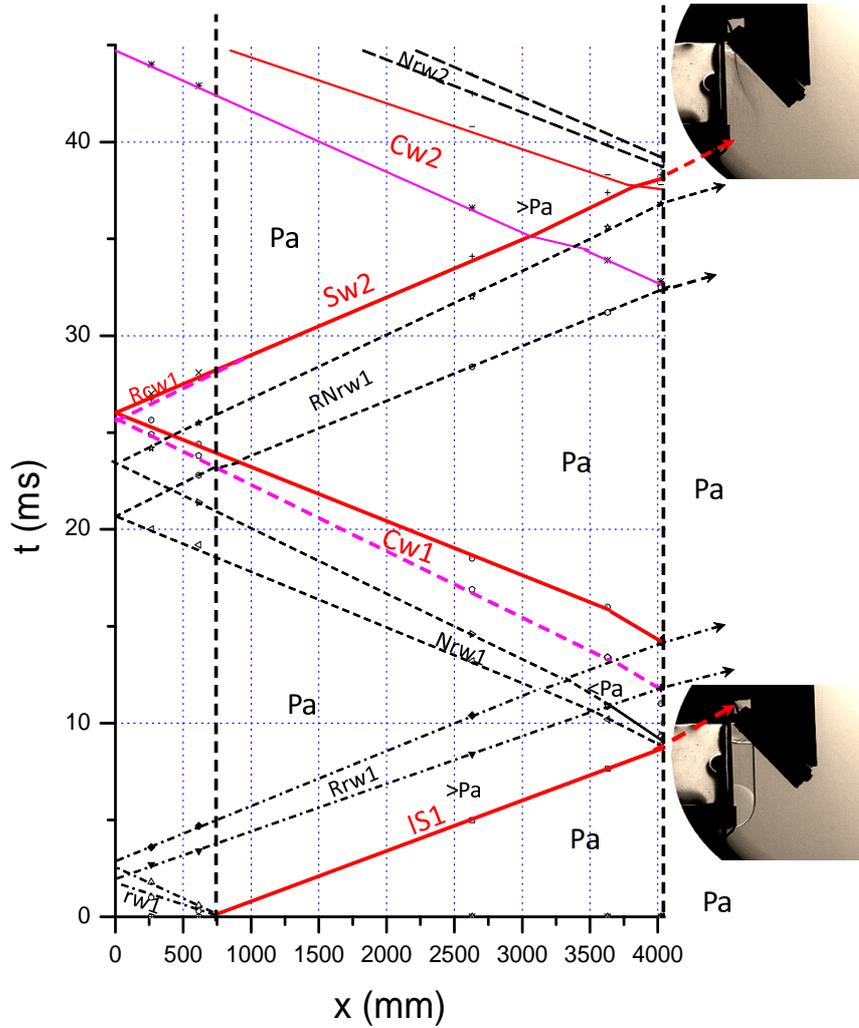


FIGURE 3.12 – Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 45° (T80#624).

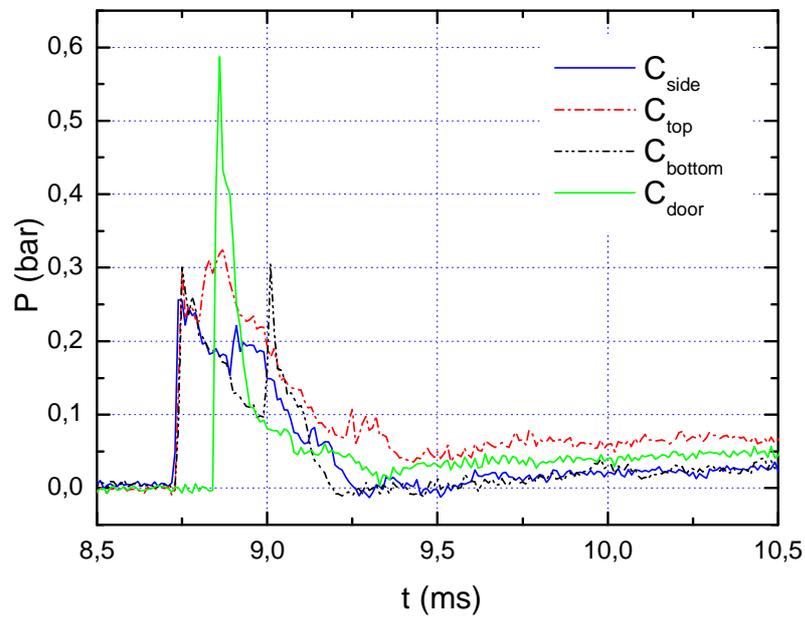


FIGURE 3.13 – Comparaison de l'évolution de la pression pariétale aux abords de la sortie de la maquette (parois supérieure, latérale et inférieure et au centre de la porte) lors de la sortie de l'onde de choc incidente IS1 avec la porte ouverte à 45° (T80#624).

3.2.2 Porte entrouverte à 30°

Nous avons continué ce travail en examinant l'effet d'une réduction supplémentaire de l'ouverture de la porte sur l'évolution de l'écoulement interne du tube à choc. Pour cela, la porte a été positionnée avec une ouverture de 30° comme sur la figure 3.8b et nous avons à nouveau généré une onde de choc incidente avec un nombre de Mach de 1.1. La propagation des ondes qui sortent par l'ouverture de la maquette est visible sur les figures 3.14 et 3.15.

Comme dans les cas précédents à $t=8.65$ ms (image T) sur la figure 3.14, on distingue l'onde de choc incidente qui se présente à la sortie de la maquette. Pendant la période de $t=8.75$ à 9.05 ms, on observe les multiples ondes de choc réfléchies sur la porte et leur diffraction sur les extrémités des parois de la maquette. Une partie de la réflexion du choc incident retourne dans le tube à choc et se propage entre le haut et le bas de la veine d'essai. Toujours sur la même série de clichés, entre $t=9.15$ et 9.9 ms, la surface de contact est expulsée de la maquette et se répand dans l'atmosphère, de $t=10$ à 14 ms, au travers d'un écoulement nettement turbulent. Conformément aux deux expériences précédentes, à $t=38.4$ ms (image U) sur la figure 3.15, une seconde onde de choc est visible juste avant qu'elle sorte par l'ouverture. La réflexion de ce choc sur la porte inclinée reste visible pendant encore 2 ms, jusqu'à $t=38.6$ ms. L'évolution de la pression enregistrée par les capteurs C_{door} , C_{top} , C1, C7 et C10 est détaillée sur la figure 3.16.

Les trois premiers signaux, C10, C7 et C1 sont quasiment identiques à ceux de l'expérience précédente avec la porte à 45°, figure 3.11. Par contre en comparant les deux figures, de très nettes différences sont visibles sur les signaux enregistrés à proximité de l'ouverture pour C_{door} et C_{top} . Conformément à l'explication du cas précédent, la réduction de la taille de la sortie engendre une surpression OP1 nettement plus élevée (Figure 3.16e).

De même, les ondes de détente RNrw1 sont plus intenses et la seconde onde de choc sw2 est plus faible. Sur la figure 3.17, qui présente le diagramme d'onde x-t de cette expérience, la coalescence du faisceau de compression RCw1 en onde de choc sw2 se fait beaucoup plus tard que dans les autres cas. Sa formation est réellement accomplie juste avant la sortie du tube à choc, ce qui justifie aussi sa relative faiblesse.

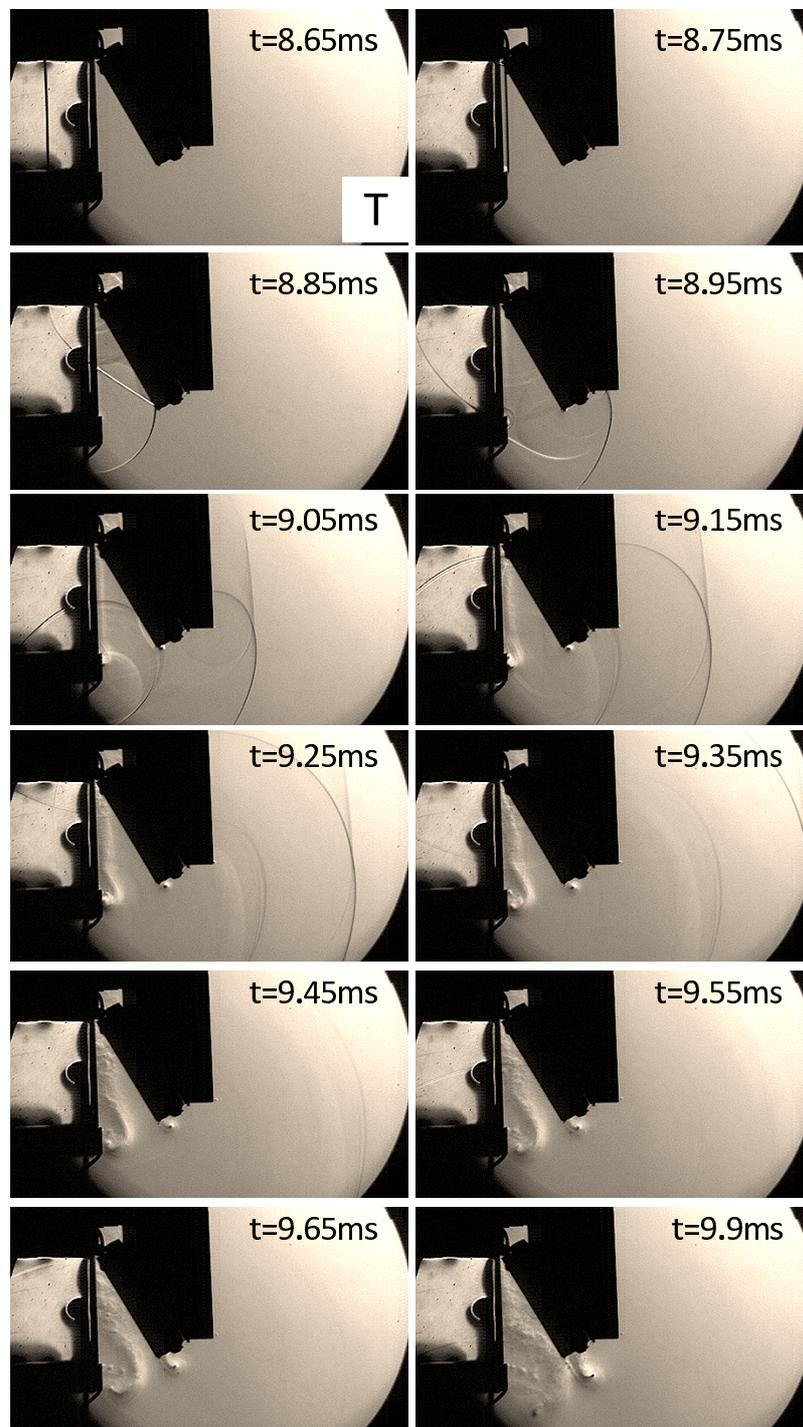


FIGURE 3.14 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 30° (T80#623).

L. Biamino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

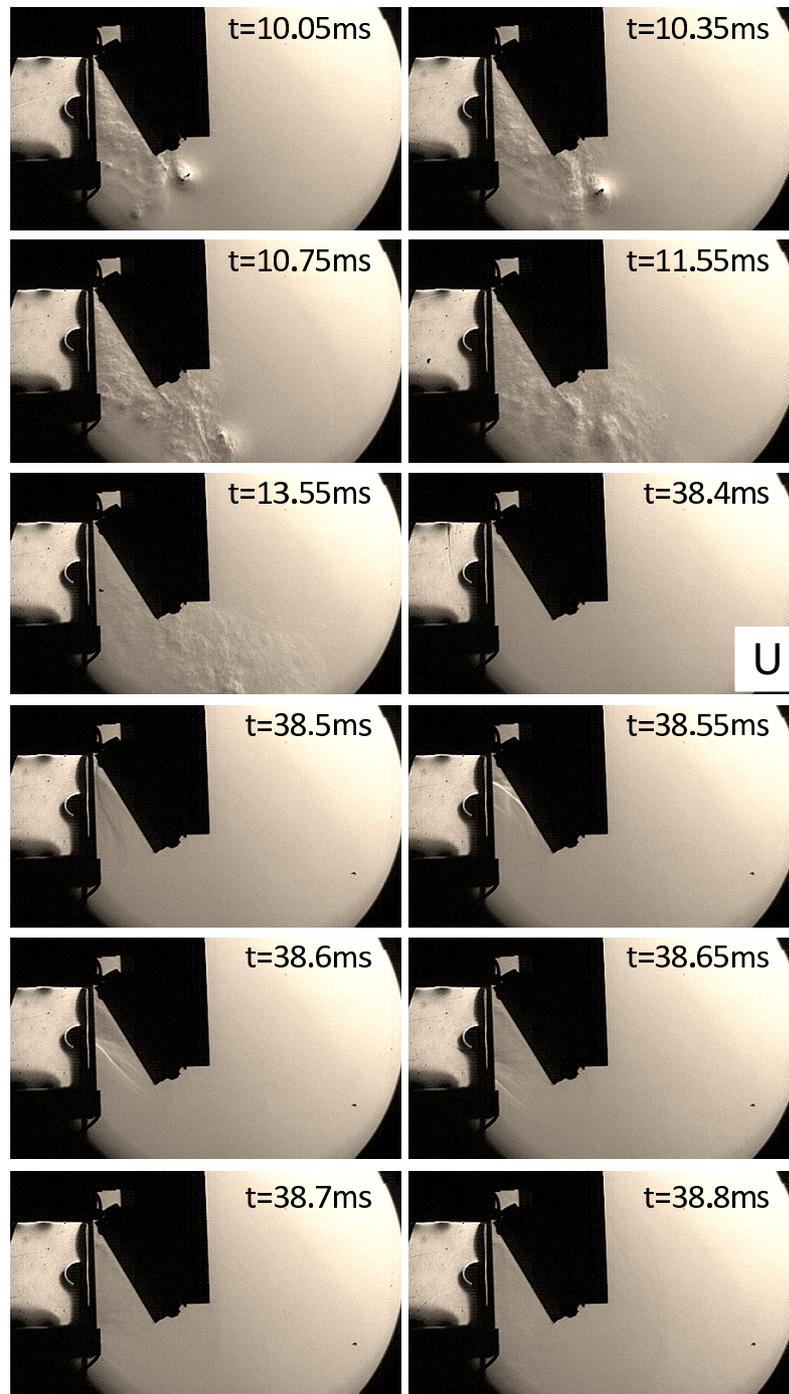


FIGURE 3.15 – Séquence de clichés strioscopiques montrant la propagation d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$) au travers de l'extrémité ouverte de la maquette expérimentale. La porte est maintenue ouverte et bloquée à 30° (T80#623).

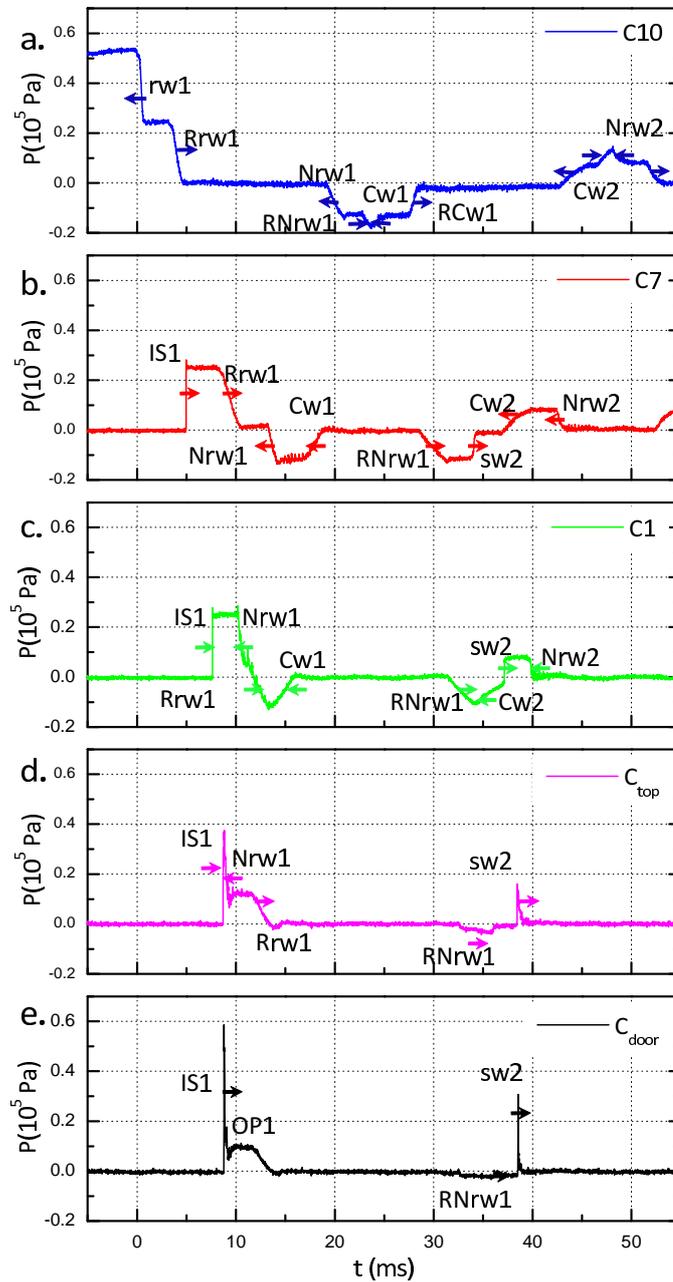


FIGURE 3.16 – Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 30°. Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles vont vers la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#623).

L. Biamino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

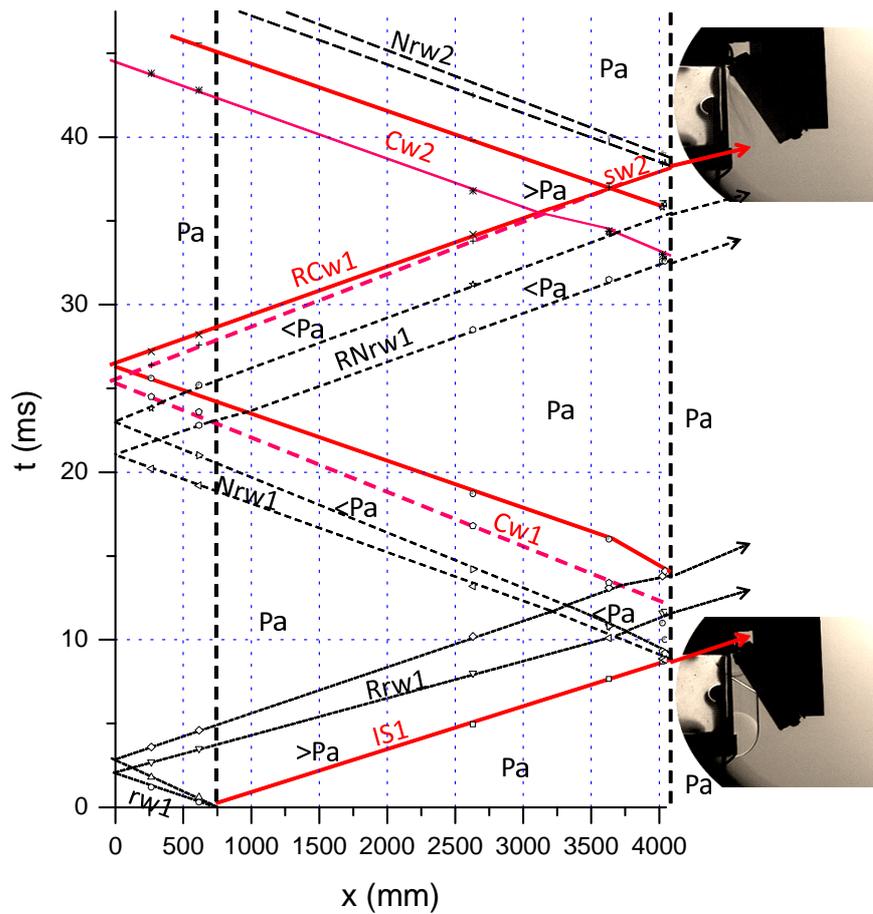


FIGURE 3.17 – Diagramme d'onde x-t reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l'expérience avec la porte ouverte à 30° (T80#623).

3.3 Analyse et discussion

Pour achever cette étude, il est indispensable de s'attarder plus amplement sur les différences significatives entre les trois configurations. Une attention particulière doit être apportée à l'intensité de l'onde de choc sw_2 générée dans l'écoulement, à l'impulsion principale détectée lors de la sortie et de l'éventuelle réflexion de l'onde de choc incidente (IS1 ou RIS1) et enfin au niveau de surpression (OP1) atteint qui est maintenu à la sortie du tube à choc après l'expulsion de l'onde de choc incidente.

La figure 3.18 représente les signaux des capteurs C1 et C_{side} pendant l'intervalle de temps $32 \leq t \leq 42$ ms, enregistrés lors des trois expériences (30° , 45° , et 90°). Sur la figure 3.18a, on identifie clairement le saut de pression induit par l'onde de choc sw_2 pour les trois positions de la porte. Précédant le passage de sw_2 , les détentes RNrwl imposent un niveau de pression en dessous de la pression atmosphérique. Le saut de pression le plus intense est celui du cas avec la porte à 90° , 0.15 bar, alors que le plus faible correspond au cas de la porte ouverte à 30° , 0.08 bar. Au niveau de l'ouverture, figure 3.18b, ce résultat est plus complexe à percevoir, le capteur C_{side} enregistre très tôt les réflexions sur la porte inclinée. Ces réflexions imposent une nouvelle élévation de pression qui se superpose à sw_2 .

Sur la figure 3.19 nous avons choisi de présenter les signaux de pression enregistrés lors des trois expériences au niveau du capteur C_{bottom} . Ce dernier est au niveau de l'ouverture à l'extrémité du tube et est le plus éloigné de la porte dans sa position ouverte. Sa position permet de bien dissocier les sauts de pression imposés par le passage de l'onde de choc incidente IS1 et de sa réflexion sur la porte inclinée RIS1. L'intervalle de temps de la figure 3.19 encadre la sortie de l'onde de choc IS1 et la réintroduction de sa réflexion RIS1 dans le tube à choc. Le niveau de pression détecté après le passage de IS1 est le plus faible lorsque la porte est totalement ouverte à 90° , 0.27 bar. Dans cette configuration, lors de sa sortie, IS1 ne rencontre pas d'obstacle, il n'y a donc pas d'onde réfléchie qui impose une éventuelle élévation de pression. Dans les deux autres configurations, avec la porte à 30° et 45° , on identifie clairement ces réflexions RIS1. C'est lorsque la porte est inclinée à 30° que le niveau de pression enregistré est le plus élevé : 0.65 bar. il est à noté que cette pression est nettement plus élevée que celle que l'on obtient derrière la réflexion plane d'une onde de choc (Mach 1.1) sur une paroi rigide, 0.54 bar.

La figure 3.20 apporte l'explication des phénomènes qui conduisent à un tel niveau de pression. Cette figure permet de comparer les visualisations stroboscopiques enregistrées lors des expériences avec la porte à 45° et à 30° , au moment où le capteur C_{bottom} saisit l'information du passage de la réflexion de l'onde de choc incidente RIS1. Juste avant cet instant la pression au

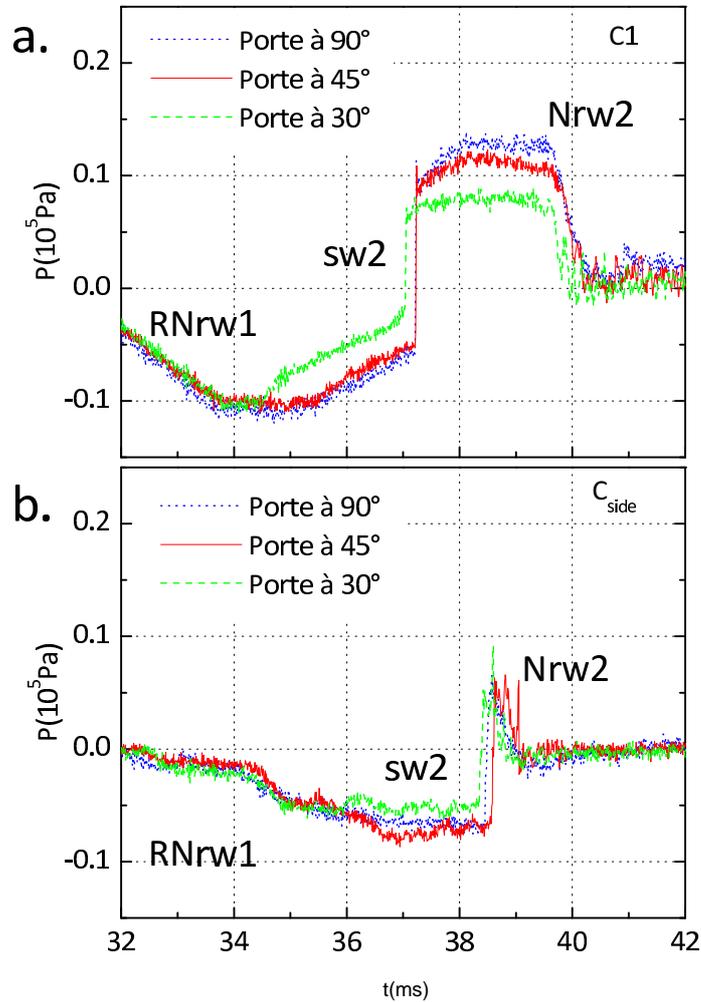


FIGURE 3.18 – Influence de l'ouverture de la porte (30°, 45° et 90°) sur l'évolution de l'onde de choc $sw2$ le long du tube à choc $C1$ et à la sortie de la maquette C_{side} ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).

niveau du capteur est la même dans les deux expériences. Son niveau est au-dessus de la pression atmosphérique ; il résulte du passage de l'onde de choc incidente $IS1$ et du début de l'action des ondes de détente $Nrw1$ qui sont réintroduites dans le tube. L'évolution des ondes dans les deux configurations est sensiblement identique. L'onde réfléchie $RIS1$ qui revient dans la maquette n'est pas parallèle au tube à choc. Lorsqu'elle rencontre la face inférieure du

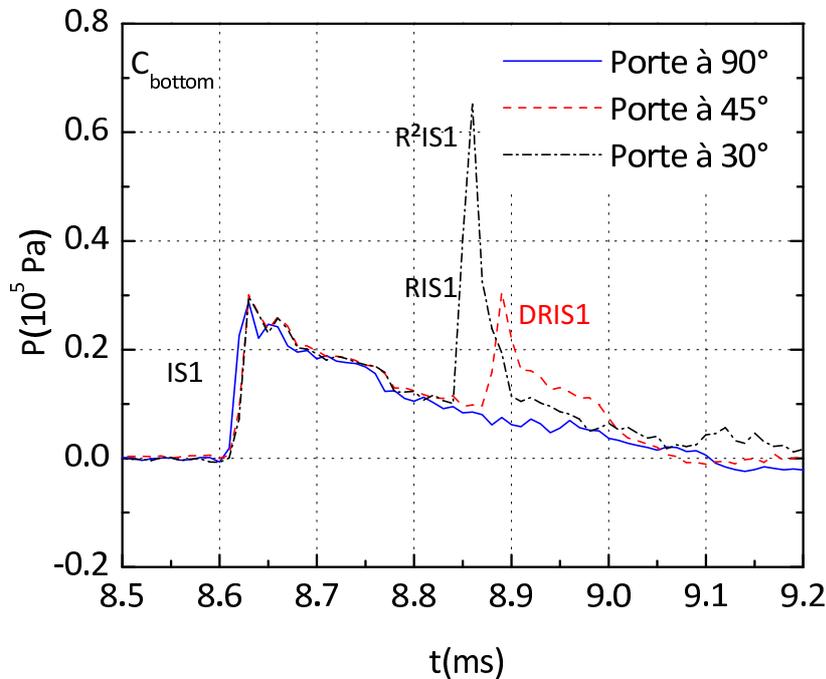


FIGURE 3.19 – Influence de l'ouverture de la porte (30°, 45° et 90°) sur l'évolution de l'onde de choc incidente IS1 à sa sortie de la maquette C_{bottom} ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).

tube à choc, elle va à nouveau se réfléchir et former un point triple. Ce point triple apparaît sur les deux clichés de la figure 3.20. A son passage sur le capteur C_{bottom} , il détecte une élévation de pression due à RIS1, mais aussitôt se superpose un autre saut de pression dû à cette nouvelle réflexion R^2IS1 , identifié sur la photo de la configuration à 30°. C'est cette triple réflexion qui justifie le niveau de pression, 0.65 bar, atteint lorsque la porte est ouverte à 30°. Une différence subsiste cependant entre les deux configurations. La pression derrière cette triple réflexion est nettement moins intense lorsque la porte est à 45°. Dans cette configuration l'onde de choc réfléchie RIS1 se propage verticalement. La majeure partie de RS1 est expulsée dans l'air ambiant (figure 3.20). La partie qui est réinjectée dans la veine d'essai est en fait la queue de l'onde de choc DRIS1 qui a déjà commencé à se diffracter et qui donc a perdu en intensité. En comparaison, lorsque la porte est ouverte à 30°, la majeure partie de l'onde de choc réfléchie RSI1 est réintroduite dans le tube à choc. Le saut de pression qu'elle génère est donc nettement plus élevé.

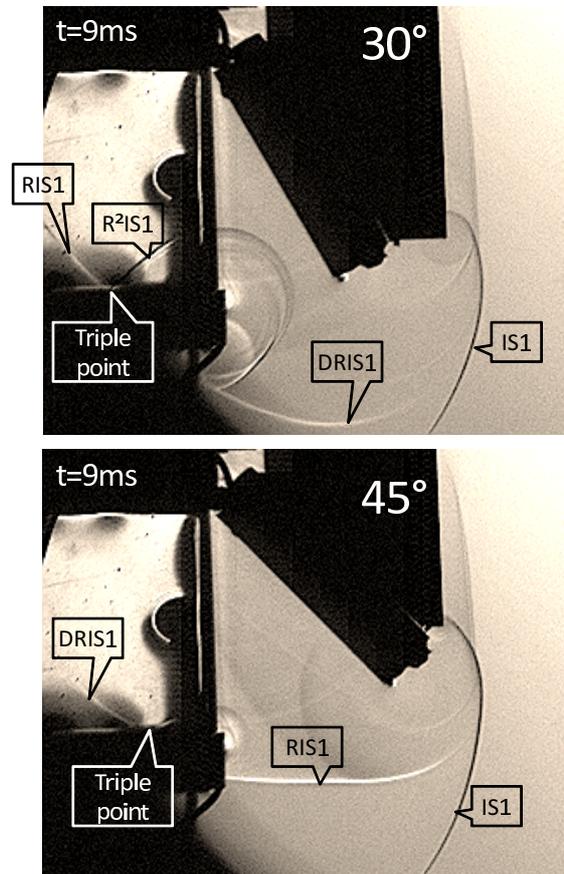


FIGURE 3.20 – Clichés strioscopiques mettant en évidence l'influence de la position de la porte (30° ou 45°) sur la formation des réflexions de l'onde de choc incidente lorsqu'elle sort de la maquette((T80#624) et (T80#623)).

On a constaté sur les figures 3.11 et 3.16 que la sortie de l'onde de choc incidente IS1 était suivie d'une surpression OP1. Comme on le voit sur la figure 3.21, cette surpression subsiste pendant plusieurs millisecondes. Cette figure présente les signaux enregistrés lors des trois expériences (90°, 45° et 30°) sur la face supérieure de la maquette à 10 millimètre de l'articulation de porte. Dans les cas où la porte est inclinée à 30° et 45°, cette zone de surpression ne semble pas subir l'influence de l'air ambiant avec qui elle est directement en contact. Si cela était le cas, des ondes de détente devraient ramener très rapidement la pression au niveau de la pression atmosphérique. C'est ce que l'on constate lorsque la porte est entièrement ouverte (90°), où aussitôt que l'onde incidente IS1 est détectée, un faisceau d'ondes de détente Nr_w1 ramène la pression au niveau atmosphérique. Toujours sur la figure 3.21, on observe que

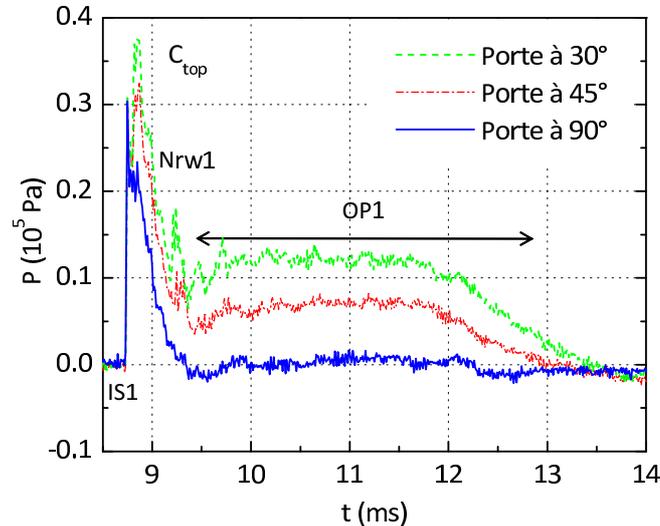


FIGURE 3.21 – Comparaison de la surpression OP1 générée en sortie de la maquette (C_{top}) après le passage de l'onde de choc incidente en fonction de l'ouverture de la porte à 30°, 45° ou 90° ((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).

cette surpression OP1 est la plus élevée lorsque la porte est entrouverte avec un angle de 30°, elle s'élève de 0,13 bar au dessus de la pression atmosphérique. Ce phénomène peut s'expliquer par l'analyse des clichés strioscopiques de la figure 3.22. Ces séquences de visualisation présentent la période pendant laquelle l'onde de choc IS1 sort du tube à choc. Dans le cas où la porte est à 90° et comme détaillé plus tôt, aucune réflexion de l'onde de choc incidente n'est visible. Par contre dans les deux autres configurations, le retour des ondes de choc réfléchies dans le tube est nettement visible. Comme cela a été précédemment expliqué, on peut observer qu'à cause de l'inclinaison de ces ondes par rapport à l'axe du tube à choc, ces dernières effectuent de multiples allers et retours entre les faces inférieure et supérieure la maquette. A chaque impact d'une de ces réflexions sur les parois, la pression augmente, et une partie du choc est dirigée à nouveau dans le tube. C'est l'ouverture vers le milieu ambiant qui limite le niveau de pression atteint. Ces multiples réflexions vont cesser lorsque l'onde de choc aura suffisamment perdu de son intensité et ne sera plus qu'une onde de compression. C'est la combinaison de ces réflexions verticales et des ondes de détente provenant de l'ouverture de la maquette qui génère cette surpression OP1 qui va rester quasi constante pendant plusieurs millisecondes. Il apparaît alors logique que dans l'expérience où la porte est inclinée à 30°, les ondes de choc réfléchies dans le tube

étant plus intenses et la taille de l'ouverture étant plus faible, le niveau de surpression atteint est plus élevé.

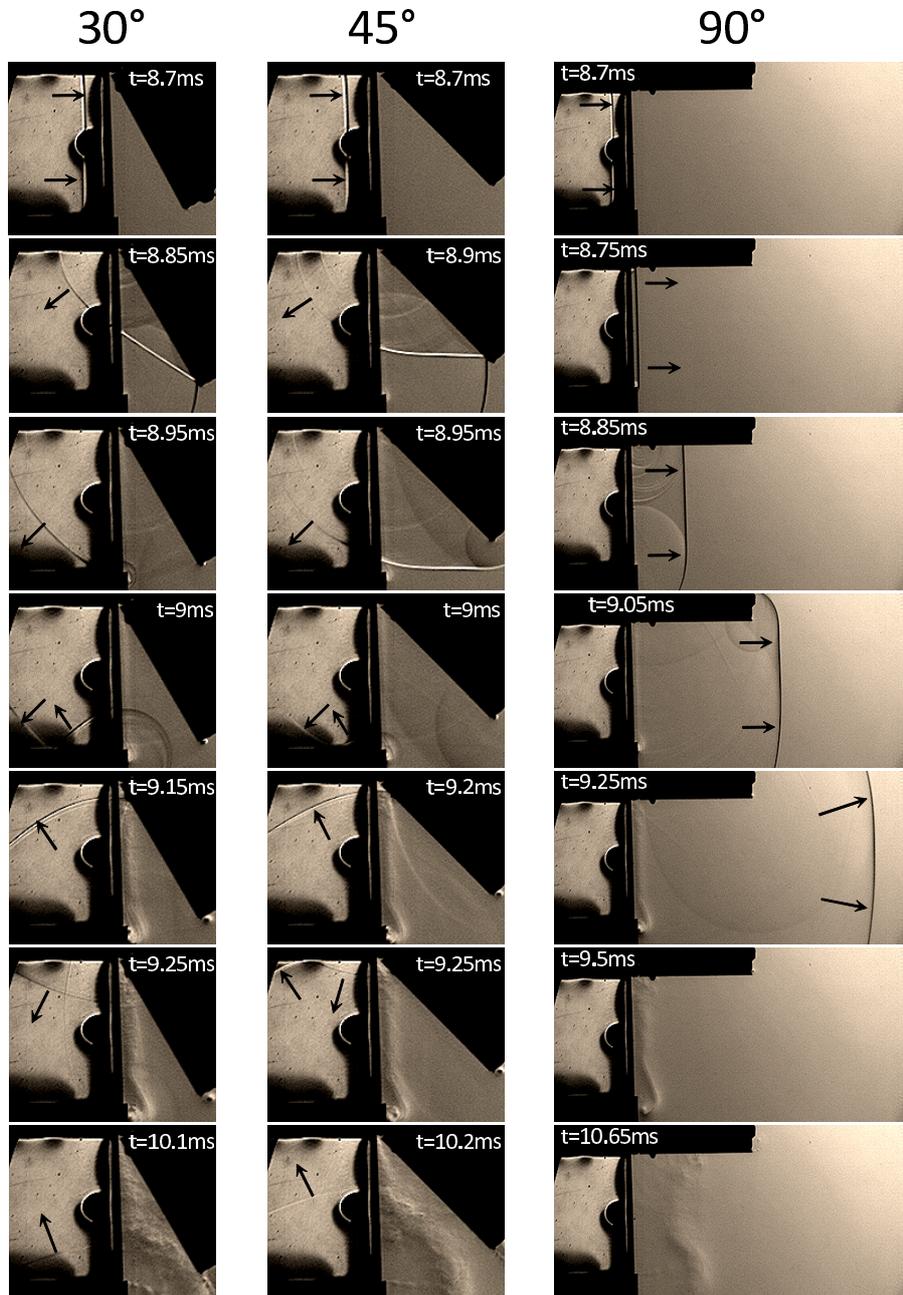


FIGURE 3.22 – Série de clichés strioscopiques montrant la propagation des multiples réflexions de l'onde de choc incidente au niveau de la maquette pour chacune des positions étudiées (30°, 45° et 90°)((T80#620), (T80#624) et (T80#623)).

3.4 Conclusion

Les différentes analyses effectuées dans ce chapitre ont mis en évidence la complexité de l'écoulement pouvant apparaître lorsque l'extrémité d'un tube à choc est ouverte [5]. Ainsi, nous avons expliqué comment de multiples ondes de choc se forment dans le tube alors que l'onde de choc initiée par la rupture du diaphragme est sortie de l'installation. La poursuite de ces investigations a permis d'atténuer ces ondes en réduisant la taille de l'ouverture à l'extrémité du tube, en l'obstruant avec une porte partiellement ouverte. Il résulte de cette modification des niveaux de pression plus élevés à causes de multiples réflexions et aussi des surpressions qui perdurent dans l'installation.

Cette étude préalable permet de mieux comprendre comment l'écoulement instationnaire évoluant dans un tube à choc est influencé par une ouverture à l'extrémité. Ainsi, la corrélation entre le mouvement d'une porte placée à l'extrémité de notre installation et l'écoulement qui en est la cause sera plus aisée à établir. Le temps caractéristique d'ouverture de la porte est nettement plus élevé que celui de propagation des ondes. On peut envisager dès lors, que des écoulements similaires à ceux qui viennent d'être décrits vont agir sur la porte en mouvement et ainsi influencer sa dynamique.

Chapitre 4

OUVERTURE DE LA PORTE

Sommaire

4.1	Cas de référence	85
4.1.1	Présentation	85
4.1.2	Résultats	85
4.1.3	Observations et analyses préliminaires	87
4.1.4	Analyse théorique	88
4.2	Études paramétriques d'ouverture de porte . .	97
4.2.1	Effet d'une pré-ouverture de la porte	97
4.2.2	Effet du nombre de Mach	105
4.2.3	Effet de l'inertie de la porte	111
4.3	Conclusion	116

Après avoir pris le soin de comprendre comment les ondes se forment et se transforment dans un tube à choc ouvert, il est temps d'amorcer l'étude de la dynamique d'une porte placée à son extrémité. Dans le premier chapitre, nous avons détaillé la démarche de dimensionnement de notre maquette. Notamment nous avons défini les inerties des portes à partir d'un temps d'ouverture souhaité (aux alentours des 30 ms). Or, à l'issue du chapitre 3, on sait maintenant que dans ce laps de temps, plusieurs ondes de choc vont se présenter en sortie du tube à choc. Les temps caractéristiques d'ouverture de la porte et du passage des ondes de choc sont très différents. Il est donc évident que lors de sa phase d'ouverture, la porte soit soumise à l'action de plusieurs passages d'ondes de choc, et de détente.

4.1 Cas de référence

4.1.1 Présentation

Pour cette expérience, nous avons adapté la porte en aluminium ($m=0.374$ kg, $I=1234$ kg.mm²) sur la maquette. La porte est articulée avec des charnières fixées sur la face supérieure de la maquette, comme présenté sur les figures 2.8 et 2.13. Une cale d'arrêt est positionnée pour éventuellement stopper la rotation de la porte si elle atteint un angle de 90° . Nous avons, de plus, adapté sur la porte et sur la cale de la bande auto-agrippante (VELCRO) pour maintenir la porte en position ouverte si celle-ci percute la cale. En utilisant un diaphragme constitué de deux feuilles de papier aluminium alimentaire, nous avons généré dans le tube à choc une onde de choc incidente avec un nombre de Mach de $M_{is}=1.1$. Grâce au montage strioscopique et à la caméra ultra rapide, nous avons filmé à la fois le mouvement de porte et l'interaction des phénomènes fluides avec celle-ci. Pour finir nous avons relevé la pression aux huit emplacements (C_{top} , C_{door} , C_{side} , C_{bottom} , C1, C7, C10 et C12) définis dans les chapitres précédents (tableau 2.2).

4.1.2 Résultats

La porte a été intégralement ouverte par l'action des phénomènes fluides résultant du passage d'une onde de choc faible $M_{is}=1.1$. Les figures 4.1 et 4.2 présentent quelques clichés strioscopiques enregistrés pendant l'ouverture de la porte, respectivement pour les intervalles de temps de 8.7 ms à 34.4 ms et 34.5 ms à 49.2 ms.

Le temps indiqué sur chaque photo correspond au temps écoulé depuis la rupture du diaphragme. Ainsi à $t=8.7$ ms (image A) l'onde de choc incidente engendrée par la rupture des feuilles de papier aluminium atteint l'extrémité du tube à choc et impacte la porte fermée. Dès cet instant, des ondes de choc sont transmises au milieu extérieur et des écoulements de fuites apparaissent sur les pourtours de la porte. On peut aisément les distinguer sur le cliché pris à $t=9.2$ ms (image B). Même si cela n'est pas visible sur les photos présentées ici, la porte se met en mouvement quasi instantanément après le passage du choc. La porte s'ouvrant, l'espace entre celle-ci et l'extrémité de la maquette expérimentale grandit et le débit des fuites augmente. On observe ces écoulements jusqu'à $t=15.1$ ms (image C). Lorsque l'onde de choc incidente a impacté la porte fermée, la majeure partie de l'onde a été réfléchiée dans le tube à choc. Après avoir traversé tout le tube à choc et s'être à nouveau réfléchiée sur le fond de la chambre haute pression, cette onde de choc se présente à l'extrémité de la maquette (image D à $t=30.6$ ms). Or, à cet instant la porte a changé de position, elle est maintenant ouverte et forme un angle d'environ 50° avec la maquette. L'onde de choc se propage dans l'air ambiant (image E à $t=30.7$ ms). Sa partie inférieure se diffracte

via un vortex sur le bord de la maquette alors que sa partie supérieure subit une réflexion régulière le long de la porte. La partie réfléchie du choc sur la porte inclinée se propage maintenant verticalement du haut vers le bas. A $t = 30.8$ ms (image F) l'onde de choc atteint l'extrémité de la porte et va se diffracter le long de celle-ci (image F à $t = 30.8$ ms). On peut distinguer la propagation des différents réseaux d'onde jusqu'à $t = 31$ ms (image H). On observe aussi depuis l'instant $t = 30.9$ ms (image G) et jusqu'à $t = 33.3$ ms (image I) le déplacement de l'interface de contact entre le gaz ayant subi le passage de l'onde choc et le milieu ambiant. Pendant cette période les deux vortex générés par la détente du choc au bord inférieur de la maquette et à l'extrémité de la porte continuent de croître et de se déplacer. Enfin, jusqu'au cliché enregistré à $t = 45.5$ ms (image J), on ne distingue plus aucun mouvement de fluide. C'est à l'instant que la porte atteint sa fin de course et vient percuter la cale d'arrêt à 90° , les bandes auto-agrippantes la maintenant dans cette position. L'extrémité du tube à choc est laissée ouverte. Suite à l'impact de l'onde de choc incidente à $t = 8.7$ ms, il aura fallu 36.8 ms pour que la porte en aluminium parcoure un angle de 90° et atteigne sa position finale.

Pendant cette même expérience l'évolution de la pression dans l'installation a été enregistrée. Les signaux des emplacements C12, C10, C7, C1 et C_{door} sont présentés sur la figure 4.3. Sur ses signaux les flèches indiquent le sens de propagation des ondes identifiées. Lorsqu'elles pointent la droite, les flèches désignent des ondes qui se propagent de la chambre haute pression vers la chambre basse pression et vice-versa. A partir des 5 signaux de pression enregistrés sur la face supérieure, nous avons construit le diagramme d'onde ($x-t$) sur une période de 50 ms débutant à la rupture du diaphragme. Sur ce diagramme présenté sur la figure 4.4, nous y avons détaillé les principales ondes se propageant dans l'écoulement interne du tube à choc et de la maquette.

A $t = 0$ ms, le diaphragme rompt sous l'effet de la pression accumulée dans la chambre haute pression. Il se propage alors dans la chambre basse pression un faisceau d'ondes de compression qui coalescent très rapidement en une onde de choc : Is_{w_1} . Dans le même temps un faisceau d'ondes de détente : rw_1 , se crée dans la chambre haute pression, atteint le fond de celle-ci et s'y réfléchit. Cette réflexion est désignée par Rrw_1 sur les figures 4.3 et 4.4. Lorsque l'onde de choc incidente, Is_{w_1} , impacte la porte fermée à l'extrémité de la maquette, elle se réfléchit, Rsw_1 , et repart en direction de la chambre haute pression. La conception de la maquette assure une ouverture immédiate de la porte. Ceci a imposé de ne pas assurer d'étanchéité au niveau de la porte fermée. De plus, immédiatement après l'impact de Is_{w_1} , la porte commence à s'ouvrir et un espace est créé entre la porte et l'extrémité de la maquette. On aperçoit sur la photo B de la figure 4.1 à $t = 0.5$ ms, que des

ondes de choc et des fuites sont transmises au milieu extérieur aussi bien par les parties latérales que inférieures de l'espace ainsi créé. Ces fuites génèrent dans le tube à choc un faisceau de détente, EA, qui va suivre l'onde de choc réfléchi R_{sw1} vers la chambre haute pression. Quelques millisecondes plus tard, c'est au tour de la réflexion des ondes de détente initiées par la rupture du diaphragme R_{rw1} , d'atteindre la porte et de se réfléchir : rw_2 . Si la porte avait été parfaitement étanche, le niveau de pression après le passage de R_{sw1} serait resté constant jusqu'à l'arrivée de R_{rw1} et rw_2 , comme dans un tube à choc fermé. L'onde de choc R_{sw1} et ces réseaux de détente EA et rw_2 vont traverser tout le tube à choc, puis se réfléchir respectivement en R^2_{sw1} , REA et R_{rw2} et retourner vers la maquette et la porte. On peut suivre l'évolution de cette succession d'ondes sur les figures 4.3 et 4.4. A leur retour, les détentes REA et R_{rw2} fusionnent.

Pendant la durée du trajet de ces ondes, la porte, dont le mouvement a été initié par l'impact d' I_{sw1} , a parcouru un angle de près de 50° . C'est environ 31 ms après le début de l'expérience que l'onde de choc R^2_{sw1} atteint l'orifice laissé par l'ouverture de la porte. R^2_{sw1} est en majeure partie expulsée dans l'atmosphère. Comme nous l'avons détaillé dans le paragraphe précédent, la sortie de cette onde de choc impose une compensation de la pression dans le tube et un réseau d'onde de détentes EE, va pénétrer dans le tube à choc. De même, lorsque la fusion des détentes REA et R_{rw2} atteint la sortie, un faisceau d'onde de compression EP pénètre dans le tube à choc. Ces deux trains d'ondes EE et EP traversent à leur tour le tube à choc, se réfléchissent sur le fond de la chambre haute pression, respectivement en REE et REP. Les cycles de compensation du niveau de pression dans le tube perdurent pendant plusieurs dizaines de millisecondes après l'ouverture de la porte. Pendant cette période, la porte a eu le temps d'atteindre la fin de sa course à 90° et est restée bloquée dans la position ouverte grâce aux bandes auto-agrippantes.

4.1.3 Observations et analyses préliminaires

Comme nous avons pu le voir grâce à l'analyse des séquences vidéos, lors de son ouverture, la porte interagit avec plusieurs ondes de choc et de détente. Il est donc fondamental d'analyser l'évolution angulaire de la porte pour avoir une idée de l'influence de chacune de ces interactions. [4]

La figure 4.5 présente la superposition de la pression enregistrée au centre de la porte et de la position angulaire de la porte, construite à partir de la visualisation de l'expérience. Tout d'abord, en observant cette dernière courbe on distingue deux phases distinctes : une partie courbe pendant les 5 premières millisecondes de l'expérience qui traduit la phase d'accélération de la porte

puis une seconde partie depuis $t=5$ ms jusqu'à ce que la porte atteigne les 90° de la position finale, soit $t= 36.8$ ms. Dans cette partie l'évolution angulaire est quasiment linéaire, la vitesse angulaire de la porte semble être constante.

En se reportant maintenant à l'évolution de la pression sur la porte, on constate que la phase d'accélération de la porte est directement liée à l'impact de l'onde de choc incidente I_{sw_1} sur celle-ci et à la surpression qui en résulte. A $t=22$ ms, à l'instant où le second choc R_{sw_2} impacte à son tour la porte, on observe que sa signature de pression est très brève. La surpression due à son impact sur la porte n'est maintenue que quelques microsecondes et ne semble pas avoir une influence significative sur la dynamique de la porte. Si cette onde de choc avait eu la moindre influence sur l'ouverture de la porte, nous aurions dû voir un point d'inflexion sur la courbe d'évolution angulaire. Pourtant lorsqu'on suit l'évolution de ce choc R_{sw_2} à l'intérieur du tube sur la figure 4.3, la surpression qui suit son passage dure plusieurs millisecondes, c'est seulement à son approche de la sortie du tube que ce plateau de pression disparaît. C'est parce que la porte est en position ouverte et que les ondes se propagent dans l'air ambiant, que immédiatement après le saut de pression, les conditions qui s'appliquent sur la porte sont ramenées à celle des conditions atmosphériques.

4.1.4 Analyse théorique

L'allure de la courbe sur la figure 4.5 fournit un résultat intéressant. Celle-ci représente l'évolution angulaire de la porte montre deux parties bien distinctes : d'abord, un arc de parabole pendant les cinq premières millisecondes puis une portion de droite. Ces deux portions traduisent graphiquement une première phase où la porte accélère, suivie d'une phase où la porte s'ouvre à vitesse constante. Identifions les respectivement par la dénomination suivante : phase 1 et phase 2.

Replongeons-nous maintenant dans l'analyse théorique : considérons l'évolution angulaire de la porte dans la phase 1, la phase d'accélération. Ici c'est la surpression appliquée sur la porte qui est le moteur du mouvement. Nous pouvons isoler la porte et lui appliquer le principe fondamental de la dynamique. Si nous nous concentrons sur son expression du moment en projection autour de l'axe de rotation de la porte, il se résume à l'équation 4.1, avec :

- m : masse de la porte,
- I_z : moment d'inertie de la porte autour de l'axe de rotation de la porte
($O ; \vec{z}$)
- g : accélération de la pesanteur,

- l : largeur de la porte (80 mm),
- L : longueur de la porte (87 mm),
- $P(t,x,y,z)$: pression qui s'exerce sur la porte,
- $\ddot{\theta}_i(t)$: accélération angulaire de la porte dans la phase i d'ouverture correspondante,
- $\dot{\theta}_i(t)$: vitesse angulaire de la porte dans la phase i d'ouverture correspondante,
- $\theta(t)$: position angulaire de la porte lors de son ouverture,
- t : temps dont l'origine est l'instant de l'impact de l'onde choc incidente sur la porte,
- x et y : paramètres géométriques définis sur la figures 2.8.

$$I_z \cdot \ddot{\theta}_1(t) = \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y \cdot P(t, x, y, z) dy dz + m \cdot g \cdot \frac{L}{2} \sin \theta \quad (4.1)$$

Dans le cas présent, au début de l'ouverture de la porte :

$$\theta \leq 5^\circ \Rightarrow \sin \theta \simeq 0 \Rightarrow m \cdot g \cdot \frac{L}{2} \sin \theta \simeq 0 \quad (4.2)$$

L'expression du principe fondamental de la dynamique se limite donc à :

$$I_z \cdot \ddot{\theta}_1(t) = \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y \cdot P(t, x, y, z) dy dz \quad (4.3)$$

Si, maintenant nous intégrons sur le temps cette relation, nous obtenons l'expression de la vitesse dans la phase 1 :

$$I_z \cdot \dot{\theta}_1(t) = \int_0^t \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y \cdot P(t, x, y, z) dy dz dt \quad (4.4)$$

ou encore,

$$\dot{\theta}_1(t) = \frac{1}{I_z} \int_0^t \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y \cdot P(t, x, y, z) dy dz dt \quad (4.5)$$

Si nous connaissons l'évolution spatiale et temporelle de la pression sur la porte il serait facile d'établir l'évolution dynamique de la porte. Or, pour toutes les raisons que nous avons détaillées plus tôt, nous n'avons que des informations partielles sur l'évolution de cette pression, seulement sa valeur

au centre de la porte, C_{door} .

Mais ne nous arrêtons pas là et continuons l'étude théorique de la phase suivante de l'ouverture, la phase 2, celle où la porte s'ouvre avec une vitesse angulaire constante. Ici, l'accélération de la porte est nulle :

$$I_z.\ddot{\theta}_2(t) = 0 \quad (4.6)$$

Et pour la vitesse angulaire nous pouvons en déduire que :

$$\dot{\theta}_2(t) = cste = \dot{\theta}_2 \quad (4.7)$$

Sur la figure 4.5, nous pouvons constater que l'évolution de l'ouverture de la porte est continue, il n'y a pas de rupture de pente brusque.

Nous pouvons donc admettre qu'à la fin de la phase d'accélération, la phase 1, la vitesse angulaire est la même que la vitesse constante dans la phase d'ouverture, la phase 2. Donc si $t_0 = 0$ ms est le début de la phase 1 et t_1 son instant de fin, alors nous pouvons écrire :

$$I_z.\dot{\theta}_1(t_1) = \dot{\theta}_2 = \frac{1}{I_z} \int_0^{t_1} \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y.P(t, x, y, z) dy dz dt \quad (4.8)$$

Grâce aux mesures expérimentales, nous pouvons mesurer la pente de la droite quand la porte s'ouvre à vitesse constante. Nous connaissons l'inertie de la porte que nous avons fabriquée. Nous pouvons donc calculer la valeur de l'intégrale du moment des efforts de pression exercés sur la porte pendant la phase où celle-ci accélère, c'est-à-dire la période où la surpression exercée sur la porte est non nulle, et en conclure que :

$$\int_0^{t_1} \int_0^L \int_{-l/2}^{l/2} y.P(t, x, y, z) dy dz dt = I_z.\dot{\theta}_2 \quad (4.9)$$

Cette relation nous permet, dans le cas où la porte débute son ouverture en position fermée, de pouvoir quantifier à partir des résultats expérimentaux l'action de la pression sur la porte. Cette relation met en évidence le lien qui existe entre d'une part l'inertie de la porte, la pression qui agit sur porte et la réponse dynamique de la porte.

Une dernière remarque est nécessaire pour conclure l'analyse de ce cas dit de référence. Dans cette expérience le temps qui s'est écoulé entre le passage des ondes de choc Isw_1 et Rsw_2 est principalement dû à la longueur du tube à choc, paramètre qui dépend uniquement de notre installation expérimentale. Si cette longueur avait été différente, la position de la porte au moment du passage de Rsw_2 aurait été différente.

De ces analyses il découle une série de questions dont les réponses pourrons nous permettre de comprendre l'influence de chaque paramètre dans ce couplage entre la structure en mouvement et le fluide qui impose ce mouvement.

Qu'en est-il si l'interaction du choc réfléchi avec la porte se fait lorsque cette dernière se trouve dans une autre position angulaire ?

Il est probable que l'évolution de la pression et donc la réaction de la porte soient modifiées. Dans le même état d'esprit, nous avons vu qu'à l'instant où l'onde de choc incidente Isw_1 impacte la porte, celle-ci commence à s'ouvrir. Cette ouverture génère un faisceau de détente EA détaillé sur la figure 4.4 qui pénètre dans le tube choc et modifie les conditions de pression s'appliquant sur la porte et influant donc aussi sur sa dynamique.

Qu'en est-il si nous intervenons sur ce temps d'ouverture en modifiant par exemple l'inertie de la porte ou bien l'intensité de l'onde choc incidente Isw_1 ?

Le paragraphe suivant détaille des séries d'expériences qui apportent des réponses à ces questions.

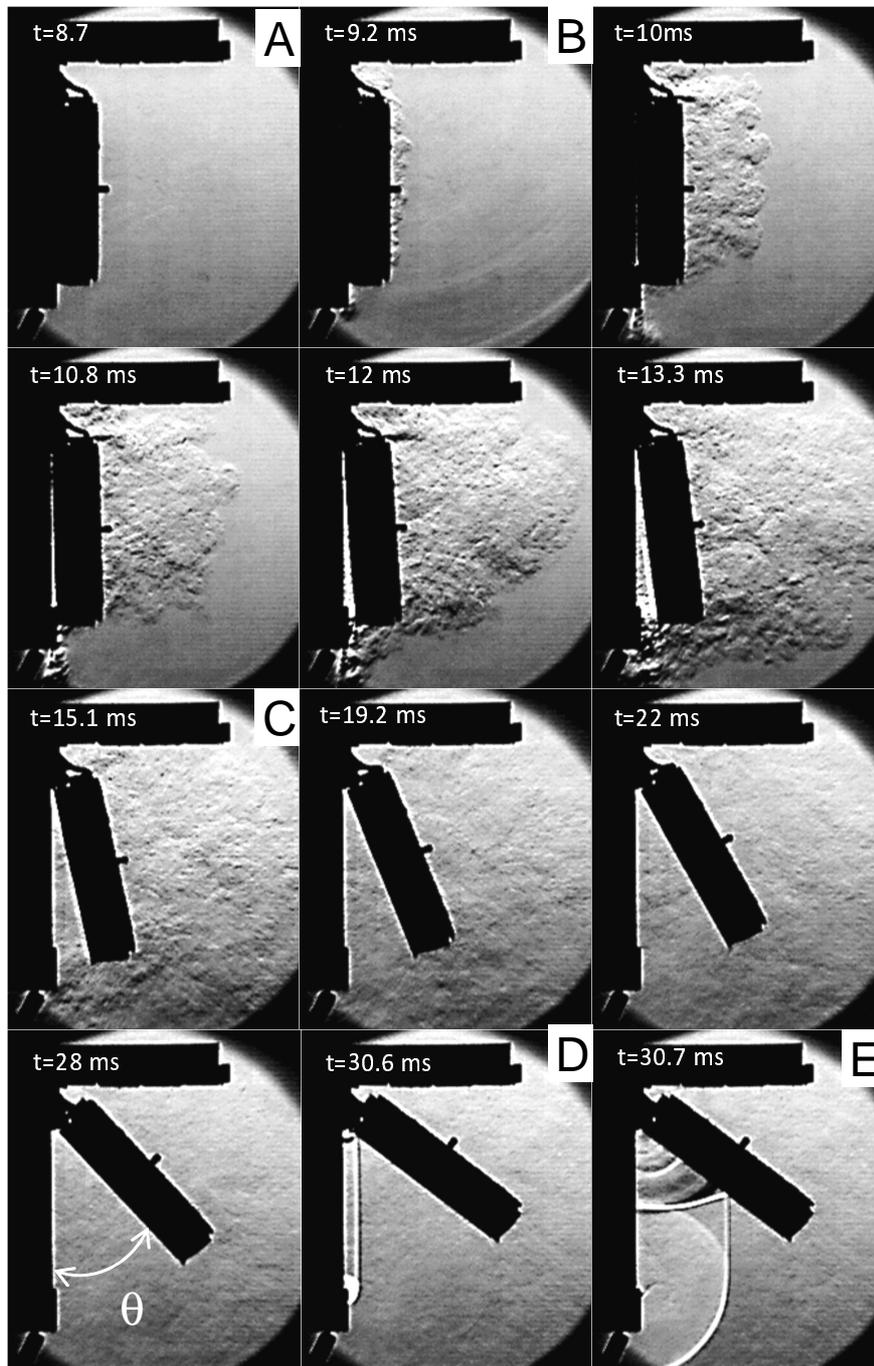


FIGURE 4.1 – Séquence de clichés strioscopiques montrant l'évolution de la porte en aluminium suite à l'impact d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$), pour l'intervalle de temps de 8,7 à 34,4 ms. L'onde de choc incidente se déplace vers la droite et l'origine des temps correspond à la rupture du diaphragme (T80#527e).

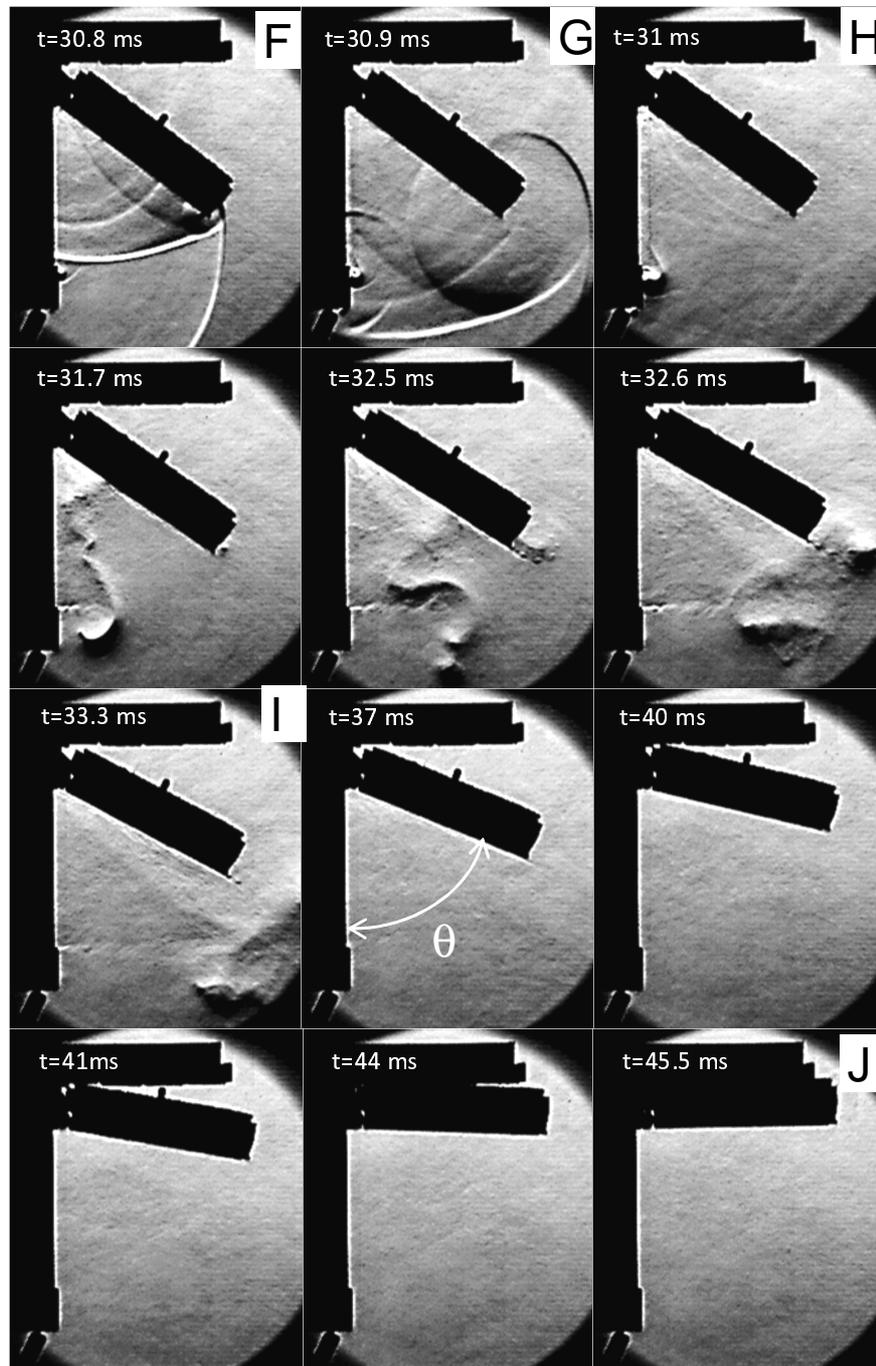


FIGURE 4.2 – Séquence de clichés strioscopiques montrant l'évolution de la porte en aluminium suite à l'impact d'une onde de choc plane ($M_{is}=1.1$), pour l'intervalle de temps de 34,5 à 49,2 ms. L'onde de choc incidente se déplace vers la droite l'origine des temps correspond à la rupture du diaphragme(T80#527e).

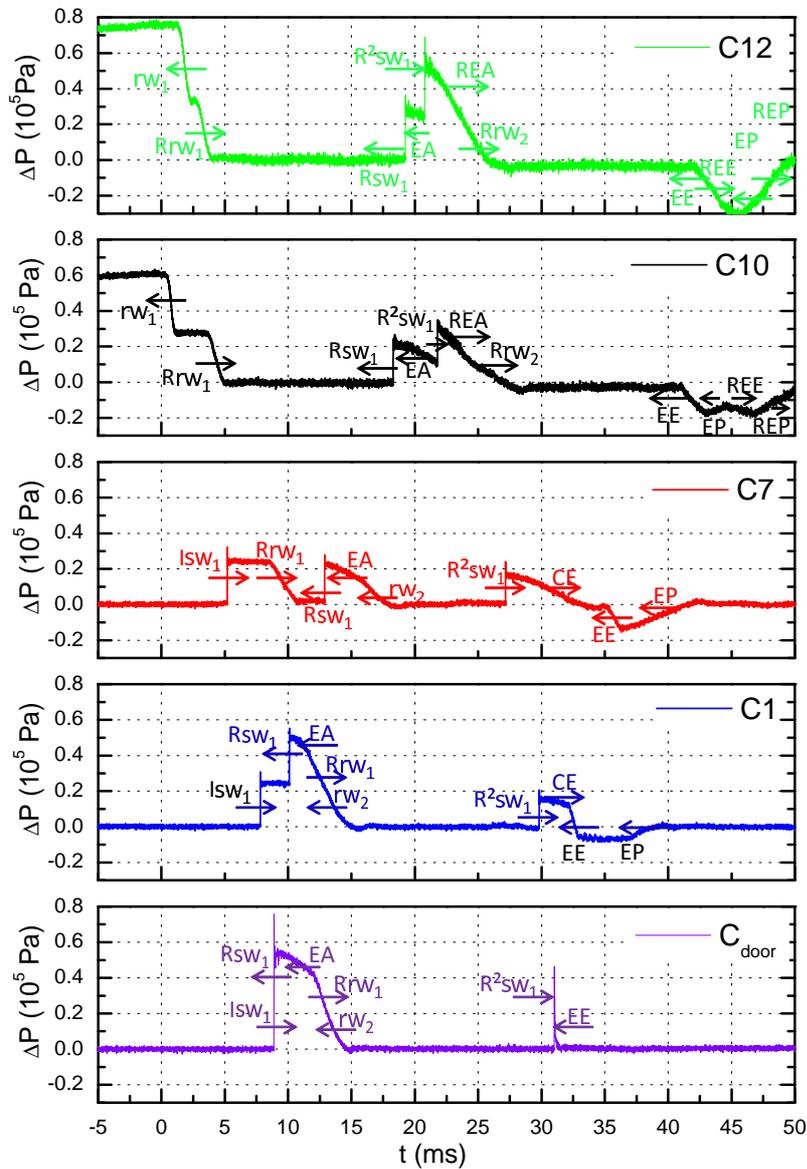


FIGURE 4.3 – Signaux de pression enregistrés sur cinq capteurs installés le long de l'installation expérimentale, lors de l'expérience avec la porte en aluminium s'ouvrant de 0° à 90° sous l'action d'une onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$. Les flèches indiquent le sens de propagation de chacune des ondes identifiées : lorsqu'elles pointent la droite, les ondes correspondantes se propagent de la chambre HP vers la sortie du tube et inversement (T80#527).

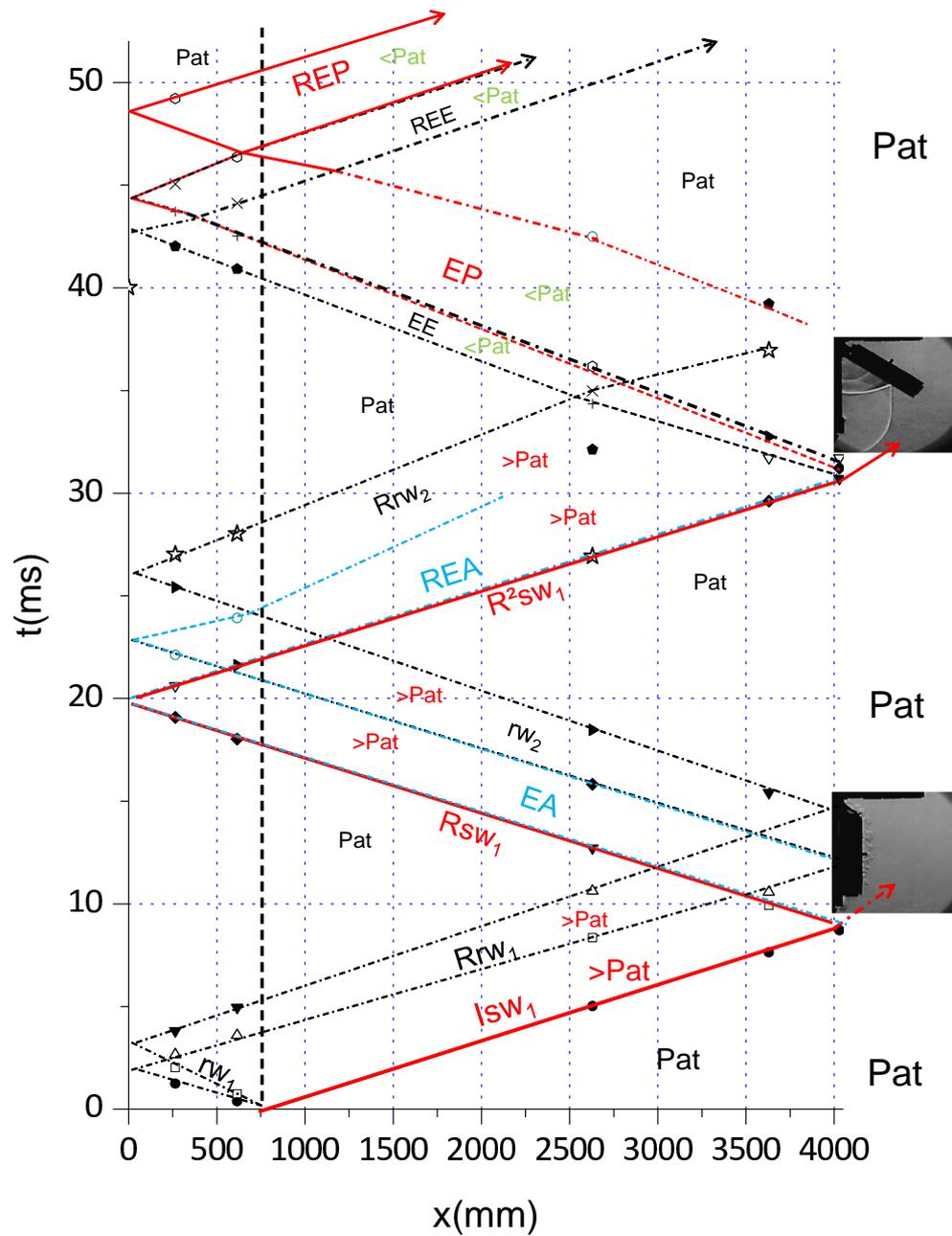


FIGURE 4.4 – Diagramme d’ondes (x-t) reconstruit à partir des signaux de pression enregistrés le long de la face supérieure du tube à choc et de la maquette, lors de l’expérience avec la porte en aluminium s’ouvrant de 0° à 90° sous l’action d’un onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527).

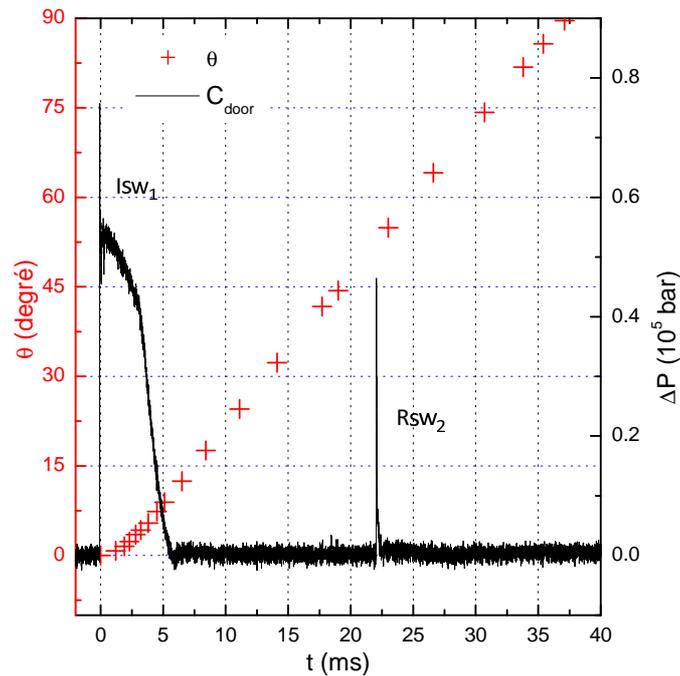


FIGURE 4.5 – Superposition du signal de pression enregistré au centre de la porte (C_{door}) et de l'évolution angulaire de celle-ci reconstruite à partir de la visualisation ultra-rapide, enregistrés lors de l'expérience avec la porte en aluminium s'ouvrant de 0° à 90° sous l'action d'un onde de choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527).

4.2 Études paramétriques d'ouverture de porte

Dans ce paragraphe nous présentons plusieurs séries d'expériences qui mettent en évidence l'effet de certains paramètres sur le comportement dynamique de la porte. Notamment nous nous attardons sur l'effet que peut avoir une pré-ouverture de la porte sur son évolution angulaire après l'impact de l'onde de choc incidente. Nous regardons aussi comment une variation du nombre de Mach de l'onde de choc incidente agit sur l'ouverture de la porte. Enfin, nous modifions l'inertie de la porte et analysons ce que cela implique sur les résultats expérimentaux.

4.2.1 Effet d'une pré-ouverture de la porte

Pour parfaire nos investigations, nous avons réalisé une étude paramétrique mettant en évidence l'effet d'une ouverture partielle de la porte sur son évolution dynamique et sur son interaction avec les écoulements internes au tube à choc. Le but de cette série d'expériences est de déterminer comment le niveau de pression agissant sur la porte est atténué par la taille de l'ouverture laissée à l'extrémité de l'installation. Elles permettent aussi de détecter d'éventuelles positions particulières pouvant définir des comportements dynamiques caractéristiques.

Présentation

Le mode opératoire expérimental est toujours le même. La porte en aluminium dont les dimensions sont données sur la figure 2.8 est positionnée à l'extrémité de la maquette. La porte est laissée avec un degré de liberté en rotation autour d'un axe horizontal perpendiculaire à l'axe du tube à choc et positionnée sur la face supérieure de la veine d'essai, comme détaillé sur la figure 2.13. Nous générons, grâce à un diaphragme composé de deux couches de papier aluminium, une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$. Un buttoir métallique est positionné pour éventuellement arrêter la porte si elle atteint la position de 90° . De plus, des bandes auto-agrippantes sont toujours collées sur ce buttoir et sur la porte pour la bloquer dans cette position extrême. La mesure de pression pariétale s'effectue aux mêmes emplacements que précédemment : C1, C7, C10 et C12 le long du tube à choc, et C_{bottom} , C_{side} , C_{top} et C_{door} sur la maquette, le détail de leur position est donné dans le tableau 2.2. Le système de visualisation utilisé est toujours composé du montage stioscopique couplé à la caméra ultra rapide PHOTRON SA 1. Le positionnement initial de la porte est maîtrisé avec une cale métallique qui est placée entre la porte et l'extrémité de la maquette. En modifiant la taille de cette cale nous pouvons incliner précisément la porte. Ainsi nous avons réalisé 18 expériences en incrémentant la position angulaire initiale de la porte de 5° en 5° pour couvrir toute la plage de 0° à 90° . Pour

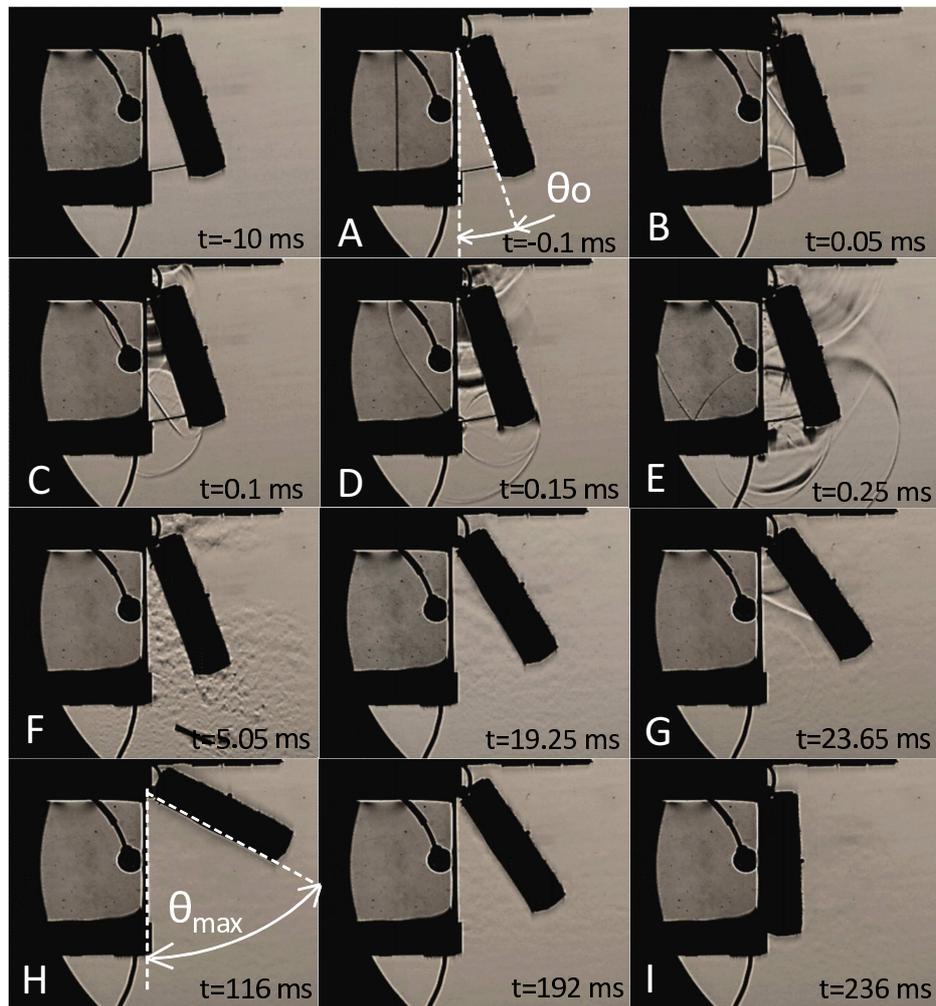


FIGURE 4.6 – Séquence de clichés stroboscopiques de l'évolution de la porte en aluminium pré-positionnée avec une ouverture initiale de 20° , sous l'effet du passage d'une onde de choc plane ($M_{i,s}=1.1$) ; l'onde incidente se propage vers la droite (T80#637).

chacune des configurations nous avons enregistré l'évolution de la pression aux huit positions pré-citées et filmé l'évolution de la porte.

Résultats et discussions

La figure 4.6 présente un exemple de résultats obtenus avec cette configuration expérimentale. L'origine des temps correspond à l'impact de l'onde de choc incidente avec la porte. Sur cette série de clichés la porte a été ini-

tialement positionnée à 20° . Sur l'image A, à $t=-0.1$ ms, on voit clairement l'onde choc incidente, parfaitement plane qui se présente à l'extrémité de la maquette. 150 microsecondes plus tard, sur l'image B à $t=0.05$ ms, on distingue la réflexion de ce choc sur la porte inclinée. Le choc réfléchi retourne en direction du tube mais sa direction de propagation n'est plus parallèle à l'axe du tube. Dans le même temps la porte amorce son mouvement de rotation, et accélère. Sur les clichés C, D et E, respectivement à $t=0.1$, 0.15 et 0.2 ms, on peut suivre les multiples réflexions de l'onde de choc incidente sur la porte et sur les parois de la maquette. On y distingue aussi les diffractions sur l'extrémité basse de la maquette et sur les bords de la porte. L'ouverture de la porte libère la cale métallique qui est éjectée (image F à $t=5.05$ ms). A l'instant $t=23.65$ ms (image G) une seconde onde de choc se présente à la sortie de la maquette. La justification de l'existence de cette seconde onde de choc a été détaillée dans le chapitre sur les écoulements en tube à choc ouvert. La porte poursuit son ouverture mais ralentie. C'est 116 millisecondes après l'impact de l'onde de choc incidente (image H) que la porte atteint la position extrême θ_{max} . Les effets du fluide n'ont pas été suffisant pour ouvrir la porte jusqu'à 90° . Ensuite la porte retombe et revient fermer l'extrémité de la maquette à $t=236$ ms, sur le cliché I. Quelque soit l'angle initial de la porte, l'évolution de la porte répond aux trois phases décrites : une phase d'accélération, une autre de décélération, puis enfin le retour jusqu'à la position fermée. Ces trois phases sont plus ou moins importantes selon la configuration de départ.

Pour chacune des configurations nous avons reconstruit et analysé l'évolution angulaire de la porte en fonction du temps. Il ressort de cette analyse trois familles de comportement dynamique.

La figure 4.7 présente trois exemples pour illustrer chacun de ces comportements caractéristiques. Tout d'abord lorsque la porte est initialement positionnée avec un angle inférieur à 10° , son ouverture est brutale et la porte arrive à atteindre la position extrême à 90° . C'est le cas de la porte pré-positionnée à 5° (tracé vert de la figure 4.7). Ensuite, lorsque la porte est initialement positionnée avec un angle compris entre 10° et 45° , la porte n'arrive plus à atteindre la position finale de 90° . Les trois phases : d'accélération, de décélération et de fermeture, sont bien visibles. Sur la figure 4.7 ce comportement est illustré par le tracé noir, extrait de l'expérience avec la porte pré-positionnée à 45° . Enfin, le tracé rouge sert d'exemple au troisième comportement, il est construit à partir des relevés expérimentaux de l'expérience avec la porte initialement placée à 85° . Lorsque la porte est pré-positionnée avec un angle compris entre 50° et 90° , les phases d'accélération et de décélération ne sont plus visibles. Lors de ces expériences la cale métallique est éjectée et la porte revient fermer l'extrémité du tube.

La surpression due à l'impact de l'onde de choc sur la face interne de la porte est responsable du déséquilibre qui accélère la porte. Lors de l'étude

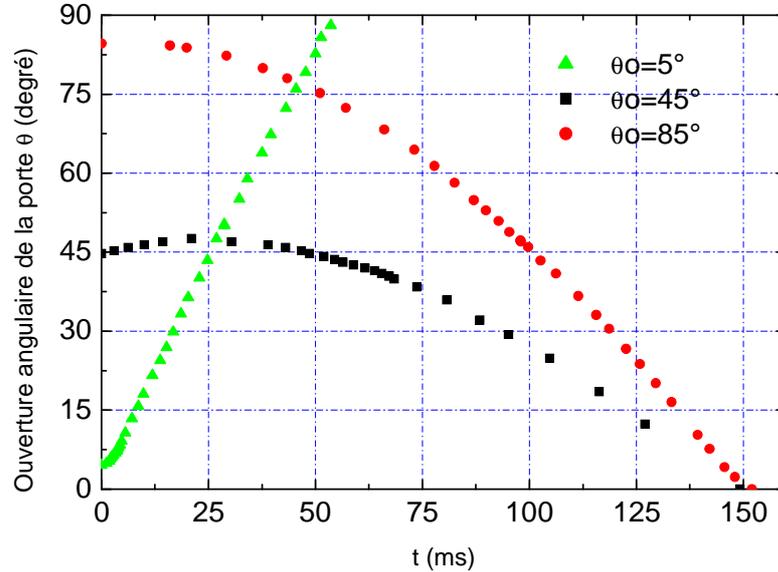


FIGURE 4.7 – Comparaison de l'évolution angulaire de la porte en aluminium sous l'effet d'une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon trois ouvertures initiales de la porte $\theta_0=5^\circ$, 45° et 85° .

du cas de référence, nous avons mis en évidence une relation entre l'intégrale du moment généré par les efforts de pression et la vitesse de rotation de la porte, l'équation 4.9. Cette relation n'est pas applicable pour cette étude. En effet, dans ce cas la position initiale de la porte est éloignée de la position fermée (0°). Dans l'application du principe fondamental de la dynamique, l'équation 4.1, le terme qui caractérise l'effet du poids n'est plus négligeable. La résolution de ce système d'équations n'est pas possible avec les données expérimentales recueillies.

La valeur de la pression enregistrée au centre de la porte, C_{door} , ne donne pas la valeur du champ de pression réel agissant sur toute la surface porte. Ce champ de pression est complexe, il est aussi bien fonction du temps, que de l'ouverture de la porte, mais aussi de la position du point de la face de la porte que l'on considère. Cependant, la pression enregistrée au centre la porte nous donne une information sur l'intensité de ce champ de pression et sur son évolution dans le temps. Nous avons représenté sur la figure 4.8 l'évolution de cette pression pour les trois configurations illustrant les trois comportements caractéristiques (5° , 45° et 85°). Sur chacun de ces signaux, on distingue dès le passage de l'onde de choc un pic de surpression nettement

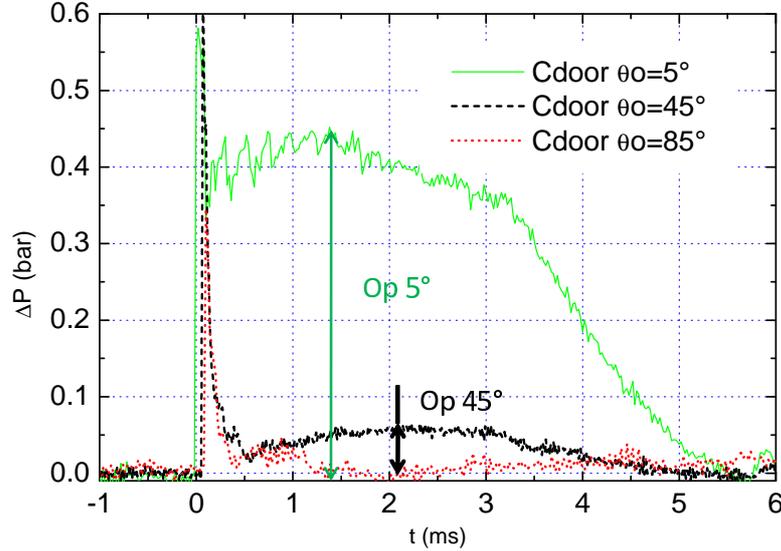


FIGURE 4.8 – Comparaison de l'évolution de la surpression enregistrée au centre de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon trois positions initiales caractéristiques $\theta_0=5^\circ$, 45° et 85° .

plus élevé que la pression enregistrée en suite. Ce pic de surpression résulte à la fois l'élévation de pression engendrée par la réflexion du choc incident sur la porte mais aussi du défaut des capteurs expliqué plus tôt. Quelque soit l'ouverture initiale de la porte ce pic ne dure que quelques micro-secondes et par conséquent n'aura quasiment pas d'influence sur la dynamique de la porte, très rapidement la pression se stabilise à une valeur que nous avons identifié par Op . Cette valeur est celle que nous avons retenue pour la suite de notre analyse. L'effet de la surpression Op cesse lorsque les ondes détentes engendrées par la rupture du diaphragme atteignent la sortie de la maquette. Or l'instant de sortie de ces ondes ne dépend en aucun cas de la position initiale de la porte. Ainsi on peut déjà vérifier sur ces courbes que lorsque la valeur de la surpression Op est significative, la durée de son action sur la porte est sensiblement toujours la même.

Lorsque l'ouverture initiale de la porte est supérieure à 50° , comme sur le tracé rouge, le capteur ne détecte qu'une impulsion de pression. Le choc se propageant dans un espace suffisamment grand il se comporte comme une onde de souffle. La différence notable entre chacune des configurations est la valeur de la surpression Op obtenue. L'écart obtenu entre les configura-

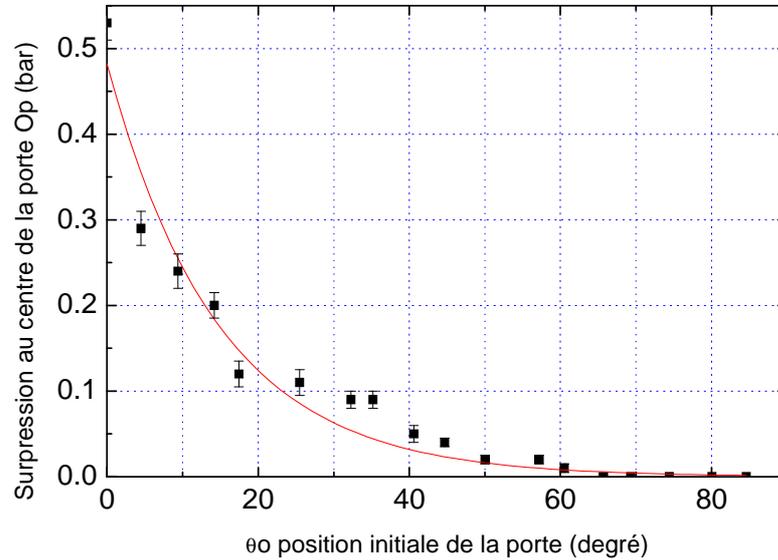


FIGURE 4.9 – Surpressions enregistrées au centre de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon sa position initiale θ_0 .

tions initiales à 5° et 45° est notable. Il est directement lié à la direction de propagation de la réflexion de l'onde de choc incidente, comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 3, où nous étudions l'écoulement en tube à choc ouvert. Lors cette réflexion une partie de l'onde de choc réfléchie est expulsée à l'extérieur de la maquette. Cette partie est d'autant plus grande que la porte est ouverte. La pression maintenue au niveau de la maquette sera d'autant plus élevée que la partie de l'onde de choc incidente qui retourne dans la veine d'essai de la maquette est grande. La figure 4.9 détaille le niveau de surpression Op obtenu pour chacun des angles de pré-ouverture. La décroissance de la surpression semble avoir une allure hyperbolique. La valeur maximale de cette surpression est bien évidemment obtenue lorsque la porte est initialement fermée (0°). Dans cette configuration nous retrouvons la valeur de la surpression obtenue derrière la réflexion de l'onde de choc incidente ($M_{is}=1.1$) dans un tube à choc fermé : 0.54 bar. Il est intéressant de noter que lorsque la porte est initialement ouverte de 25° le niveau de la surpression a déjà chuté de plus de 80%, 0.1 bar. dans ce cas l'action de la pression sur la porte n'est plus très intense. De plus si on considère l'effet de la pesanteur, sur notre porte, un moment résistant qu'elle crée, s'oppose

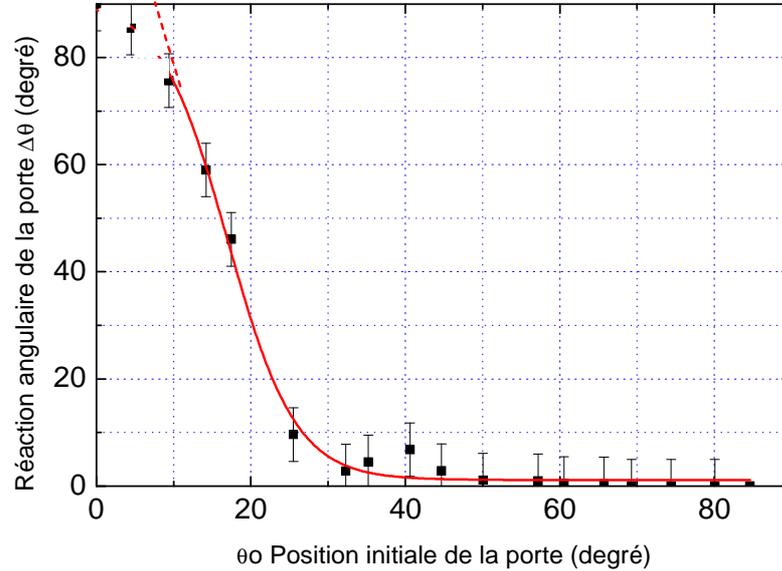


FIGURE 4.10 – Réaction angulaire de la porte en aluminium C_{door} lors de son interaction avec une onde de choc ($M_{is}=1.1$) selon sa position initiale θ_0 .

à son ouverture. Il est fonction des dimensions : L Longueur, l largeur, h hauteur, de la porte et de sa masse volumique : ρ , mais aussi de l'angle d'ouverture de la porte : θ . On peut l'exprimer la norme du moment généré par le poids sous la forme :

$$\|\overrightarrow{Mtg}\| = L * l * h * \rho * g * L/2 * \sin\theta \quad (4.10)$$

Lorsque θ croît le moment résistant augmente.

La figure 4.10 intègre à la fois l'action de la baisse d'intensité de la pression appliquée sur la porte, mais aussi l'augmentation du moment résistant à mesure que l'angle initial de la porte augmente. Nous avons tracé sur cette figure la réaction angulaire de la porte pour chacune des configurations. Nous entendons par réaction angulaire l'accroissement maximal d'ouverture que la porte a subie ($\Delta\theta=\theta_{max}-\theta_0$). L'examen de cette figure nous permet d'identifier un seuil de réaction de la porte au-delà duquel l'onde de choc sortant de l'installation ne semble plus avoir d'influence. En effet, lorsque la porte est positionnée avec un angle initial de 25° , elle ne s'ouvre que d'une dizaine de degrés avant de se refermer. L'angle initial augmentant, la réaction devient quasi-nulle. La singularité de cette valeur angulaire est bien sûr liée aux pa-

ramètres de notre expérience : la masse de la porte et l'intensité de l'onde de choc incidente. Mais le fait que la réponse se fasse aussi distinctement autour d'une valeur critique est le résultat à retenir.

Dans cette série de 18 expériences nous avons fait interagir une porte entrouverte avec une onde de choc incidente ayant un nombre de Mach $M_{IS}=1.1$. En incrémentant l'ouverture initiale de la porte de 5° en 5° , nous avons étudié son évolution angulaire et la variation de la pression à sa périphérie. Cette analyse a permis d'identifier notamment des comportements différents dans l'interaction entre le fluide et le solide en mouvement [6] [7]. Cependant le résultat à retenir est que la réaction dynamique de la porte sous l'effet d'un choc n'est significative que jusqu'à une valeur critique de pré-ouverture : 25° dans notre configuration expérimentale. Cette évolution à seuil est singulière et permet d'étoffer l'analyse globale liée à la phase d'ouverture d'une porte sous l'effet d'une onde de choc. Elle apporte un élément de compréhension aux effets des multiples impacts des ondes de choc produites par le tube à choc lors d'un cycle d'ouverture de 0° à 90° .

4.2.2 Effet du nombre de Mach

La poursuite de nos investigations nous conduit à identifier maintenant quelle est l'influence de l'intensité de l'onde de choc incidente sur l'ouverture de la porte. Il est évident que si nous augmentons le nombre de Mach de l'onde de choc incidente, M_{is} , la surpression qui est générée après son passage s'accroît. La surpression qui agit sur la porte étant plus élevée, elle augmente forcément les efforts sur celle-ci et donc lui impose une accélération plus intense. La durée d'ouverture de la porte va diminuer. La trivialité de cette analyse n'est bien sûr pas le sujet de ce paragraphe. Dans la configuration expérimentale que nous utilisons, le couplage entre les problèmes dynamiques fluide et solide est très fort. Ce que nous voulons surtout observer, c'est dans quelle mesure cette interaction fluide-structure va être influencée par l'élévation de l'intensité de l'onde de choc incidente. En quelle proportion, la réponse solide de l'expérience va-t-elle être modifiée par une évolution de sa cause fluide. Pour ce faire, nous avons expérimentalement fait varier le nombre de Mach de l'onde de choc incidente. En modifiant la structure du diaphragme entre les chambres haute pression et basse pression, c'est à dire en modifiant le nombre de couche de papier aluminium et/ou l'épaisseur du papier aluminium utilisé, nous avons obtenu quatre ondes de choc incidentes d'intensités différentes. Les quatre nombres de Mach correspondant sont $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17$ et 1.25 . Les ondes de choc étant expulsées à l'extérieur du tube à choc et se propageant dans le laboratoire, nous avons dû limiter le nombre de Mach de l'onde de choc incidente à $M_{is}=1.25$. Pour chacune de ces expériences le système de diagnostic est toujours le même. Nous avons relevé la pression aux huit stations de mesures : C12, C10, C7, C1, C_{bottom} , C_{side} , C_{top} et C_{door} . Le diagnostic optique est toujours constitué du montage strioscopique et de la caméra ultra rapide PHOTRON SA-1 comme décrit précédemment.

Résultats

La figure 4.11 présente l'évolution angulaire de la porte sous l'action de ces quatre ondes de choc. Ces courbes ont été construites à partir des relevés expérimentaux : pour chacune des expériences, nous avons relevé sur le film la position de la porte à chaque pas de temps. L'origine des temps correspond à l'instant où l'onde de choc incidente impacte la porte fermée. Ces quatre courbes ont la même allure : on y distingue une phase d'accélération de quelques microsecondes, un arc de parabole, puis une phase où la vitesse angulaire semble restée constante, une portion linéaire. Seul le tracé caractérisant l'expérience avec un nombre de Mach de l'onde de choc incidente $M_{is}=1.08$ se distingue légèrement en particulier en fin de course : le tracé se détache de la trajectoire linéaire. Cette déviation traduit une perte de vitesse de la porte. Ici les effets de la pesanteur ne sont pas négligeables par rapport aux effets qui ont initiés le mouvement et ralentissent la porte avant qu'elle

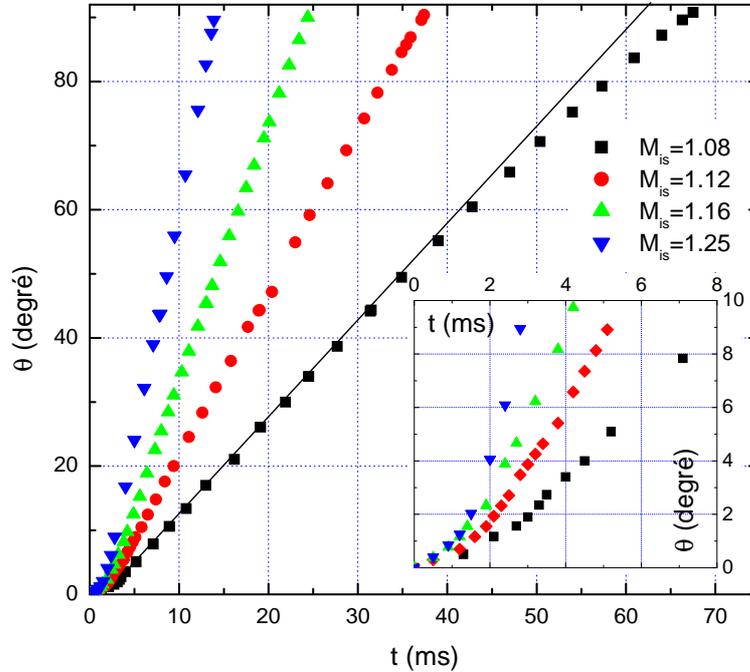


FIGURE 4.11 – Reconstruction de l'évolution angulaire de la porte en aluminium lors de son ouverture sous l'action d'une onde choc avec les nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).

n'atteigne la butée de fin de course à 90° . Pour approfondir notre analyse, nous avons prolongé la partie linéaire (où la vitesse angulaire de la porte est quasi constante) sur le tracé noir. Ainsi nous avons une idée de l'évolution de la porte si son poids reste négligeable par rapport aux efforts générés par le fluide.

Comme détaillé dans la première partie de ce chapitre, le mouvement de la porte est causé par la surpression due à la réflexion de l'onde de choc incidente sur celle-ci. Le niveau maximal de pression atteint dans cette configuration correspond au niveau de pression P5 obtenu dans un tube à choc fermé derrière la réflexion de l'onde de choc incidente sur le fond de tube. Le tableau 4.1 détaille les valeurs de pressions théoriques obtenues derrière le choc réfléchi au niveau de la porte.

Comme on peut le voir sur la figure 4.12, ces valeurs correspondent aux niveaux de pression expérimentaux enregistrés au centre de la porte, C_{door} .

M_{is}	1.08	1.12	1.17	1.25
P1 (bar)	1.22	1.3	1.43	1.66
P5 (bar)	1.5	1.67	2.01	2.65

TABLE 4.1 – Pressions absolues théoriques calculées correspondant à la pression derrière le passage de l'onde choc incidente P1 et l'onde de choc réfléchi en bout de tube fermé P5 pour des ondes de choc avec des nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$.

Sur ces quatre signaux à l'instant $t=0$ ms, la pression s'élève instantanément au niveau de la pression théorique P5 indiquée précédemment. Il s'en suit

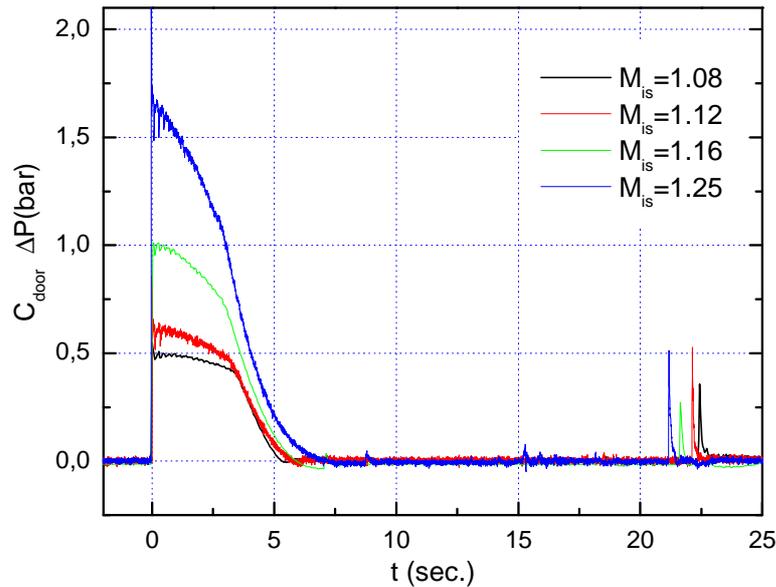


FIGURE 4.12 – Évolution de la surpression enregistrée au centre de la porte en aluminium, C_{door} , lors de ses ouvertures sous l'action d'une onde choc avec les nombres de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).

une détente quasi immédiate, mais modérée. Puis, environs 3 ms plus tard,

les détentes réfléchies sur le fond de la chambre haute pression atteignent la porte et ramènent la pression au niveau de la pression atmosphérique. La durée de l'action de la surpression sur la porte ne varie que très peu lorsque l'on augmente le nombre de Mach de l'onde de choc incidente. Plusieurs millisecondes plus tard, l'onde de choc réfléchie qui a entièrement traversé le tube à choc, se réfléchit sur le fond de la chambre haute pression et parcourt à nouveau le tube à choc et se représente au niveau du capteur C_{door} . L'élévation de pression derrière cette seconde onde de choc ne dure que quelques microsecondes. Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, au moment où cette onde de choc interagit avec la porte, celle-ci est déjà suffisamment ouverte pour que l'onde de choc se propage vers l'extérieur et devienne une onde de souffle. La surpression générée à cet instant sur la porte ne dure pas suffisamment longtemps pour influencer de manière significative l'ouverture de celle-ci.

Discussion

Comme on peut le voir sur le zoom de la figure 4.11, la phase d'accélération pour chacune des expériences est très brutale : la porte atteint sa vitesse maximale en ayant parcouru moins de 5° , en moins de 5 ms. C'est durant cette période que la surpression générée lors de la réflexion de l'onde de choc incidente sur la porte s'applique sur sa face intérieure. Passée cette phase d'accélération, la porte continue la majorité de sa course (environ 85°) à vitesse constante, lorsque les effets de la pesanteur sont négligeables. Très facilement, à partir des relevés expérimentaux, en mesurant la pente de chacune des parties linéaires, nous avons pu obtenir ces valeurs de vitesse angulaire. Le moment d'inertie de la porte étant le même dans toutes les expériences. L'étude de ces vitesses d'ouverture permet d'avoir une information sur l'interaction qui s'est produite entre le fluide et la structure, soit l'intégrale du moment généré par les efforts de pression pendant toute la phase où la pression est différente de la pression atmosphérique. Ainsi, la figure 4.13 présente les vitesses d'ouverture atteintes par la porte en fonction de la surpression initiale maximale appliquée sur la porte. Une première observation est que l'évolution de la vitesse atteinte par la porte n'est pas proportionnelles à la surpression maximale qui s'applique sur la porte. La droite noire indique la pente qui correspondrait à une éventuelle évolution proportionnelle de la vitesse par rapporte à la pression. De plus, l'évolution de ces vitesses n'est pas non plus tout à fait linéaire. On peut constater que lorsque le nombre de Mach de l'onde de choc incidente augmente, la vitesse angulaire obtenue s'éloigne de plus en plus de la droite caractérisant une évolution linéaire (ligne rouge). Cela traduit que pendant la première phase du mouvement, l'accélération imposée à la porte n'est pas proportionnelle à la pression générée par la réflexion de l'onde de choc incidente, P5 ; elle diminue même. En adimensionnant les signaux de pression enregistrés au centre de la porte

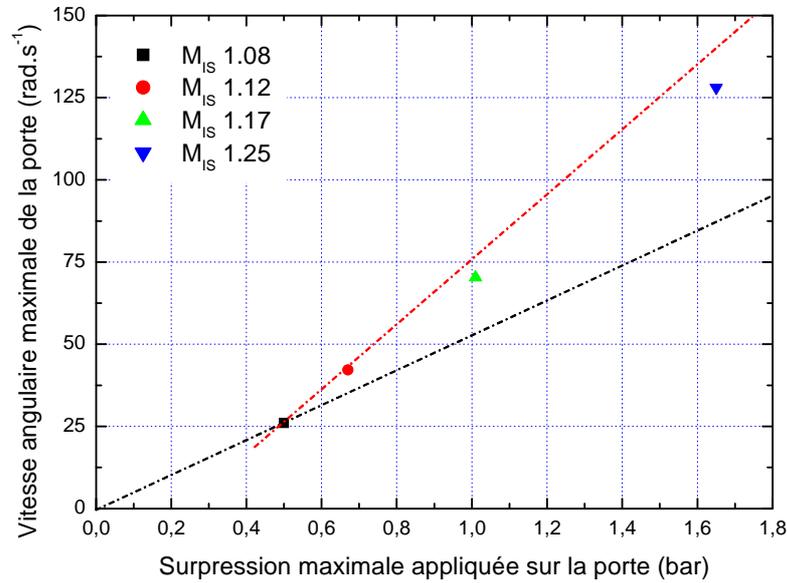


FIGURE 4.13 – Vitesse angulaire atteinte par la porte dans la phase uniforme de son déplacement, calculée à partir des relevés expérimentaux lors des ouvertures de la porte en aluminium sous l'action d'une onde choc avec le nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).

C_{door} par la pression maximale obtenue à chaque expérience, la cause de cette décroissance apparaît. Ces signaux sont représentés sur la figure 4.14. On voit clairement que lorsque le nombre de Mach de l'onde de choc incidente augmente, la détente qui suit immédiatement l'impulsion de l'onde de choc est plus intense. Cette détente est imposée par l'ouverture de la porte. Lorsque la porte s'ouvre, le volume occupé par le gaz sous pression augmente ; les caractéristiques physiques du gaz vont diminuer et notamment sa pression. C'est à cet instant que le couplage entre le fluide et le solide entre en jeu. La pression qui agit sur la porte décroît et donc un effort moindre s'applique sur celle-ci. L'accélération imposée à la porte sera plus faible, cependant elle va toujours continuer à s'ouvrir. La pression va donc continuer à chuter, diminuant encore un peu les efforts sur la porte, diminuant encore un peu son accélération et ainsi de suite jusqu'à ce que les détentes initiées par la rupture du diaphragme atteignent à leur tour la porte et ramènent la pression au niveau de la pression atmosphérique. En augmentant le nombre de Mach de l'onde de choc incidente, on augmente la pression sur la porte,

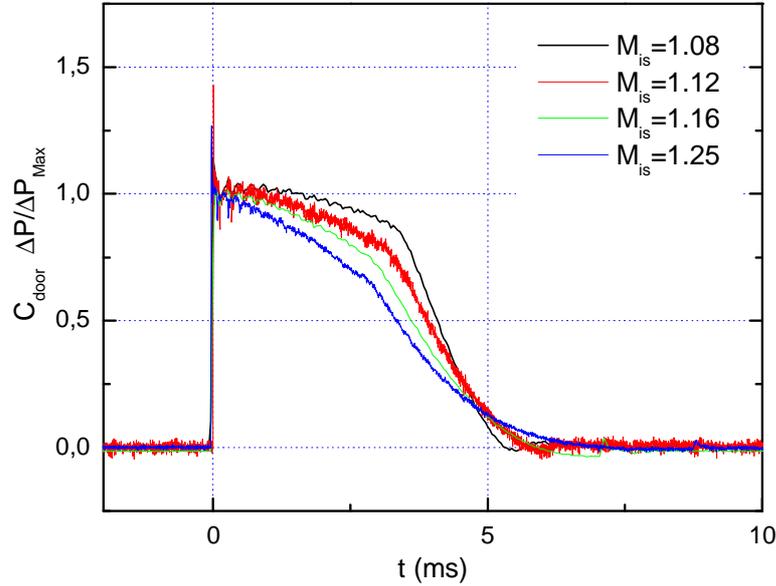


FIGURE 4.14 – Evolution de la pression adimensionnée enregistrée au centre de la porte en aluminium, C_{door} , lors de ses ouvertures sous l'action d'une onde choc avec les nombre de Mach $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$, (T80#525, 527, 528, 546).

on augmente par conséquent sa vitesse d'ouverture et donc les détentes que génère cette ouverture. L'intensification de ces détentes justifie l'affaiblissement de la vitesse d'ouverture observée lors de cette série d'expériences.

Conclusion

Dans cette série d'expériences l'interaction fluide- structure a été clairement mise en évidence en faisant varier l'intensité de l'onde choc incidente pour ouvrir la porte. En utilisant quatre nombres de Mach différents, nous avons pu observer que la réaction dynamique de la porte n'évolue pas linéairement par rapport à l'intensité de la surpression à laquelle elle est soumise. En effet, la rapidité de l'ouverture de la porte influe sur la pression qui cause son mouvement et en retour cette variation de la pression modifie la dynamique d'ouverture de la porte. Plus l'ouverture est rapide, plus la pression est atténuée et plus l'accélération imposée à la porte décroît.

4.2.3 Effet de l'inertie de la porte

Portons notre attention maintenant sur un autre facteur de l'équation du principe fondamental de la dynamique : le moment d'inertie de la porte. Il est évident, à nouveau, que si l'on augmente la moment d'inertie de la porte, celle-ci accélérera moins vite sous l'action d'un même effort. D'après l'équation du principe fondamental de la dynamique qui gère l'équilibre de ce système, l'accélération est inversement proportionnel à l'inertie de la porte. Cependant, compte tenu du couplage entre les systèmes fluide et solide, il faut s'attendre à ce que la variation du paramètre d'inertie influe sur la surpression qui agit sur la porte. La pression évoluant, c'est l'effort qui génère l'accélération de la porte et par conséquent, l'accélération elle-même, qui vont être modifiés. Notre analyse va nous conduire à déterminer dans quelle mesure cette variation du paramètre d'inertie influe sur la dynamique d'ouverture de la porte.

Dans notre expérience l'inertie de la porte est maîtrisée grâce au choix du matériau qui la constitue. Jusqu'à présent la porte utilisée était celle réalisée en aluminium. En changeant ce matériau, nous allons faire varier le moment d'inertie de la porte autour de son axe de rotation. Nous utilisons dans cette série d'expériences deux autres portes : une en acier et une autre en matériaux composites, un sandwich de fibres de carbone avec une structure de papier en nid d'abeille. Ce sont celles présentées sur la photo figure 2.11. Nous obtenons ainsi trois valeurs de moments d'inertie. Les caractéristiques de ces trois portes sont données dans le tableau 4.2.

Matériau de la porte	Composites	Aluminium	Acier
Masse (m)	62 g	376 g	932 g
Moment d'inertie (I)	$0.15 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$	$3 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

TABLE 4.2 – Masses et moments d'inertie par rapport à l'axe de l'articulation des trois portes utilisées dans cette série d'expérience.

Nous avons fait interagir ces portes avec une onde de choc de nombre de Mach $M_{is}=1.1$. Pour analyser ces expériences, le système de diagnostic utilisé est une nouvelle fois constitué d'une série de huit capteurs ENDEVCO. Quatre d'entre eux sont positionnés le long du tube à choc aux emplacements C12, C10, C7 et C1, trois autres aux abords de la sortie de tube, C_{bottom} , C_{side} et C_{top} , et enfin un au centre de la porte C_{door} . Dans le cas de la porte en composite, il était impossible compte tenu de sa structure de fixer un capteur au centre de la porte. Nous n'avons donc pas pu obtenir cette information pour cette configuration expérimentale. Pour la visualisation et l'enregistre-

ment des écoulements, nous utilisons le montage strioscopique couplé avec la caméra ultra rapide PHOTROM FASTCAM SA 1.1. Lors de chaque expérience, la porte est initialement positionnée fermée à 0° . Nous enregistrons et analysons l'intégralité de son mouvement initié par l'interaction avec l'onde de choc incidente. La porte a la possibilité de s'ouvrir jusqu'à une position entièrement ouverte à 90° où une cale d'arrêt a été fixée. Aussi bien sur la face extérieure de la porte que sur la cale d'arrêt, nous avons appliqué de la bande auto-agrippante de type VELCRO afin de bloquer la porte si elle atteint la position totalement ouverte.

Résultats

La série de clichés strioscopiques de la figure 4.15 détaille l'ouverture des trois portes au cours du temps. Le temps d'ouverture pour chacune des portes est de 9.55 ms pour la porte en fibres de carbone, 37.25 ms pour celle aluminium et de 92.85 ms pour celle en acier. A l'instant $t=0$ ms l'onde de choc incidente se réfléchit sur la porte fermée. Cette interaction déclenche l'ouverture de la porte et pour les trois configurations on distingue les écoulements turbulents qui s'échappent par cette ouverture. Logiquement la porte la plus légère s'est entièrement ouverte la première, avant même que le choc réfléchi n'interagisse avec elle. Dans les cas avec les deux portes métalliques, cette onde de choc réfléchie qui a effectuée un aller-retour dans le tube se présente à l'extrémité de la maquette et impacte la porte qui a commencé à s'ouvrir à $t=22.5$ ms. Cette interaction a lieu avec la porte en aluminium lorsque celle-ci se trouve dans une ouverture de 49.1° et dans une ouverture de 22.3° lorsque la porte utilisée est celle en acier. Dans les deux cas, cette valeur est supérieure au seuil des 20° mis en évidence dans le chapitre montrant l'influence d'une éventuelle pré-ouverture de la porte. Il est probable que si nous augmentions encore la masse de la porte, cette interaction serait plus conséquente, il en résulterait une seconde phase d'accélération lors de l'ouverture de cette porte. La figure 4.16 présente l'évolution angulaire de chaque porte sous l'action de l'onde incidente. De la même manière que dans les autres chapitres, à partir des films enregistrés par la caméra ultra-rapide, nous avons extrait pixel par pixel la position de la porte au cours de son ouverture. L'origine des temps correspond à l'instant où l'onde de choc incidente impacte la porte initialement fermée. Plus l'inertie de la porte augmente, plus le temps d'ouverture de la porte augmente. Comme dans le paragraphe précédent ces trois courbes ont la même allure : un arc de parabole qui correspond à une phase d'accélération de la porte, puis une portion linéaire indiquant que la vitesse angulaire de la porte est quasi constante. Le seul tracé qui présente une différence est celui qui est issue de l'expérience avec la porte en acier. On observe qu'en fin de déplacement la vitesse de la porte diminue, le tracé se détache de la droite bleue simulant une ouverture à vitesse constante. Cette perte de vitesse est essentiellement causée par l'augmentation du moment

résistant généré par le poids. La droite bleue tracée sur la figure 4.16 nous donne une information sur l'évolution de la trajectoire de la porte si elle ne subissait pas cette résistance qui croît à mesure qu'elle s'ouvre. Dans ces trois expériences la cause de l'ouverture est toujours la même : c'est la surpression (P5) qui est maintenue pendant quelques millisecondes après la réflexion de l'onde incidente sur la porte. La prise de mesure de pression au centre de la porte en fibres de carbone étant impossible, nous reportons notre analyse sur l'évolution des pressions pariétales en périphérie de la sortie de la maquette.

Ainsi sur la figure 4.17 nous avons représenté l'évolution de la surpression sur les faces supérieure et inférieure. Cette pression a été enregistrée par les capteurs C_{top} et C_{bottom} positionnés 10 mm avant l'extrémité de la maquette. L'impact de l'onde de choc incidente avec la porte fermée s'effectue à l'instant $t=0$ ms. Sur chacune des courbes on peut observer le passage de l'onde choc incidente suivi quasi instantanément du passage de l'onde de choc réfléchie aux alentours de $t=0$ ms. Juste après le choc, une première relaxation de la pression est engendrée par le mouvement d'ouverture de la porte, puis on en distingue une seconde, due à l'arrivée des ondes de détente provoquées par la rupture initiale du diaphragme. Pour chaque modèle de porte, les deux séries de courbes sont semblables, cependant une étude un peu plus approfondie nous permet d'observer des différences dues à la dissymétrie du mécanisme d'ouverture de la porte. En effet, la charnière assurant le degré en liberté de rotation de la porte est fixée à la face supérieure. Lorsque la porte s'ouvre, l'espace qui est créé par le déplacement de la porte est bien plus grand dans la partie inférieure. Ainsi l'action des détentes générées par l'ouverture de la porte est plus intense dans la partie inférieure que dans la partie supérieure. On peut le vérifier sur les mesures au niveau du capteur C_{bottom} , où l'action de la première relaxation fait descendre la pression un peu plus bas que sur les mesures du capteur C_{top} . Ceci s'accroît en fonction de la rapidité d'ouverture, plus la porte s'ouvre vite plus la différence entre les signaux de C_{top} et C_{bottom} est importante. Dans le cas de la porte en acier, l'ouverture est lente pour que la différence entre les parties inférieure et supérieure de la veine d'essai, C_{bottom} et C_{top} , soit quasi nulle. Dans le cas de la porte en fibres de carbone, malgré les différences présentées, nous pouvons considérer que la pression que l'on aurait enregistrée en son centre aurait eu le même ordre de grandeur et la même allure que les signaux présentés sur la figure 4.17. C'est à dire, une élévation instantanée de la pression suivie deux détentes intenses qui ramène la pression au niveau de la pression atmosphérique en environ 3 ms. Nous avons donc choisi de mener notre étude comparative sur le signal de pression enregistré dans la partie supérieure de la veine d'essai, C_{top} . La figure 4.18 est la superposition des trois signaux enregistrés lors des expériences avec chacune des portes. Il est intéressant de noter que dans le cas où la porte utilisée est celle en matériaux composites, l'action des détentes générées par l'ouverture de la porte est très intense. Elles font

chuter la pression au niveau de la pression atmosphérique en moins de 4 ms. Si bien que lorsque les détentes issues de la rupture initiale du diaphragme atteignent l'extrémité de la maquette, celles-ci font chuter la pression sous le niveau de la pression atmosphérique. Dans les deux autres expériences, l'action des détentes générée par l'ouverture de la porte est moins marqué. Il en résulte que l'action de la pression sur la porte dure plus longtemps et est plus intense. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la porte est lourde.

Discussion

Comme dans l'étude précédente où nous concentrons notre attention sur l'effet de l'intensité de l'onde de choc incidente, nous observons que l'accélération imposée à la porte par les efforts de pression est très violente. Sur le zoom de la figure 4.16 on peut distinguer que cette période dure moins de 5 ms, et que pendant cette phase les portes ont parcouru un angle de près de 5° . Ces 5 ms correspondent au temps qu'il a fallu aux ondes de détente initiées par la rupture du diaphragme, qui se sont réfléchies sur le fond de la chambre haute pression, pour arriver à l'extrémité de la maquette. Après leur passage, la pression est revenue au niveau de la pression atmosphérique. Plus aucun effort n'est exercé sur la porte : la porte cesse d'accélérer. Dans le cas de la porte en composite cette accélération semble cesser au bout de seulement 3 ms ce qui au vu des signaux de pression de la figure 4.18 est cohérent, puisque au bout de 3 ms la pression a déjà perdu plus de 80 % de sa valeur initiale. A nouveau, à partir des relevés expérimentaux nous avons calculé la vitesse d'ouverture de la porte lorsque celle-ci est constante, une fois la phase d'accélération terminée. Les vitesses établies sont présentées dans le tableau 4.3. Dans ce même tableau est présenté aussi le résultat du produit de la vitesse établie avec l'inertie : il correspond à l'intégrale du moment du aux efforts de pression pendant la phase d'accélération 4.9

Matériau de la porte	Composite	Aluminium	Acier
Vitesse angulaire $\dot{\theta}$ (rad.s ⁻¹)	180.8	44.4	20
Vitesse angulaire \times inertie $\dot{\theta} \times I$ (kg.m ² .rad.s ⁻¹)	0.027	0.044	0.06

TABLE 4.3 – Valeurs de la vitesse angulaire maximale et de l'intégrale du moment résultant des efforts de pression calculées à partir des relevés expérimentaux lors des ouvertures des portes en composites, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).

Sur la figure 4.19, nous présentons les valeurs de ces vitesses en fonction de l'inverse de l'inertie respective de chaque porte. Conformément à nos attentes, l'évolution de ces vitesses n'est pas proportionnelle à l'inverse de l'inertie (droite noire) et elle n'est pas non plus linéaire (droite violette). Leur évolution traduit un fort couplage entre l'évolution de la porte dans l'espace et les causes de ce mouvement. En interprétant ce graphique, nous constatons évidemment qu'au fur et à mesure que nous augmentons l'inertie de la porte, sa vitesse d'ouverture décroît. Cependant, cette vitesse a moins diminuée que ce dont nous avons accru l'inertie. Par exemple, si nous nous focalisons sur les cas avec la porte en carbone et celle aluminium, le rapport de leurs inerties est de 6.6, alors que le rapport de la vitesse que ces deux portes atteignent est de 4.05. De même entre la porte en aluminium et celle en acier, nous calculons un rapport entre les inerties de 3 alors qu'il n'est que 2.2 lorsque l'on considère leurs vitesses d'ouverture. Ce résultat est en accord avec les valeurs de l'intégrale de pression du tableau 4.3 qui augmentent avec la masse de la porte. Le produit entre l'inertie et de la vitesse établie correspond à l'intégrale dans le temps du moment créé par la pression sur la porte pendant la phase d'accélération. La justification de ces écarts s'explique aisément en étudiant l'allure des courbes de pression relevées en C_{bottom} sur face inférieure. Lorsque l'inertie de la porte est plutôt faible, dans le cas de la porte en fibres de carbone, elle s'ouvre plus vite et les détentes engendrées par cette ouverture sont très intenses. La pression qui est la cause du mouvement est rapidement atténuée. Il en résulte que la porte accélère moins longtemps et sous l'effet d'une pression qui s'atténue très vite. Inversement, lorsque l'inertie de la porte est élevée (porte en acier), l'ouverture de la porte est plus lente, et par conséquent les détentes engendrées sont moins intenses. La pression agissant sur la porte décroît plus lentement et dure jusqu'à ce que les détentes causées par la rupture du diaphragme atteignent l'extrémité de la maquette. La porte est soumise à une pression plus intense et pendant un intervalle de temps plus long. La porte va donc accélérer plus longtemps et sous l'action d'un moment plus intense. Il est donc logique qu'à la fin de sa phase d'accélération, la porte aie atteint une vitesse qui par rapport à l'augmentation de sa masse soit plus élevée.

Conclusion

Ce chapitre avait pour but de déterminer si la variation des grandeurs massiques de la porte, masse et moment d'inertie, avait une influence sur l'interaction fluide-structure mise en jeu dans cette expérience. Nous avons fait varier ces paramètres en modifiant le matériau qui constitue la porte. Nous avons utilisé trois portes différentes, une en fibre carbone avec un structure en nid d'abeille, une autre en aluminium et une troisième en acier inoxydable. Il résulte de cette étude que l'évolution temporelle de la pression qui agit sur la porte est très nettement influencée par la modification de la masse

et du moment d'inertie de la porte. L'augmentation du moment d'inertie de la porte tend à ralentir son ouverture qui en retour limite la relaxation de la pression qui provoque cette même ouverture. Ainsi plus la porte est lourde plus la pression agit sur elle et donc plus sa vitesse augmente. L'évolution dynamique de la porte ne décroît pas proportionnellement à son inertie. Plus on élève son inertie, plus la porte s'ouvre lentement. Mais en rapport, la diminution de vitesse d'ouverture de la porte est nettement moindre que l'augmentation de sa masse et de son inertie.

4.3 Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre comment l'interaction entre une structure mobile autour d'un axe et une onde de choc se développe. Aux travers de plusieurs paramétrages de notre expérience, nous avons constaté des singularités intéressantes dans le comportement d'ouverture de la porte.

En modifiant son inertie, nous avons pu observer que l'ouverture est favorisée à mesure que l'inertie augmente. En effet, plus celle-ci est élevée plus la pression créée par la réflexion de l'onde incidente a une influence sur la porte. Il en résulte une non-linéarité significative entre les paramètres dynamiques d'ouverture de la porte (accélération angulaire, vitesse angulaire et durée d'ouverture) et son inertie.

En modifiant le nombre de Mach de l'onde de choc incidente, c'est une non-linéarité entre les paramètres dynamiques d'ouverture de la porte (accélération angulaire, vitesse angulaire et durée d'ouverture) et le niveau de la pression qui s'exerce sur la porte que nous avons observé. En élevant l'intensité de l'onde de choc, cette pression devient plus élevée, et impose une ouverture plus rapide de la porte. En retour la pression se relaxe plus rapidement et agit moins longtemps. L'ouverture est moins efficace.

Enfin, en faisant varier la position initiale d'ouverture de la porte en aluminium de 0° à 90° , en l'incrémentant de 5° entre chaque essai et en lui imposant l'impact d'une onde de choc ($M_{is}=1.1$), nous avons détecté un point de seuil dans sa dynamique d'ouverture. Lorsque la pré-ouverture est supérieure à 25° , d'une part, dans cette position le moment dû au poids de la porte n'est plus négligeable et va freiner son ouverture. Et d'autre part, l'espace laissé libre entre la porte et l'extrémité du tube à choc atténue la pression qui agit sur la porte. L'effet combiné de deux événements physiques réduit le déséquilibre dynamique de la porte ; elle ne va quasiment plus accélérer et donc ne plus s'ouvrir.

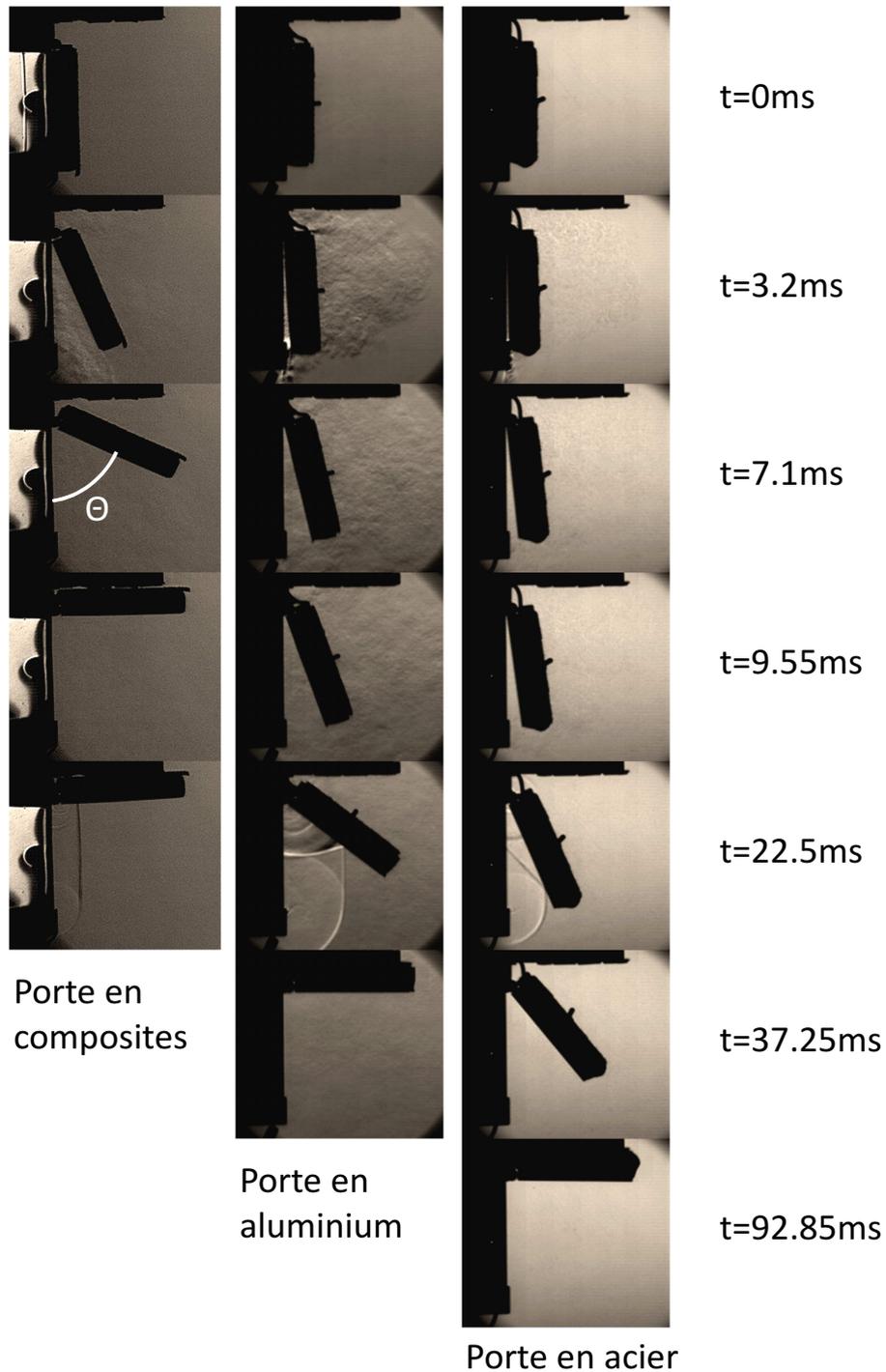


FIGURE 4.15 – Clichés strioscopiques montrant l'ouverture des portes en composites, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde de choc $M_{is}=1.1$ (T80#527, 550, 563).

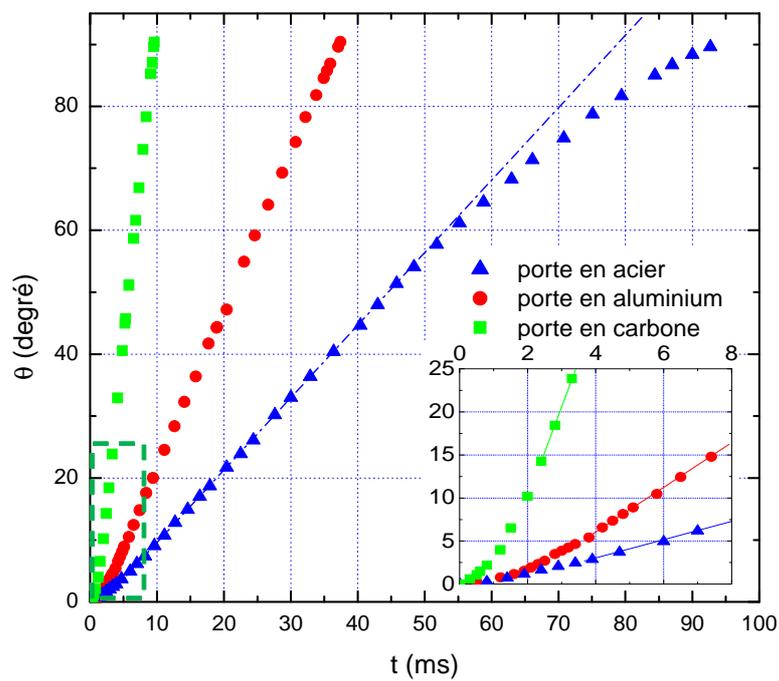


FIGURE 4.16 – Reconstruction de l'évolution angulaire des portes en composites, en aluminium et en acier lors de leur ouverture respective sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80#527, 550, 563).

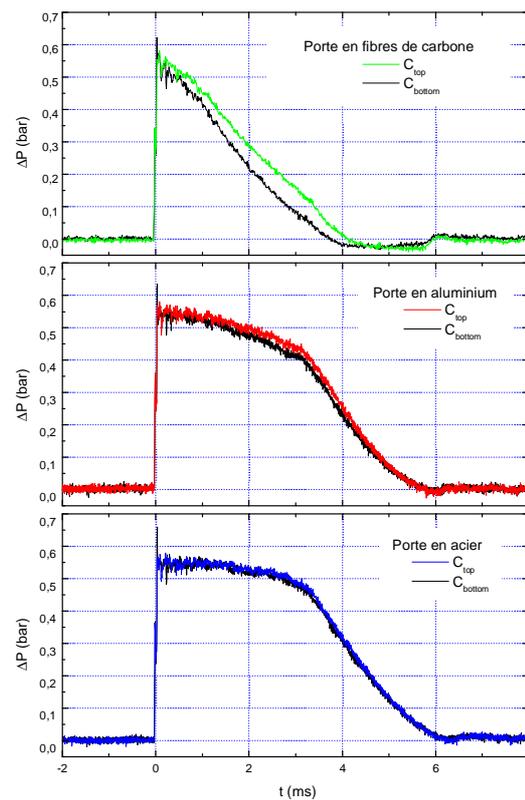


FIGURE 4.17 – Évolution de la surpression enregistrée sur les faces inférieure, C_{bottom} , et supérieure, C_{top} , à 10 mm de l'extrémité de la maquette, lors de l'ouverture des portes en fibres de carbone, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).

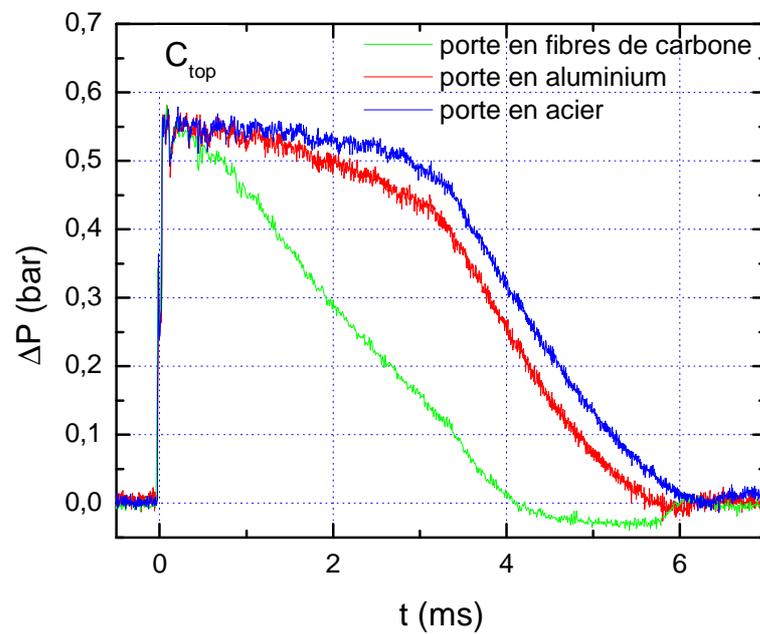


FIGURE 4.18 – Évolution de la surpression enregistrée sur la face supérieure à 10 mm de l'extrémité de la maquette, lors de l'ouverture des portes en fibres de carbone, en aluminium et en acier sous l'action d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{is}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).

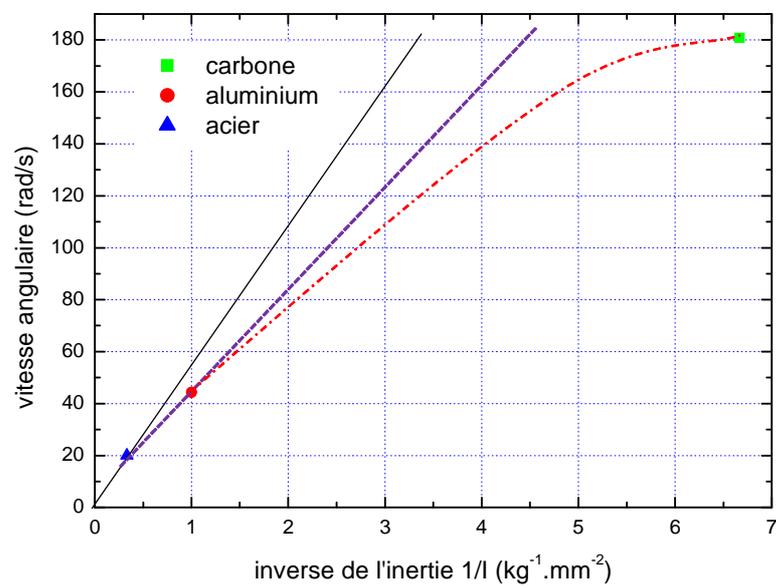


FIGURE 4.19 – Vitesses angulaires maximales atteintes par chaque porte, présentées en fonction de l'inverse leur inertie respective. Les portes en composites, en aluminium et en acier sont ouvertes par l'action de l'impact d'une onde choc avec un nombre de Mach $M_{i_s}=1.1$ (T80# 527, 550, 563).

Chapitre 5

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire de thèse présente l'analyse expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe. Il détaille comment un solide peut être animé d'un mouvement de rotation sous l'action de l'impact d'une onde de choc.

Nous avons tout d'abord étudié l'évolution de l'écoulement interne d'un tube à choc laissé ouvert pendant une période équivalente à celle de l'ouverture de la porte. Nous avons ainsi pu observer comment des ondes de choc se reforment dans le tube à choc alors que l'onde de choc incidente initiale en est déjà sortie. La poursuite de l'étude se focalise sur notre cas de référence. A savoir l'ouverture d'une porte en aluminium sous l'impact d'une onde de choc avec un nombre $M_{is}=1.1$.

Par la suite, pour comprendre l'interaction entre le fluide et la structure en mouvement, nous avons fait varier plusieurs paramètres de l'expérience et avons identifié le rôle de chacun sur la dynamique d'ouverture. En premier lieu, nous avons modifié la pré-ouverture initiale de la porte et nous avons mis en évidence, de cette série d'expériences, un comportement singulier. En effet l'ouverture de la porte n'est vraiment efficace que si la porte est initialement pré-positionnée avec une pré-ouverture inférieure à 25° ; au-delà de ce seuil, la porte ne réagit quasiment plus au passage de l'onde de choc. Nous nous sommes à nouveau intéressé à une ouverture totale de la porte, de 0° à 90° . Nous avons modifié le nombre de Mach de l'onde de choc incidente, quatre valeurs ont été utilisées, $M_{is}=1.08, 1.12, 1.17, 1.25$. Nous avons constaté que l'ouverture de la porte est influencée par la modification de ce paramètre ; plus l'intensité de l'onde choc est élevée, plus la porte va s'ouvrir rapidement. En retour, cette ouverture plus brutale va atténuer plus significativement la pression qui agit sur la porte et donc l'empêcher de s'ouvrir aussi rapidement qu'elle aurait dû le faire. Le même type d'observation a été constaté lorsque nous avons fait varier l'inertie de la porte. En effet, en

utilisant une porte en acier, une en aluminium et une troisième composée d'un sandwich de fibres de carbone avec une structure papier en nid d'abeille, nous avons fait varier la masse et donc l'inertie mise en mouvement. Plus la porte est légère, plus elle s'ouvre vite. A nouveau, si l'ouverture est plus violente, la pression qui agit sur la porte va se relaxer plus rapidement et donc ne pas lui permettre de s'ouvrir aussi rapidement que ce qu'elle aurait due.

Ce travail est basé sur la réalisation de 54 conditions expérimentales. La plupart d'entre elles ont été doublées, voire triplées. Chaque expérience équivaut à l'enregistrement de huit signaux de pression et de plusieurs milliers de clichés strioscopiques. La totalité de ce travail ne peut apparaître dans ce document, ni même en annexe, mais nous avons fait en sorte d'y faire apparaître un condensé des expériences les plus caractéristiques et des résultats les plus intéressants.

Bien qu'à l'origine, imaginée pour être un simple cas test, nous avons développé cette expérience en multipliant les études paramétriques. Ainsi nous avons pu comprendre la physique qui commande l'ouverture de cette porte. Ces études paramétriques représentent une base données conséquente utile à la validation des codes de calcul numériques. En annexe se trouve une de ces comparaisons extraite de la thèse de Laurent Monasse, étudiant chercheur au LIMSI. Il y éprouve son modèle numérique avec le cas où la porte en aluminium s'ouvre de 0° à 90° sous l'action de l'impact d'une onde de choc incidente avec un nombre de Mach $M_{ts}=1.1$. Son code de calcul traite les interactions fluide-structure en deux dimensions. Les résultats obtenus sont très proches des résultats expérimentaux.

Pour parachever cette étude, nous envisageons de faire évoluer la configuration expérimentale faisant encore varier d'autres paramètres. Dans la présente étude, pour analyser l'influence d'une pré-ouverture de la porte sur sa dynamique, nous avons utilisé le tube à choc en position horizontale et maintenu la porte en position ouverte avec des cales. En faisant cela nous avons certes modifié la pré-ouverture de la porte mais aussi le moment résistant que crée la gravité, qui est fonction de $\sin\theta(t)$, comme le précise l'équation 4.1. En utilisant la possibilité d'inclinaison de T80, nous pourrions modifier uniquement le paramètre de pré-ouverture et s'affranchir du moment créé par le poids de la porte en position initiale. Si nous modifions l'angle d'inclinaison du tube à choc afin d'obtenir la pré-ouverture θ_0 désirée, la porte s'aligne d'elle même par gravité à la verticale. Ainsi, les effets du poids au départ de l'expérience seraient nuls quelque soit l'angle θ_0 choisi comme cela est schématisé sur la figure 5.1.

Un autre paramétrage intéressant consiste à conserver une pré-ouverture

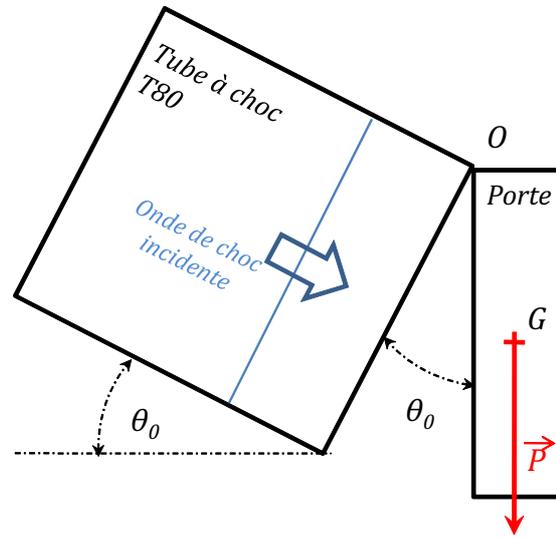


FIGURE 5.1 – Proposition d’une nouvelle configuration expérimentale permettant de supprimer les effets initiaux du poids dans l’expérience.

constante de la porte, $0^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$, et d’utiliser aussi l’inclinaison du tube θ_1 pour au contraire cette fois-ci, faire uniquement varier l’action du poids sur la dynamique d’ouverture (figure 5.2). Le moment dû aux efforts de gravité en projection sur l’axe de rotation s’exprimant ici par la relation 5.1.

$$M_z^t = m.g.\frac{L}{2} \sin(\theta_0 + \theta_1) \quad (5.1)$$

Enfin si nous décalions progressivement l’axe de rotation de la porte de l’extrémité du tube en faisant varier la distance X , comme le suggère la figure 5.3, nous pourrions évaluer quels sont les effet d’atténuation du souffle expulsé à mesure que la porte s’éloigne de l’extrémité de la chambre basse pression.

Enfin, les applications industrielles liées à cette étude ne se limitent pas aux soupapes de sécurité d’avion de ligne. En fait, la propagation d’ondes de choc dans une conduite fermée par une porte est une configuration relativement courante. Elle se retrouve notamment dans les navires de grandes dimensions, aussi bien civils que militaires. Leurs coursives et couloirs sont des conduits susceptibles d’être un lieu propice à la formation et à la circulation d’ondes de choc. Ainsi, une éventuelle explosion qui aurait lieu à un bout du navire pourrait par ce biais entraîner de lourds dégâts à l’autre bout. Ces coursives sont déjà cloisonnées par de portes pour assurer la sécurité en cas d’incendie ou de voie d’eau. L’utilisation de ses multiples portes dont on contrôlerait

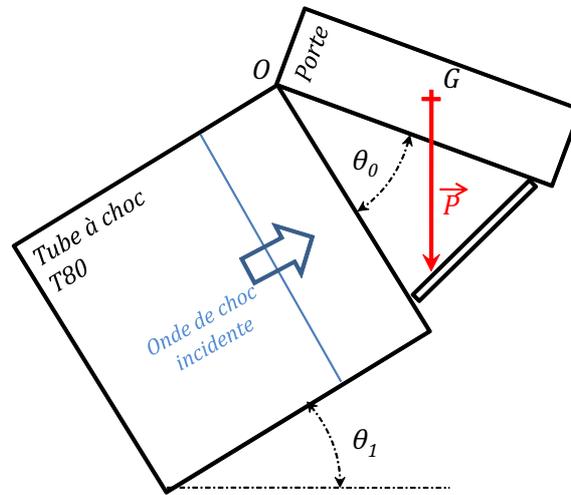


FIGURE 5.2 – Proposition d’une nouvelle configuration expérimentale permettant de paramétrer uniquement les effets initiaux du poids dans l’expérience.

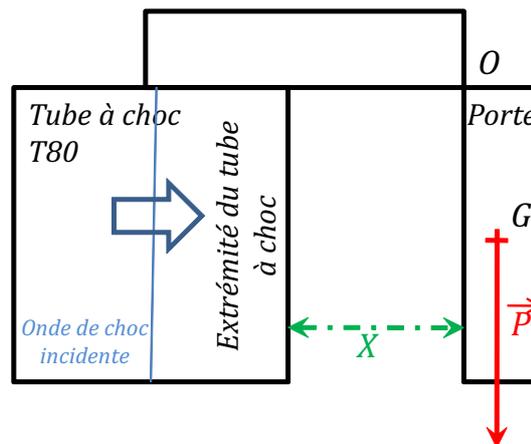


FIGURE 5.3 – Proposition d’une nouvelle configuration expérimentale permettant de quantifier la baisse d’intensité subie par la pression appliquée sur la porte en fonction de la distance X qui la sépare de l’extrémité du tube à choc.

l’ouverture permettrait d’une part de guider les faisceaux d’ondes vers l’extérieur ou vers une zone où leur propagation est moins dangereuse ; il serait, par exemple, assez fâcheux qu’elles atteignent le cœur du réacteur d’un sous marin nucléaire. L’utilisation de l’ouverture de ces portes peut aussi per-

mettre d'atténuer l'effet brisant des ondes de choc et les empêcher de se propager trop loin de la source initiale de l'explosion.

Cette configuration peut aussi se retrouver en génie civil. Les couloirs et les conduits de ventilation d'un bâtiment peuvent se comporter comme un tube à choc en cas d'explosion accidentelle ou criminelle. L'atténuation de ces ondes de choc peut ici aussi être contrôlée par des portes judicieusement utilisées et servir d'élément de sécurité.

Cette étude est une contribution expérimentale au domaine des interactions fluide-structure dans les écoulements instationnaires à haute enthalpie. Le manque de travaux expérimentaux sur ce type de thématique fait de ce travail original un cas test de référence qui pourra servir à la validation aux codes de calculs numériques. Il fournit à la littérature une base de données conséquente qui servira nous l'espérons à développer de nombreuses autres études

Bibliographie

L. Biamino - Étude expérimentale de l'interaction d'une onde de choc et d'une structure mobile autour d'un axe

-
- [1] J. H. Arakeri, D. Das, A. Krothapalli and L. Lourenco (2004) Vortex ring formation at the open end of a shock tube : A particle image velocimetry study. *Physics of Fluids*, vol 16, issue 4.
 - [2] G. Ben-Dor Shock wave reflection phenomena, Springer.
 - [3] G. Ben-Dor, K. Takayama and T. Kawauchi (1980) The transition from regular to Mach reflexion and from Mach to regular reflexion in truly non-stationary flows. *Journal of Fluid Mechanics*, vol 100 : 147-160.
 - [4] L. Biamino, G. Jourdan, C. Mariani, O. Igra, A. Massol and L. Houas (2010) Experimental investigation of door dynamic opening caused by impinging shock wave, *Shock waves*, vol 21 : 19-28.
 - [5] L. Biamino, O. Igra, G. Jourdan, A. Massol and L. Houas (2011) The flow generated inside a duct after emergence of a shock wave from it. *Journal of Aerospace Engineering*, accepté en juillet 2011, sous presse.
 - [6] L. Biamino, G. Jourdan, L. Houas and D.E. Zeitoun (2011) Effect of an impinging shock wave on a partially opened door. *Proceedings of the 28th International Symposium of Shock Waves*.
 - [7] L. Biamino, O. Igra, G. Jourdan and L. Houas (2011) Effect of an impinging shock wave on a partially opened door. à paraître dans *Shock Waves*.
 - [8] W. Bleakney and A. H. Taub (1949) Interaction of Shock Waves. *Reviews of modern physics*, vol 21 : 584-605.
 - [9] M. Brouillette, J. Tardif and E. Gauthier (1995) Experimental study of shock-generated vortex rings. *Proceedings of the 19th International Symposium on Shock Waves*, 361-366.
 - [10] F.K. Elder and N. De Haas (1952) Experimental study of the formation of a vortex ring at the open end of a cylindrical shock tube. *Journal of Applied Physics*, 23 : 1065-1069.
 - [11] H. Honma, M. Ishihara, T. Yoshimura, K. Maeno and T. Morioka(2003) Interferometric CT measurement of three-dimensional flow phenomena on shock waves and vortices discharged from open ends. *Shock Waves*, vol 13 : 179-190.
 - [12] H.G. Hornung and H. Oertel (1979) Transition to mach reflexion of shock waves in steady and pseudosteady flow with and without relaxation. *Journal of Fluid Mechanics*, vol 90 : 541-560.
 - [13] H.G. Hornung (1986) Regular and Mach reflection of shock waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol 18 : 33-58.
 - [14] O. Igra, J. Falcovitz, H. Reichenbach and W. Heilig (1996) Experimental and numerical study of the interaction between a planar shock wave and a square cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 313 : 105-130.

- [15] O. Igra and K. Takayama (1993) Shock Tube Study of the Drag Coefficient of a Sphere in a Non-Stationary Flow. Proceeding of the Royal Society A, vol 442 : 231-247.
- [16] Z. Jiang, O. Onodera, and K. Takayama (1999) Evolution of shock waves and the primary vortex loop discharged from a square cross-sectional tube. Shock Waves, vol 9 : 1-10.
- [17] G. Jourdan, L. Houas, L. Schwaederlé, G. Layes, R. Carrey and F. Diaz (2004) A new variable inclination shock tube for multiple investigations. Shock Waves, vol 13, issue 6 : 501-504.
- [18] G. Jourdan, L. Houas, O. Igra, J.-L. Estivalezes, C. Devals, and E.E. Meshkov (2007) Drag coefficient of a sphere in a non-stationary flow : new results. Proceeding of the Royal Society A, vol 463 : 3323-3345.
- [19] H.D. Kim and T. Setoguchi (1999) Study of the discharge of weak shocks from an open end of a duct. Journal of Sound and Vibration, vol 5 : 1011-1028.
- [20] K. Kontis, R. An, D. Kounadis and H. Zare-Behtash (2008) Head-on collision of shock wave induced vortices with a cylinder and a sphere. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol 29, Issue 5 : 1380-1392.
- [21] K. Kontis, R. An, H. Zare-Behtash, and D. Kounadis (2008) Head-on collision of shock wave induced vortices with solid and perforated walls. Physics of Fluids, vol 20, issue 1.
- [22] H. Li, A. Chpoun and G. Ben-dor (1999) Analytical and experimental investigations of the reflection of asymmetric shock waves in steady flows. Journal of Fluid Mechanics, vol 390 : 25-43.
- [23] G. Mazor, G. Ben-Dor, O. Igra, M. Mond and H. Reichenbach (1990) The head-on reflection of a normal shock wave from a flat plate supported by a rubber rod. AIP Conference Proceedings, Vol 208 : 240-245.
- [24] G. Mazor, O. Igra, G. Ben-dor, M. Mond and H. Reichenbach (1992) Head-on collision of normal shock waves with a rubber-supported wall. Philosophical transaction of The royal society A, Vol 338 : 237-269.
- [25] R.F. Meyer (1957) The impact of a shock wave on a movable wall. Journal of Fluid Mechanics, vol 3 : 309-323.
- [26] S.M. Nabulsi and N.W. Page (1992) Response of a movable wall to a shock wave. 11th Australasian Fluid Mechanics conference.
- [27] G. Rudinger (1955) On the reflection of shock waves from an open end of a duct. Journal of applied physics, vol 26, issue 8 : 981-993.
- [28] G. Rudinger (1957) The reflection of pressure waves of finite amplitude from an open end of a duct. Journal of Fluid Mechanics, vol 3 : 48-66.
- [29] G. Settles (2004) The Penn State full-scale schlieren system. 11th International Symposium on Flow Visualization.

-
- [30] G.S. Settles, B.T. Keane, B.W. Anderson and J.A. Gatto (2004) Shock waves in aviation security and safety. *Shock Waves*, vol 12, issue 4 : 267-275.
- [31] G.S. Settles, J.R. Benwood, and J.A. Gatto (2004) High-speed cinematography of internal explosions for aviation security. *Proceedings of the 24th International Symposium on Shock Waves*.
- [32] G.S. Settles, T.P. Grumstrup, L.J. Dodson, J.D. Miller and J.A. Gatto (2005) Full-scale high-speed schlieren imaging of explosions and gunshots. *Proceedings of SPIE*, vol 5580, 60.
- [33] H. Kleine and G.S. Settles (2008) The art of shock waves and their flowfields. *Shock Waves*, vol 17 :291-307.
- [34] K. Takayama and Z. Jiang (1997) Shock wave reflection over wedges : a benchmark test for CFD and experiments. *Shock Waves*, vol 7, issue 4 : 191-203.
- [35] Q. Yu and H. Grönig,(1996) Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes *Shock Waves*. *Shock Waves*, vol 6, issue 5 : 249-258.