

UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE Énergie - Matériaux - Sciences de la Terre et de l'Univers

ICARE – Institut de Combustion, Aérodynamique, Réactivité, Environnement

THÈSE présentée par :

Raphaël GAVART

Soutenue le : 24 novembre 2023

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Mécanique - Énergétique

Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type

THÈSE dirigée par :

Mme CHAUMEIX Nabiha

Mme TRELAT Sophie

Co-encadrement

M. STURTZER Michel-Olivier

Directrice de Recherche, CNRS-ICARE

Ingénieure-Chercheuse, IRSN

Chargé de Recherches, Institut Franco-Allemand de
Recherches de Saint-Louis

RAPPORTEURS :

M. ARRIGONI Michel

M. LECOMPTE David

Professeur, ENSTA Bretagne

Professeur, École Royale Militaire

JURY :

M. CHINNAYYA Ashwin

Mme HEUDIER Laure

M. POUILLAIN Didier

INVITE :

M. DAUBECH Jérôme

Professeur, ISAE-ENSMA, **Président**

Responsable Études et Recherche, INERIS, examinatrice

Ingénieur-Chercheur, CEA-DAM Le Ripault, examinateur

Ingénieur Études et Recherche, INERIS

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Nabiha Chaumeix, Michel-Olivier Sturtzer et Sophie Trélat d'avoir encadré cette thèse, et de m'avoir guidé et conseillé tout au long de ces travaux. Je les remercie pour le temps qu'ils m'ont dédié, notamment pour répondre à mes interrogations et pour relire ce tapuscrit.

Je remercie également Michel Arrigoni et David Lecompte d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'Ashwin Chinnayya, Jérôme Daubech, Laure Heudier et Didier Poullain qui ont accepté de faire partie du jury.

Cette thèse ne serait évidemment rien sans le soutien et l'apport de toutes les personnes que j'ai côtoyées durant ces trois années. Ainsi, je remercie grandement le personnel de l'ISL avec qui j'ai pu travailler, échanger, apprendre, en particulier les équipes du TE qui ont permis la réalisation des nombreux essais sur lesquels sont bâtis les travaux ici présentés, et ce par tous les temps ; merci donc à Dominique, Eric, Fabien, Jean-François, Laurent, Ludovic, Paul, Sylvain, Tatiana, Thérèse, Thierry, Yannick et Yannick. Merci également à Julien Mory qui a relu la section sur les familles d'explosifs. De même, j'ai eu la chance de travailler avec une équipe formidable à l'IRSN, avec laquelle j'ai découvert les règles du pot et passé de très bons moments ; je remercie donc Alexandre, Anne-Laure, Aude, Christophe, Clément, Clément, Cyprien, Cyril, Éric, Florence, François, Joffrey, Joffrey, Jonathan, Kévin, Louis, Malo, Olivier, Olivier, Pierre, Pierre, Stéphane, Sylvain, Vincent, et Yanni. Merci également à Antoine, Niels et Sébastien de chez ArianeGroup (Centre de Recherche du Bouchet), qui ont réalisé les essais pour l'IRSN.

Enfin, je tiens à remercier mes parents. Je n'ai réalisé que tardivement la chance que j'ai eue de pouvoir réaliser mes études, en particulier mes trois années à l'ENSTA Bretagne, et c'est à eux que je le dois. Ce mémoire n'aurait ainsi probablement jamais existé sans eux, et je les remercie donc du fond du cœur pour leur soutien toutes ces années et pour l'éducation qu'ils m'ont donnée.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Table des illustrations	ix
Table des tables	xvii
Nomenclature	xix
Introduction	1
1 Origines et effets des explosions	5
1.1 Origines des explosions	5
1.2 Les régimes d'explosion	7
1.2.1 Déflagration	7
1.2.2 Détonation	7
1.2.3 Transition déflagration-détonation	8
1.3 Les familles d'explosifs	8
1.3.1 Les explosifs primaires	9
1.3.2 Les explosifs secondaires	10
1.3.3 Notion d'équivalent TNT	12
1.4 Propagation d'une onde de choc	14
1.4.1 Propriétés des ondes de choc – relations de Rankine-Hugoniot ...	15
1.4.2 Onde de souffle	19
1.4.3 Interaction de l'onde de choc avec un obstacle	22
1.5 Diagnostics	41
1.6 Principes de similitude	43
2 Installations et Méthodes Expérimentales	45
2.1 Installation Expérimentale de l'IRSN	45
2.1.1 Table à détonation	45
2.1.2 Charges explosives	47

2.1.3	Diagnostics associés	48
2.1.4	Obstacle hémicylindrique.....	50
2.1.5	Déroulé type d'un essai	51
2.2	Installation Expérimentale de l'ISL.....	52
2.2.1	Pas de tir.....	52
2.2.2	Charges explosives	54
2.2.3	Diagnostics associés	56
2.2.4	Obstacle hémicylindrique.....	58
2.2.5	Déroulé d'un essai	59
2.2.6	Application du principe de similitude	60
2.3	Méthodologie	60
2.3.1	Évaluation des incertitudes expérimentales.....	60
2.3.2	Algorithme de traitement des images	75
3	Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique	83
3.1	Propagation d'une onde de souffle en champ libre.....	83
3.1.1	Mesures en champ libre de l'IRSN	84
3.1.2	Résultats en champ libre de l'ISL	98
3.1.3	Impact de l'échelle sur les caractéristiques des ondes de souffle en champ libre	105
3.1.4	Conclusion sur les essais en champ libre	106
3.2	Interaction avec un obstacle hémicylindrique long	107
3.2.1	Répétabilité des résultats sur les obstacles hémicylindriques	107
3.2.2	Comparaison des capteurs piézo-électriques et piézorésistifs	118
3.2.3	Résultats et comparaison inter-échelles – Modèle S	120
3.2.4	Effet atténuateur	132
3.4	Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts	137
3.4.1	Effet atténuateur de l'obstacle court	139

3.4.2	Présence de deux tronçons successifs.....	144
3.4.3	Contournement de l'obstacle	149
	Conclusion	155
	Bibliographie	161
A.	Annexe : Fiches techniques des composants des campagnes IRSN	181
B.	Annexe : Schémas des configurations étudiées à l'IRSN.....	205
C.	Annexe :Fiches techniques des composants des campagnes ISL.....	213
D.	Annexe : Schémas des configurations étudiées à l'ISL.....	243
E.	Annexe : Organisation des campagnes expérimentales	247
F.	Annexe : Installation du CNRS	250
	Résumé.....	256
	Summary.....	256

Table des illustrations

Figure 1-1 : Comparaison des profils de pression provoqués par une détonation et une déflagration, d'après [38].	8
Figure 1-2 : Formulation de l'azoture de plomb $Pb(N_3)_2$.	10
Figure 1-3 : Formulation du RDX ($C_3H_6N_6O_6$).	11
Figure 1-4 : Formulation de la pentrite ($C_5H_8N_4O_{12}$).	11
Figure 1-5 : Formulation du TNT ($C_7H_5N_3O_6$).	12
Figure 1-6 : Évolution de l'équivalent TNT déterminé à partir de la surpression maximale en fonction de la distance réduite, d'après [68].	14
Figure 1-7 : Silos du port de Beyrouth après l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium le 4 août 2020, d'après [73].	15
Figure 1-8 : Propagation d'une onde de choc à la vitesse D dans un milieu au repos.	16
Figure 1-9 : Représentation de la droite de Rayleigh-Michelson (RM) et de l'adiabatique d'Hugoniot dans le plan (P, v) .	17
Figure 1-10 : Évolution de la pression derrière une onde de choc.	18
Figure 1-11 : Évolution temporelle de la pression derrière une onde de souffle, d'après [63].	19
Figure 1-12 : Abaque de l'UFC 3-340-02 [63] pour la détonation d'explosif hémisphérique au niveau de la mer.	21
Figure 1-13 : Réflexion normale d'une onde de choc.	23
Figure 1-14 : Réflexion oblique d'une onde de choc, d'après [12].	24
Figure 1-15 : Relation entre l'angle d'incidence d'un choc oblique et l'angle de déviation derrière lui.	25
Figure 1-16 : Phénomène de réflexion de Mach, d'après [12].	27
Figure 1-17 : Coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence β , d'après [63].	28
Figure 1-18 : Représentation des différents types de réflexion d'onde de choc, d'après [97].	29
Figure 1-19 : Profil de pression à la surface d'une structure voûtée, d'après [30].	30
Figure 1-20 : Évolution des coefficients de pression, de traînée et des intervalles de temps pour une structure voûtée, d'après [30].	31

Figure 1-21 : Évolution de la réflexion d'une onde de choc à la surface d'un obstacle convexe, d'après [105].	32
Figure 1-22 : Réflexions successives sur une surface convexe, et réflexion de Mach transitionnelle à la surface d'un cylindre tronqué, d'après [97].	33
Figure 1-23 : Réflexion d'une onde de choc sur une surface convexe pour $M=1,2$ (gauche) et $M=2,5$ (droite), d'après [117].	34
Figure 1-24 : Réflexion d'une onde de choc sur une surface convexe pour $M=5$, d'après [117].	35
Figure 1-25 : Répartition de la pression à la surface d'un dôme hémisphérique, d'après [120].	37
Figure 1-26 : Surpression réfléchie à la surface d'un cylindre pour différents angles d'observation en fonction de la distance réduite, d'après [122].	38
Figure 1-27 : Définition de la DDRA, d'après [123].	39
Figure 1-28 : Comparaison entre l'étude d'une structure cylindrique ou hémicylindrique	40
Figure 1-29 : Principe de similitude d'Hopkinson-Cranz [89].	44
Figure 2-1 : Vue éclatée de la table à détonation utilisée lors des essais de l'IRSN, d'après [124], et photo de la table lors d'un essai en champ libre de la campagne expérimentale 9.	46
Figure 2-2 : Plaque en bois modulaire (gauche), plaque d'acier sacrificielle (centre) et support de charge et détonateur (droite) composant la table à détonation de l'IRSN.	46
Figure 2-3 : Placement de la charge sur son support et du détonateur au milieu de celui-ci.	48
Figure 2-4 : Montage des capteurs piézorésistifs (gauche) et piézo-électrique (droite) dans leurs inserts.	49
Figure 2-5 : Schéma de la chaîne d'acquisition de l'IRSN.	49
Figure 2-6 : Structure de l'obstacle hémicylindrique utilisé et son placement sur la table à détonation.	50
Figure 2-7 : Hémicylindre en bois de l'IRSN, ici à 0,27 m de la charge explosive.	51
Figure 2-8 : Vue en coupe du pas de tir de l'ISL (haut) et vue du dessus (bas).	53

Figure 2-9 : Placement d'une charge de 333 g d'Hexomax® sur la plaque porte-échantillon.	55
Figure 2-10 : Numérotation des capteurs de l'ISL.	56
Figure 2-11 : Disposition des deux caméras lors des essais de l'ISL.....	57
Figure 2-12 : Recomposition des images obtenues en déplaçant les caméras lors des essais.....	57
Figure 2-13 : Photo de l'installation avec une charge de 400 g de TNT à 0,53 m de l'hémicylindre.....	59
Figure 2-14 : Représentation de la fonction de densité d'une loi normale.....	65
Figure 2-15 : Valeurs des coefficients de la loi de Student pour un nombre d'essai n et un niveau de confiance donnés, extrait de [171].	66
Figure 2-16 : Extrait de la fiche technique des capteurs Kulite XT190.	68
Figure 2-17 : Facteur d'élargissement selon le niveau de confiance demandé, d'après [175].	69
Figure 2-18 : Comparaison des intervalles de confiance du Tableau 2-5 avec des valeurs de référence.	71
Figure 2-19 : Intervalles de confiance pour le capteur K10.	71
Figure 2-20 : Intervalles de confiance pour la sonde effilée.	72
Figure 2-21 : Images d'une même configuration obtenues à l'ISL avec des tirs différents.....	75
Figure 2-22 : Images prises avec la mire et servant de base à la reconstitution.	76
Figure 2-23 : Illustration du changement de résolution des images de calibration.	76
Figure 2-24 : Repérage des intersections sur les images de calibration.	77
Figure 2-25 : Sortie de la console lpython après avoir sélectionné les intersections sur les images de calibration.	78
Figure 2-26 : Sortie de la console lpython après avoir sélectionné les intersections sur les images redimensionnées.	78
Figure 2-27 : Sortie de la console lpython après avoir sélectionné les intersections sur les images pivotées.	79
Figure 2-28 : Découpage d'une image en neuf zones.....	79
Figure 2-29 : Résultat de la reconstitution des images de calibration.	80

Figure 2-30 : Interface du module de suivi d'onde classique (gauche), et avec BOS (droite).....	81
Figure 3-1 : Configurations en champ libre étudiées à l'IRSN. a : campagne expérimentale CE9, b et c : campagne expérimentale CE10.	84
Figure 3-2 : Caractéristiques du souffle mesurées par le capteur K10 lors de la campagne expérimentale CE9 de l'IRSN. Charge 42 g d'Hexomax®.	86
Figure 3-3 : Caractéristiques du souffle mesurées par le capteur K11 lors des campagnes expérimentales CE9 et CE10 de l'IRSN. Charge 42 g d'Hexomax®.....	88
Figure 3-4 : Exemple de signaux de pression mesurés à distance différentes de la charge. $d_{\text{Charge-K4}} = 0,67 \text{ m}$, $d_{\text{Charge-K7}} = 1,07 \text{ m}$, $d_{\text{Charge-K10}} = 1,47 \text{ m}$. Essai N°4 de la CE10.....	89
Figure 3-5 : Évolution de la surpression normalisée, $\Delta P_{\text{max}}/P_0$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].	90
Figure 3-6 : Évolution du temps d'arrivée réduit de l'onde de souffle, $t_a/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].....	91
Figure 3-7 : Évolution de l'impulsion positive réduite, $I^+_{\text{exp}}/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].	92
Figure 3-8 : Illustration de l'effet de remontée d'ondes de détente.....	93
Figure 3-9 : Exemple de signaux de pression mesurés à distance différentes de la charge. $d_{\text{Charge-P1}} = 0,27 \text{ m}$, $d_{\text{Charge-P2}} = 0,4 \text{ m}$, $d_{\text{Charge-P3}} = 0,53 \text{ m}$, $d_{\text{Charge-P4}} = 0,67 \text{ m}$. Essai N°1 de la CE10.	94
Figure 3-10 : Comparaison de la réponse des capteurs piézo-électriques et piézorésistifs en champ proche.	96
Figure 3-11 : Écart relatif entre les valeurs mesurées par les capteurs piézorésistifs et piézo-électriques.....	96
Figure 3-12 : Caractéristiques des ondes de souffle déduites des de l'IRSN. Comparaison selon la technologie des capteurs de pression. Comparaison avec les valeurs estimées par la littérature issue de [12], [63], [88], [90].....	98

Figure 3-13 : Profils de pression pour les charges de 333 g (a) et 66,5 g (b) d'Hexomax® au niveau de la sonde effilée. $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 1,6 \text{ m}$; $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53 \text{ m}$	100
Figure 3-14 : Evolution de la surpression normalisée, $\Delta P_{\text{max}}/P_0$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.	102
Figure 3-15 : Evolution du temps d'arrivée réduit de l'onde de souffle, $t_a/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.	103
Figure 3-16 : Evolution de l'impulsion positive réduite, $I^+/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.	104
Figure 3-17 : : Caractéristiques des ondes de souffle obtenues dans les deux installations expérimentales de l'IRSN et de l'ISL. Comparaison avec les valeurs estimées par la littérature à [12], [63], [88], [90].....	106
Figure 3-18 : Configuration de la table à détonation pour les essais avec l'hémicylindre à 0,27 m (a), 1 m (b) et 1,6 m (c) lors de la campagne expérimentale 9 de l'IRSN.	109
Figure 3-19 : Profils de pression à la surface de l'hémicylindre de l'IRSN pour une charge de 42g d'Hexomax®. $d_{\text{charge-obstacle}} = 1 \text{ m}$. Essais 8 à 10, campagne CE9.	110
Figure 3-20 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 42 g d'Hexomax® Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre de l'IRSN ou immédiatement derrière dans les configurations présentées dans la Figure 3-18.	111
Figure 3-21 : Configurations étudiées à l'ISL.	113
Figure 3-22 : Profils de pression à la surface de l'hémicylindre de l'ISL pour une charge de 333 g d'Hexomax®. $d_{\text{charge-obstacle}} = 2 \text{ m}$. Essais 2410, 2415, 2438 et 2443.	114
Figure 3-23 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 333 g d'Hexomax® Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre de l'ISL ou immédiatement derrière dans les configurations présentées dans la Figure 3-21	115

Figure 3-24 : Dispersion des résultats de temps d'arrivée et de surpression mesurés pour des charges de 333g d'Hexomax® et 400g de TNT à la surface de l'hémicylindre de l'ISL.....	116
Figure 3-25 : Dispersion des résultats de temps d'arrivée et de surpression mesurés pour des charges de 66,5 et 166,5 g d'Hexomax® et 50 g de TNT à la surface de l'hémicylindre de l'ISL.....	117
Figure 3-26 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 42 g d'Hexomax® Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre selon les configurations décrites dans la Figure 3-18- comparaison piézo-électrique – piézorésistifs.....	118
Figure 3-27 : Évolution de la pression à la surface de l'obstacle - comparaison inter-capteurs.....	119
Figure 3-28 : Propagation de l'onde de souffle à la surface de l'hémicylindre – 166,5 g Hexomax®, $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53 \text{ m}$	120
Figure 3-29 : Phénomènes de réflexion sur la face avant d'un obstacle situé à 1,2 m (a) ou 3,2 m (b) de la charge, et sur la face arrière à 1,2 m (c).	121
Figure 3-30 : Transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach pour 166,5g d'Hexomax® à 1,2 m de l'obstacle.....	122
Figure 3-31 : Trajectoires du point triple au-dessus de l'obstacle à 1,2 m (gauche) et à 3,2 m (droite).	123
Figure 3-32 : Hauteur du point triple au sol (a) et hauteur du point triple à l'hémicylindre réduite (b) en fonction de la distance à la charge pour une distance charge-obstacle de 1,2 m.	124
Figure 3-33 : Comparaison de signaux enregistrés aux deux échelles, $d_{\text{charge-hémicylindre}}=1,60 \text{ m}/3,20 \text{ m}$	125
Figure 3-34 : Temps d'arrivée de l'onde autour de l'obstacle aux deux échelles pour des charges de 333 g (ISL) et 42 g (IRSN) d'Hexomax®.....	126
Figure 3-35 : Surpressions relevées à la surface des obstacles aux deux échelles pour des charges de 333 g (ISL) et 42 g (IRSN) d'Hexomax®.....	126
Figure 3-36 : Évolution du temps d'arrivée à la surface de l'hémicylindre à 0,53 m de la charge explosive (a) et normalisée par le temps d'arrivée de l'onde au pied de l'obstacle (b) pour différentes masses d'explosif.....	126

Figure 3-37 : Évolution du temps d'arrivée adimensionné en fonction de l'angle d'observation sur l'hémicylindre pour différentes distances charge-hémicylindre...	127
Figure 3-38 : Évolution de la surpression à la surface de l'hémicylindre à 3,2 m de la charge explosive (gauche) et normalisée par la surpression incidente de l'onde au pied de l'obstacle (droite) pour différentes masses d'explosif.....	128
Figure 3-39 : Évolution de la surpression normalisée par la surpression incidente au pied de l'hémicylindre, $\Delta P_{\max}/\Delta P_i$, pour plusieurs distances charge-hémicylindre.	129
Figure 3-40 : Comparaison des résultats au modèle de Glasstone.	130
Figure 3-41 : Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle phénoménologique développé dans [123].....	131
Figure 3-42 : Comparaison des résultats expérimentaux de l'ISL avec le modèle phénoménologique développé dans [123].....	132
Figure 3-43 : Effet écran de l'obstacle long à différentes distances de la charge explosive à l'IRSN (gauche) et l'ISL (droite).	135
Figure 3-44 : Évolution des grandeurs caractéristiques de l'onde de souffle derrière l'obstacle long pour des charges équivalentes à 50 g (IRSN) et 400 g (ISL) de TNT en fonction de la distance derrière l'obstacle (exprimée en fonction de son rayon).	136
Figure 3-45 : Évolution de la surpression et du temps d'arrivée de l'onde de souffle derrière l'hémicylindre de l'ISL en fonction de sa distance à la charge explosive.	137
Figure 3-46 : Comparaison des signaux de pression à la surface d'un hémicylindre long (bleu) ou court (rouge) à 3,2 m de la charge explosive à l'ISL pour des angles de a) 30° et b) 150°.	138
Figure 3-47 : Surpressions relevées à la surface d'un hémicylindre long ou court.	139
Figure 3-48 : Comparaison de signaux de pression obtenus derrière un obstacle hémicylindrique court ou long à 3,20 m de la charge explosive à l'ISL.....	139
Figure 3-49 : Effet écran de l'obstacle court de l'IRSN à 0,6 m de la charge explosive – capteur situé à a) 1,07 m (K7) b) 1,19 m (K8) c) 1,32 m (K9) d) 1,45 m (K10) de la charge.	141
Figure 3-50 : Effet écran de l'obstacle à 0,6/1,2 m - variation des grandeurs d'intérêt par rapport au champ libre.	142

Figure 3-51 : Configurations utilisées pour étudier l'effet atténuateur de l'obstacle court à 1,60 m.....	143
Figure 3-52 : Effet écran de l'obstacle court à 1,60 m.....	144
Figure 3-53 : Effet écran entre deux tronçons d'hémicylindre placés à 0,6 m et 1,6 m de la charge explosive à l'IRSN – capteur situé à a) 1,07 m (K7) b) 1,19 m (K8) c) 1,32 m (K9) d) 1,45 m (K10) de la charge.	145
Figure 3-54 : Structure de l'onde de souffle impactant le second tronçon d'hémicylindre dans la configuration à deux tronçons successifs.....	146
Figure 3-55 : Trajectoire du point triple naissant entre les deux tronçons d'hémicylindre.....	147
Figure 3-56 : Profils de surpression et valeurs de surpression mesurées à la surface du second tronçon d'hémicylindre.....	148
Figure 3-57 : Effet écran de deux tronçons court placés à 0,60 et 1,60 m ...	149
Figure 3-58 : Configurations expérimentales permettant d'étudier le contournement de l'obstacle - 0,60 m (a) - 1,60 m (b) - Champ libre (c).	150
Figure 3-59 : Évolution de la pression autour de l'hémicylindre à 0,60 m. ...	151
Figure 3-60 : Évolution de la pression autour de l'hémicylindre à 1,60 m. ...	152
Figure 3-61 : Schéma du tube à choc.	250
Figure 3-62 : Vue des capteurs montés au fond du tube à choc.....	254
Figure 3-63 : Chaîne d'oscilloscopes pour l'acquisition des résultats de la campagne de calibration.....	255

Table des tables

Tableau 1-1 : Coefficients de l'équation (30) pour différents angles d'observation, d'après [122].....	37
Tableau 1-2 : Paramètres de la similitude de Sachs.....	44
Tableau 2-1 : Caractéristiques des charges explosives de l'IRSN.....	47
Tableau 2-2 : Caractéristiques des charges explosives.....	54
Tableau 2-3 : Application du principe de similitude aux expériences IRSN/ISL.	60
Tableau 2-4 : Surpressions maximales relevées par le capteur K11 durant la seconde campagne expérimentale de l'IRSN.....	70
Tableau 2-5 : Incertitudes expérimentales associées aux niveaux de confiance de 80, 95 et 99 %.	70
Tableau 2-6 : Surpressions maximales relevées par la sonde effilée placée à 1,6 m d'une charge de 333 g d'Hexomax.	72
Tableau 2-7 : Incertitude de mesure associée aux composants des chaînes de mesure employées.	72
Tableau 2-8 : Incertitude de mesure de type B associée à chacune des chaînes d'acquisition.....	73
Tableau 3-1 : Caractéristiques moyennes des ondes de souffle déduites du signal du capteur K11 situé à 0,93 m de la charge lors des campagnes CE9 et CE10. Charge 42 g d'Hexomax®. $\Delta P_{\max}$: surpression maximale, t_a : temps d'arrivée, I^+ : impulsion positive.	88
Tableau 3-2 : Récapitulatifs des caractéristiques de l'onde de souffle générée lors de l'essai N°1 de la campagne d'essais CE10.....	94
Tableau 3-3 : Résumé des distances entre la charge et l'obstacle hémicylindrique et entre la charge et la sonde effilée. Installation de l'ISL.	99
Tableau 3-4 : Caractéristiques des ondes de souffle, en champ libre, générées par l'explosion de différentes charges dans le cas où la charge est située à 0,53 m de l'obstacle et à 1,6 m de la sonde effilée.....	101
Tableau 3-5 : Caractéristiques des ondes de souffle, en champ libre, générées par l'explosion de différentes charges situées à différentes distances de l'obstacle hémicylindrique et pour des mesures effectuées par la sonde effilée positionnée à différentes distances de la charge. Installation de l'ISL.	101

Tableau 3-6 : Angle limite de vue en fonction de la distance séparant la charge de l'hémicylindre. Installation de l'IRSN.	111
Tableau 3-7 : Valeurs de surpression attendues en champ libre à des distances à la charge équivalentes à celle des capteurs K3, K6 et K8. Installation de l'IRSN.	112
Tableau 3-8 : Angle formé par la trajectoire du point triple avec le sol pour différents nombres de Mach incidents.	123
Tableau 3-9 : Coefficients de l'équation (43) pour les différentes distances charge-hémicylindre	124
Tableau 3-10 : Valeur des coefficients A_t et B_t de l'équation (44) pour les distances charge-hémicylindre étudiées.....	127
Tableau 3-11 : Coefficients de l'équation (44) pour les différentes distances charge-hémicylindre étudiées.....	129
Tableau 3-12 : Résumé des atténuations de surpression observées expérimentalement.	134
Tableau 3-13 : Configurations restant à étudier aux deux échelles.....	247
Tableau 3-14 : Organisation des campagnes expérimentales de 2020.	247
Tableau 3-15 : Organisation des campagnes expérimentales en 2021 à l'ISL.	248
Tableau 3-16 : Configurations étudiées aux deux échelles.....	248
Tableau 3-17 : Paramètres des essais réalisés au CNRS.	255

Nomenclature

a	célérité du son (m.s^{-1})
c_p	capacité thermique à pression constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
c_v	capacité thermique à volume constant ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
d	distance (m)
D	vitesse de propagation d'un front d'onde (m.s^{-1})
E	énergie (J)
h	enthalpie (J)
I^+	Impulsion positive (Pa.s)
M	nombre de Mach
m	masse de matière (kg)
P	Pression (Pa, bar)
ΔP	Surpression (Pa, bar)
$\Delta P_{\max}$	Surpression maximale (Pa, bar)
R, r	rayon (m)
T	température (K)
t_a	temps d'arrivée (s)
u	vitesse (m.s^{-1})
v	volume spécifique ($\text{m}^3.\text{kg}^{-1}$)
Z	distance réduite ($\text{m.kg}^{-1/3}$)

α	coefficient de forme
β	angle d'incidence ($^\circ$)
γ	coefficient polytropique
λ	distance réduite ($\text{m.MJ}^{-1/3}$)
ρ	masse volumique de la charge (kg.m^{-3})
θ	angle de déviation ($^\circ$)

Indices

0	état initial
1	état choqué
i	état incident
n	composante normale d'un vecteur
r	état réfléchi

Introduction

Le 10 mars 1906, un coup de poussier ravage, en quelques minutes, 110 km de galeries à Courrières [1], causant la mort de 1099 mineurs ; cette catastrophe met en exergue le risque provoqué par la concentration en poussière de charbon dans les galeries et remet en question la gestion des risques explosifs dans l'industrie minière française. Huit ans plus tard, la Grande Guerre éclate et change le visage de la guerre, qui devient industrielle. L'artillerie, ses obus explosifs et les bombes deviennent un outil majeur dans la guerre de tranchées, et plus de 150 000 obus s'abattent chaque jour lors de la bataille de Verdun. La sape, constituant essentiel de la poliorcétique selon Vauban, est également utilisée à outrance, et culmine avec l'explosion d'une mine de 60 tonnes en 1916 à Vauquois [2]. En parallèle se développent des contre-mesures telles que les bunkers, conçus pour résister aux explosions, et les premières recherches sur les effets des explosions, notamment les travaux d'Hopkinson pour l'armée britannique [3]. 20 ans plus tard, la Deuxième Guerre Mondiale relance la recherche sur les explosifs et leurs effets, des milliards de bombes rasent des villes entières, et les bombardements atteignent leur paroxysme lors du largage des deux premières bombes nucléaires de l'histoire, « Little Boy » et « Fat Man », sur Hiroshima et Nagasaki [4]. La course aux armements qui s'ensuit durant la Guerre Froide rend vitale l'étude des effets des explosions, notamment atomiques, et des moyens de protection et de mitigation. Au-delà des risques liés aux conflits armés, le risque industriel reste également bien présent et se rappelle régulièrement à nous ; en mars 1979, une panne dans la centrale nucléaire de Three Mile Island (États-Unis) entraîne l'explosion de 320 kg d'hydrogène, mais heureusement l'enceinte du bâtiment résiste et le rejet de matière radioactive reste faible [5]. En France, l'explosion d'un hangar d'engrais rase l'usine AZF en 2001 et provoque des dégâts jusqu'au centre-ville de Toulouse situé à trois kilomètres de là [6]. Et plus récemment, en 2020, l'explosion d'un stockage de nitrate d'ammonium dans le port de Beyrouth cause 235 morts et 6500 blessés [7], et endommage 77000 bâtiments dans un rayon de dix kilomètres ; la détonation sera entendue jusqu'à Chypre, à plus de 200 km de là. Dans le même temps, le développement d'activités terroristes durant les dernières décennies a également poussé la recherche à s'intéresser aux effets des explosions dans des environnements urbains et complexes, notamment sur les infrastructures. Les événements des derniers mois nous ont malheureusement rappelé la nécessité de ces

études, en particulier la guerre en Ukraine [8], l'explosion ayant eu lieu à l'aéroport de Tachkent [9] ou encore l'attentat-suicide d'Istanbul début octobre [10].

En France, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) est l'expert technique de l'État en matière d'expertise sur les risques nucléaires et radiologiques. Si le cœur de son activité consiste à assurer la prévention des accidents majeurs dans les installations nucléaires françaises, notamment en contrôlant et développant la sûreté des réacteurs, et à assurer la protection des personnes et de l'environnement contre les rayonnements ionisants, l'IRSN a également pour mission d'évaluer la protection des installations nucléaires et des transports de matières radioactives et fissiles contre les actes de malveillance. Au sein de la Direction de l'Expertise Nucléaire de Défense de l'institut, ce rôle est assuré par le Bureau de Modélisation des effets des Armes et des eXplosifs (BMAX). Par conséquent, ce dernier s'est doté en 2006 d'une table à détonation afin de réaliser des expérimentations à échelle réduite, assurant l'indépendance de ses recherches et lui permettant de développer des outils prédictifs pouvant être utilisés par d'autres services ou personnes de l'institut. Cette installation expérimentale permet de mettre en œuvre des explosifs plastiques en présence ou non d'obstacles, et d'en caractériser les effets à petite échelle. En outre, dans le Pôle Sûreté Nucléaire, le Laboratoire de l'Incendie et des Explosions (LIE) développe des codes de calcul comme P²REMICS [11] pour étudier des scénarios d'incendie ou d'explosion au cœur d'installations nucléaires.

De son côté, l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL) est un centre de recherche binational placé sous la tutelle du Ministère de la Défense français et du Bundesministerium der Verteidigung allemand. Dans ce cadre, les projets de l'ISL ont vocation à développer de nouvelles technologies pour les forces armées, de la recherche fondamentale au développement de prototypes comme le Stamina Aurochs, un robot tactique polyvalent. En particulier, l'institut a développé une activité visant à protéger les personnes et les biens, notamment contre les effets des explosions, qu'elles soient d'origine militaire ou liées à un acte de malveillance, et les menaces balistiques. Pour ce faire, l'ISL peut s'appuyer sur son Terrain d'Expériences de Baldersheim, doté notamment d'une dalle béton dédiée à l'étude des effets de la détonation d'explosifs.

Une coopération s'est nouée entre les deux instituts en 2017 afin d'étudier l'interaction entre l'onde de souffle générée par une charge hémisphérique d'explosif

plastique et un obstacle de forme hémicylindrique représentatif d'un conteneur de transport ou d'une infrastructure. Les études ainsi menées à échelle réduite ont notamment mené au développement d'un modèle prédictif permettant de déterminer la surpression sur la face arrière de l'obstacle. Par la suite, c'est dans le cadre de cette coopération que les travaux de thèse présentés dans ce document ont été réalisés, avec l'objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes de réflexion et diffraction ayant lieu dans cette configuration et d'établir des modèles décrivant l'évolution des paramètres d'une onde de souffle autour d'un obstacle hémicylindrique.

Le premier chapitre de ce manuscrit s'attache à dresser un état de l'art des connaissances dans le domaine des explosions et de leurs effets sur des structures. Ainsi, après avoir décrit différentes origines des explosions et leurs régimes de propagation, les explosifs les plus couramment utilisés seront présentés. Par la suite, les propriétés des ondes de choc et les équations les décrivant seront détaillées, avant de développer la notion d'onde de souffle, et de décrire les principes de similitude employés pour concevoir des installations expérimentales à échelle réduite. Enfin, l'interaction entre une onde de choc et un obstacle sera étudiée, d'abord dans le cas des phénomènes de réflexion plane, puis pour des structures convexes.

Par la suite, la deuxième partie détaillera les installations expérimentales déployées à l'IRSN et l'ISL, celle de l'ISL correspondant à une échelle double de celle de l'IRSN. Pour chacune d'entre elles, l'infrastructure utilisée sera présentée, ainsi que les charges explosives mises en œuvre à chaque échelle. S'ensuivra une description des dispositifs de mesure employés et des obstacles hémicylindriques étudiés, considérés indéformables, et la présentation du déroulé type d'un essai dans chacune des installations. Enfin, la méthodologie de détermination des incertitudes de mesure utilisée durant cette thèse sera détaillée, ainsi qu'un outil Python développé pour étudier la propagation de l'onde de souffle autour de l'hémicylindre.

Le troisième et dernier chapitre présentera les résultats expérimentaux obtenus durant les travaux de thèse ici présentés. Tout d'abord seront présentés les résultats obtenus en champ libre à chaque échelle : ceux-ci permettent notamment de vérifier la reproductibilité et la répétabilité des essais, mais également de comparer le comportement de deux technologies de capteurs soumis à une même sollicitation dynamique. Par la suite, l'interaction de l'onde de souffle avec un obstacle hémicylindrique long considéré indéformable sera caractérisée : des modèles

décrivant la trajectoire du point triple au-dessus de l'hémicylindre ainsi que l'évolution de la surpression et du temps d'arrivée à sa surface seront présentés, et les résultats de surpression obtenus seront comparés au modèle prédictif mentionné plus haut afin de l'étendre. Enfin, l'interaction de l'onde avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts sera détaillée, dans le but d'évaluer l'influence de la longueur de l'hémicylindre sur l'atténuation de pression derrière lui et d'étudier la propagation de l'onde de souffle le contournant.

1 Origines et effets des explosions

1.1 Origines des explosions

Selon Kinney & Graham [12], « une explosion est un phénomène résultant d'une soudaine libération d'énergie »¹, définition qui rend compte du fait que ce phénomène peut avoir des origines variées mais avec une conséquence identique. Strehlow et Baker [13] considèrent quant à eux que « généralement, une explosion a lieu dans l'atmosphère si l'énergie est relâchée dans un laps de temps suffisamment court et un volume suffisamment faible pour générer une onde de pression d'amplitude finie s'éloignant de la source. [...] Toutefois, ce relâchement n'est pas considéré comme une explosion s'il n'est pas assez rapide et concentré pour produire une onde de pression audible. »²; cette définition a notamment pour intérêt de qualifier plus précisément la soudaineté de la libération d'énergie et de lier la notion d'explosion à une augmentation de pression.

En France, l'Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques (INERIS) définit l'explosion comme la « réaction soudaine d'oxydation ou de décomposition produisant une augmentation de température, de pression, ou des deux simultanément » [14]. Les explosions peuvent avoir une origine physique ou chimique, parmi lesquelles on peut citer :

- L'explosion pneumatique. Elle a lieu lorsqu'un gaz à haute pression se détend dans un milieu à plus basse pression, ce qui correspond au principe de fonctionnement d'un tube à choc. Ce genre d'évènement peut survenir lors de la rupture d'une canalisation à haute pression [15], [16], et a notamment été à l'origine de l'explosion du bateau à vapeur Le Rhône en 1827 [17], [18].

¹ « An explosion is a phenomenon resulting from a sudden release of energy », d'après [12]

² « In general, an explosion is said to have occurred in the atmosphere if energy is released over a sufficiently small time and in a sufficiently small volume so as to generate a pressure wave of finite amplitude traveling away from the source. This energy may have originally been stored in the system in a variety of forms; these include nuclear, chemical, electrical or pressure energy, for example. However, the release is not considered to be explosive unless it is rapid enough and concentrated enough to produce a pressure wave that one can hear. », d'après [13]

1.1 Origines des explosions

- L'explosion de vaporisation. Elle correspond au BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*), c'est-à-dire la vaporisation instantanée d'une grande quantité de liquide générant une augmentation de pression. Cela se produit lorsque le récipient de stockage d'un liquide à une température supérieure à sa température d'ébullition fuit ou se fissure ; dans le cas où le liquide considéré est inflammable, une boule de feu peut apparaître. Ce phénomène est à l'origine de la catastrophe de Los Alfaques en Espagne en 1978, due à l'explosion d'un camion-citerne de propylène [19].
- L'explosion chimique : si le temps caractéristique d'une réaction exothermique est faible, alors une explosion peut avoir lieu. C'est ce qui se passe lors de la détonation d'un explosif de référence (comme le TNT) ou artisanal (à base d'engrais) ou d'une explosion de gaz. Ces explosions sont souvent mortelles, à l'instar de l'explosion de gaz de la rue Trévis en janvier 2019 [20], [21], ou de l'explosion d'engrais du port de Beyrouth en août 2020 [22]. Les explosions ayant eu lieu dans les bâtiments de plusieurs réacteurs de la centrale de Fukushima en 2011 étaient également sans doute dues à l'hydrogène généré par la fusion des cœurs de ces réacteurs [23]. Les explosions liées à l'hydrogène sont par ailleurs particulièrement étudiées depuis quelques années en raison de l'industrialisation de la production d'hydrogène [24], [25].
- L'explosion de poussière peut avoir lieu suivant la concentration en fines particules combustibles (farine, sucre, aluminium...) dans l'air d'un espace confiné. Dans le cas où une source d'énergie est apportée, une réaction de combustion peut se déclencher [26] ; les particules étant d'autant plus proches les unes des autres qu'elles sont fines, la réaction peut alors se propager très vite dans l'atmosphère ambiante et engendrer une explosion [27]. Ce type d'accident est notamment survenu à Savannah en 2008 dans une raffinerie de sucre [28] ou dans une usine d'aluminium à Huntington en 2003 [29].
- L'explosion nucléaire peut être causée par la détonation d'une bombe nucléaire à fission ou à fusion. Ces deux réactions sont très fortement exothermiques et créent une forte onde de choc, dont les effets ont été largement étudiés notamment par Glasstone [30].

En dehors des effets de pression et de transferts thermiques générés directement par l'explosion, celle-ci peut également s'accompagner d'effets secondaires également destructeurs, tels que la propagation d'ondes telluriques, des phénomènes de cratérisation ou encore des projections de fragments [31].

1.2 Les régimes d'explosion

Lors de l'explosion chimique d'un milieu réactif, gazeux ou matériau énergétique, différents régimes de décomposition du réactif peuvent être observés selon la vitesse de réaction, à savoir la déflagration ou la détonation [32].

1.2.1 Déflagration

D'après le Groupement Français de Combustion (GFC), la déflagration est « un mode de propagation autonome subsonique de la réaction dans un milieu combustible (idéalement pré-mélangé) grâce à son couplage avec les mécanismes de transport de chaleur et de matière ». Dans ce cas, la réaction chimique est plus lente que le transfert thermique et la vitesse de propagation du front de flamme dépend de la pression.

1.2.2 Détonation

Toujours d'après le GFC, la détonation est définie comme un « mode de propagation plus ou moins autonome d'une zone de combustion couplée à un complexe d'ondes de choc qui la précède, se faisant avec une vitesse supérieure à la célérité du son par rapport au milieu réactif ». Ainsi, dans cette situation, la réaction de combustion est associée à la propagation d'une onde de choc supersonique et les deux phénomènes s'auto-entretiennent ; cette définition rejoint le modèle de détonation ZND proposé par Zel'Dovich [33], von Neumann [34] et Döring [35], dans lequel le processus est décomposé en plusieurs étapes : une onde de choc se propage à une vitesse supersonique dans les gaz frais et les comprime à haute pression (pic de von Neumann), ce qui provoque la réaction chimique selon le modèle de Chapman-

1.3 Les familles d'explosifs

Jouguet [36], [37]. Enfin, l'énergie libérée par la réaction chimique est transportée jusqu'au front de choc et alimente sa propagation.

1.2.3 Transition déflagration-détonation

Comme le montre la Figure 1-1 qui compare des évolutions de pression enregistrées à distance, une déflagration présente une surpression maximale généralement plus faible qu'une détonation, avec une augmentation de pression continue ainsi qu'une durée de phase positive habituellement plus importante, car elle se propage à une vitesse subsonique. Toutefois, une déflagration peut être accélérée, par la réaction chimique ou d'autres facteurs comme la présence d'obstacles, et finir par dépasser la vitesse du son : devenue supersonique, elle peut alors se transformer en détonation. Ce phénomène est connu sous le nom de Transition Déflagration Détonation ou DDT (pour *Deflagration to Detonation Transition*).

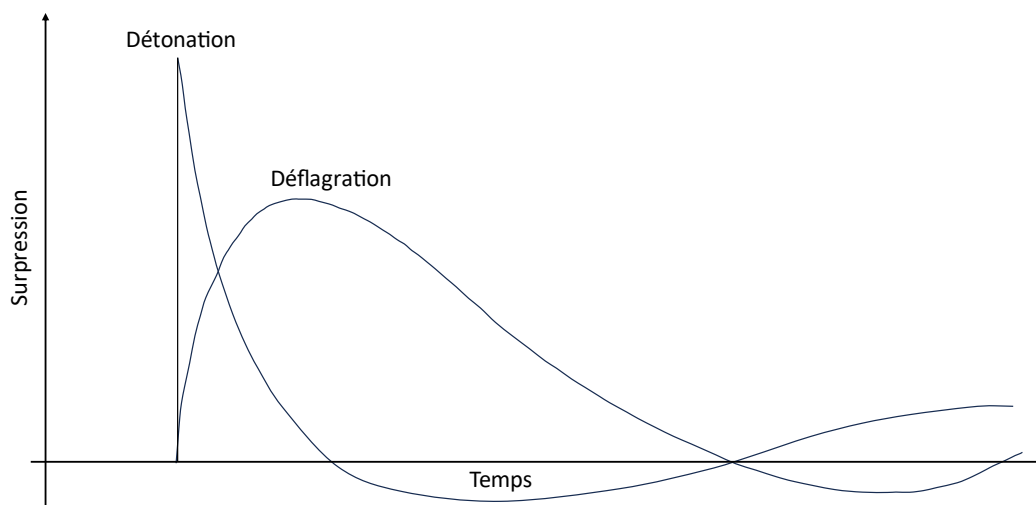


Figure 1-1 : Comparaison des profils de pression provoqués par une détonation et une déflagration, d'après [38].

1.3 Les familles d'explosifs

Les travaux présentés ici ayant été réalisés à l'aide d'explosifs condensés, il est donc important de les présenter et de rappeler certaines de leurs propriétés énergétiques. Un explosif condensé libère son énergie en détonant, ce qui relâche une

grande quantité de gaz à haute pression (H_2O , N_2O , CO_2 , CO , N_2 , etc. [39], [40]) ainsi que de la chaleur [32].

En fonction de leurs régimes de décomposition, il est possible de regrouper les explosifs en deux familles : les primaires, qui transitent uniquement en détonation, et les secondaires, qui peuvent présenter différents types de décomposition (combustion, déflagration ou détonation) selon la sollicitation à laquelle ils sont soumis. En conséquence, les explosifs primaires sont plus sensibles que les secondaires.

1.3.1 Les explosifs primaires

Les explosifs primaires ont la particularité d'être extrêmement sensibles aux sollicitations de choc, à la friction, à la chaleur ou encore à l'électricité statique [41], et doivent donc être manipulés avec précaution. Ils sont généralement composés de métaux lourds tels que le plomb (Figure 1-2) ou le mercure, sous la forme d'azoture ou de fulminate [40], ou encore de complexes organo-métalliques comme le BNCP [42]. Leur capacité à transiter très rapidement en détonation [32], et ce même en petite quantité, en fait des éléments de choix pour la conception des détonateurs et l'amorçage des explosifs secondaires. Malheureusement, la présence de métaux lourds toxiques dans ces explosifs pose des problèmes écologiques et environnementaux, car leur production nécessite l'emploi de sels métalliques, et la dispersion des métaux lors de la détonation engendre une pollution et un empoisonnement de l'environnement, notamment sous forme de particules fines. La directive européenne REACH (Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals) [43] vise d'ailleurs à diminuer voire arrêter l'utilisation de ces substances toxiques. Par conséquent, de nombreux travaux cherchent des alternatives aux explosifs primaires afin d'amorcer les explosifs secondaires : il existe ainsi des détonateurs électriques à filament explosé (EBW) [44], et des technologies basées sur l'utilisation de lasers sont étudiées. Le laser peut ainsi générer soit un effet thermique utilisé pour chauffer une substance jusqu'à l'amorcer [45], ou induire un choc par la projection d'un élément amorçant un explosif secondaire [46], [47]. Les lasers peuvent aussi être employés afin d'étudier le comportement de matériaux soumis à des contraintes élevées sans utiliser d'explosifs [48].

1.3 Les familles d'explosifs

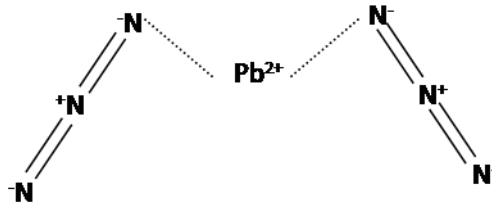


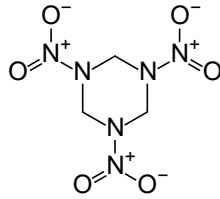
Figure 1-2 : Formulation de l'azoture de plomb $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$.

1.3.2 Les explosifs secondaires

Contrairement aux primaires, les explosifs secondaires sont peu sensibles aux sollicitations extérieures et peuvent présenter des régimes de réaction allant de la combustion à la détonation, cette dernière couramment amorcée par un explosif primaire [32]. Par ailleurs, la vitesse de détonation des secondaires est généralement plus élevée [40] et l'énergie libérée également. De plus, les explosifs secondaires comme la pentrite ou l'hexogène peuvent être associés à des éléments tels que des huiles ou des plastifiants [49] dans des formulations explosives secondaires comme le C4 (90% d'hexogène et 10% de plastifiant) ou le Semtex (94% de pentrite, 5% d'hexogène et 1% de plastifiants).

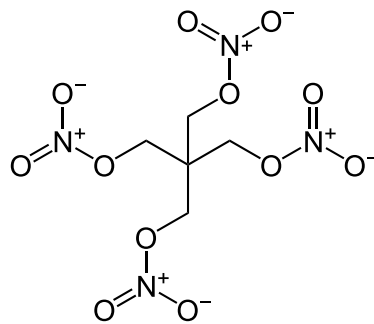
L'hexogène (RDX)

Breveté en 1898 par Georg Henning [50], [51] dans un but médical, le cyclotriméthylènetrinitramine (présenté dans la Figure 1-3), plus connu sous le nom de RDX (pour Research Department eXplosive) ou hexogène, est une molécule hétérocyclique comportant des fonctions nitramines. Ses propriétés explosives n'ont été découvertes que dans les années 1920 [51] et il a été très utilisé durant la seconde guerre mondiale. Aujourd'hui, il entre dans la composition de nombreuses formulations explosives plastiques (C4, Hexomax[®]...), d'explosifs coulés fondus (comme l'hexolite), ou encore d'explosifs à liant plastique comprimé (tels que le PBX); des formulations de RDX à sensibilité réduite sont également développées et étudiées, et des travaux se focalisent sur la relation entre la microstructure et la sensibilité des cristaux de RDX dans des compositions RDX-cire coulées ou comprimées [52]. Sa vitesse de détonation est de 8750 m.s^{-1} (pour une masse volumique de 1760 kg.m^{-3}) [53].

Figure 1-3 : Formulation du RDX ($C_3H_6N_6O_6$).

La pentrite (PETN)

Le tétranitrate de pentaérythritol (Figure 1-4), plus connu sous le nom de pentrite ou PETN, a été breveté en 1894 par le fabricant allemand Rheinisch-Westfälische Sprengstoff A.G. [54], et utilisé par l'armée allemande durant la première guerre mondiale. Cet explosif a une vitesse de détonation de 8350 m.s^{-1} (pour une masse volumique de 1730 kg.m^{-3}) [53], et est souvent employé dans la fabrication des cordons détonants utilisés dans les mines et carrières [55]. De manière plus surprenante, la pentrite est également utilisée dans le domaine médical comme vasodilatateur [56], afin de traiter des problèmes tels que l'angine de poitrine (le *Lentonitrat* est d'ailleurs composé de pentrite pure).

Figure 1-4 : Formulation de la pentrite ($C_5H_8N_4O_{12}$).

Le trinitrotoluène (TNT)

D'abord utilisé comme colorant jaune, le trinitrotoluène (Figure 1-5), ou TNT, a été préparé pour la première fois par Wilbrand en 1863 [57]. Du fait de sa très faible sensibilité, les propriétés explosives du TNT n'ont été découvertes qu'en 1891 par Häussermann [54]. Sa faible température de fusion (80°C) [40] permet de le couler facilement, ce qui l'a notamment mené à remplir de nombreuses munitions durant la

1.3 Les familles d'explosifs

première guerre mondiale ; par ailleurs, sa température de fusion très éloignée de sa température de décomposition (environ 290°C) [53] garantit une grande sécurité d'utilisation en terme de stabilité thermique. Il a une vitesse de détonation de 6900 m.s⁻¹ (pour une masse volumique de 1600 kg.m⁻³) [53].

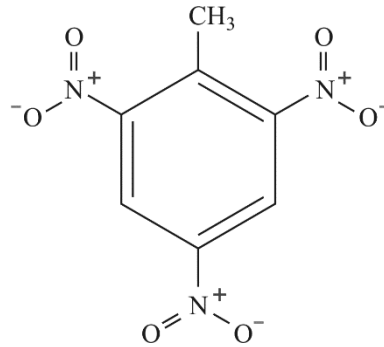


Figure 1-5 : Formulation du TNT (C₇H₅N₃O₆).

1.3.3 Notion d'équivalent TNT

Afin de pouvoir comparer les caractéristiques des explosions générées par différents matériaux énergétiques, il est préconisé d'établir un équivalent basé sur un explosif de référence. Grâce à ses propriétés physiques (densité connue, nature cristalline), sa stabilité ou encore sa reproductibilité, le TNT s'est imposé comme cette référence [12] ; c'est par ailleurs un explosif très étudié [58] et dont les propriétés énergétiques sont maîtrisées [40]. Ainsi a été créée la notion d'« équivalent TNT » permettant de ramener une masse d'explosif quelconque à une masse de TNT dont on connaît les propriétés. Toutefois, cet équivalent peut être évalué sur la base de différents critères [59] et cette approche rencontre des limites dans sa mise en application [60].

Parmi les différents critères de détermination de l'équivalent TNT, certains sont basés sur les propriétés physico-chimiques des matériaux énergétiques considérés. Ainsi, Cooper [40] définit l'équivalent TNT comme le rapport des vitesses de détonation (1) :

$$TNT_e = \frac{D_{EXP}^2}{D_{TNT}^2} \quad (1)$$

Avec TNT_e l'équivalent TNT de l'explosif considéré, D_{EXP} sa vitesse de détonation ($m.s^{-1}$), et D_{TNT} la vitesse de détonation du TNT ($m.s^{-1}$).

Cette définition est notamment présentée dans [61], [62].

L'équivalent TNT peut également être déterminé à partir de la chaleur de détonation d'un explosif, comme décrit dans l'UFC 3-340-02 (ex-TM5-1300) [63], à l'instar des travaux de Maienschein [64], Sochet [65] ou Panowicz [62]. De manière analogue à l'équation (1), l'équivalent TNT est défini comme suit dans l'équation (2) :

$$TNT_e = \frac{Q_{EXP}}{Q_{TNT}} \quad (2)$$

Avec Q_{EXP} la chaleur de détonation de l'explosif considéré (J), et Q_{TNT} celle du TNT (J).

Ces définitions n'étant basées que sur les propriétés physico-chimiques de l'explosif, les phénomènes extérieurs à celui-ci (atmosphère ambiante, post-combustion) pouvant affecter la propagation de l'onde de choc générée par la détonation ne sont pas pris en compte. Il est alors possible de proposer d'autres définitions de l'équivalent TNT basées sur les caractéristiques de l'onde de choc, à partir des distances réduites auxquelles des valeurs identiques de surpression ou d'impulsion positive sont obtenues [66], [67]. Ainsi, Formby [66] propose de déterminer l'équivalent TNT avec l'équation (3) :

$$TNT_e = \left(\frac{Z_{EX}}{Z_{TNT}}\right)^3 \quad (3)$$

Avec Z_{EX} la distance réduite pour l'explosif considéré ($m.kg^{-1/3}$), et Z_{TNT} celle pour le TNT ($m.kg^{-1/3}$).

D'une autre manière, il est possible de définir l'équivalent TNT dans l'autre sens, en comparant les surpressions (ou impulsions positives) obtenues à une distance donnée d'une charge explosive de même masse, comme donné par l'équation (4):

$$TNT_e = \frac{\Delta P_{EX}}{\Delta P_{TNT}} \quad (4)$$

Avec ΔP_{EX} la surpression derrière l'onde de choc générée par l'explosif étudié (Pa), et ΔP_{TNT} celle liée au TNT (Pa).

1.4 Propagation d'une onde de choc

Ces différentes définitions font ainsi qu'un même explosif peut avoir plusieurs équivalents TNT selon la propriété considérée et la distance pour laquelle l'équivalent a été calculé. Cela est parfaitement illustré par les travaux de Wharton *et al.* [68], qui ont étudié l'équivalent TNT en fonction de la distance réduite pour divers explosifs commerciaux. La Figure 1-6 illustre bien la variation d'équivalent TNT avec la distance, certains explosifs comme la nitroguanidine ou le Super Dopex ayant un équivalent qui change drastiquement quand la distance réduite augmente. Pour pallier les problèmes de définition de l'équivalent TNT, le manuel de l'UFC [63] recommande par exemple d'appliquer un facteur 1,2 sur la masse équivalente de TNT calculée afin de considérer une configuration plus majorante lors du dimensionnement de structures.

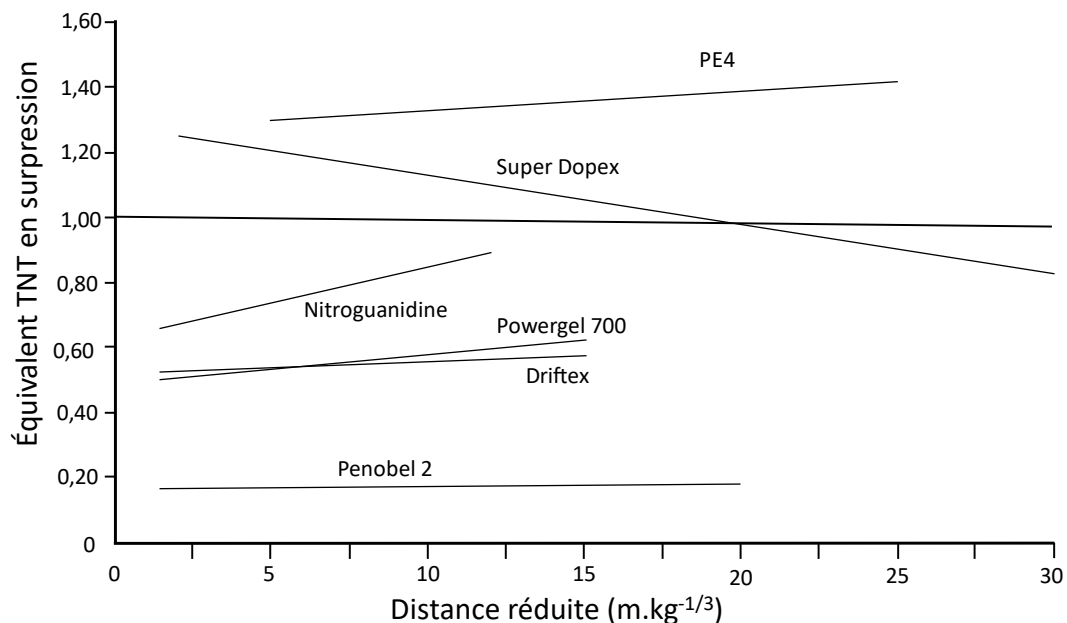


Figure 1-6 : Évolution de l'équivalent TNT déterminé à partir de la surpression maximale en fonction de la distance réduite, d'après [68].

1.4 Propagation d'une onde de choc

Comme évoqué précédemment, la détonation d'une charge explosive s'accompagne d'effets multiples : effets thermiques avec la présence d'une boule de feu [69]–[71], projection d'éclats [31], et surtout la propagation d'une onde de choc susceptible d'engendrer des dégâts matériels dramatiques comme lors de l'explosion du port de Beyrouth en août 2020 [72] (Figure 1-7). Dans le cadre des travaux

présentés ici, seules les caractéristiques de l'onde de choc aérienne générée par un explosif sont mesurées, et cette section s'attachera donc à présenter la phénoménologie des ondes de choc, puis le cas particulier des ondes de souffle générées par un explosif, et enfin le principe de similitude utilisé pour la conception d'essais de souffle à échelle réduite.



Figure 1-7 : Silos du port de Beyrouth après l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium le 4 août 2020, d'après [73].

1.4.1 Propriétés des ondes de choc – relations de Rankine-Hugoniot

Une onde de choc est une discontinuité (de pression, de température, etc.) se propageant dans un milieu à une vitesse supersonique (Figure 1-8), et dont l'épaisseur est de quelques libres parcours moyens. Afin de déterminer les propriétés du milieu situé derrière l'onde de choc, il est possible d'écrire les équations de conservation de la mécanique des fluides à travers le choc :

- Équation de conservation de la masse (5)

$$\rho_1 u_1 = \rho_0 u_0 \quad (5)$$

- Équation de conservation de la quantité de mouvement (6)

$$P_0 + \rho_0 u_0^2 = P_1 + \rho_1 u_1^2 \quad (6)$$

- Équation de conservation de l'énergie (7)

$$h_0 + \frac{1}{2} u_0^2 = h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 \quad (7)$$

1.4 Propagation d'une onde de choc

Où l'indice 0 représente les caractéristiques du milieu au repos, 1 celles du milieu choqué, P la pression dans le milieu (Pa), ρ la masse volumique (kg.m^{-3}), u la célérité du milieu par rapport au choc (m.s^{-1}), et h l'enthalpie (J).

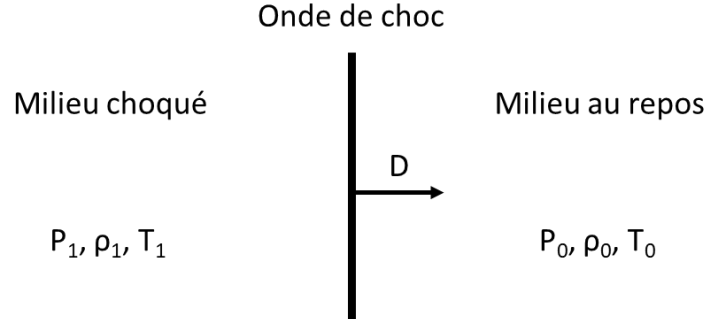


Figure 1-8 : Propagation d'une onde de choc à la vitesse D dans un milieu au repos.

À partir des équations (5) et (6), il est alors possible de déterminer la pression en fonction de la célérité du choc et des volumes spécifiques des milieux (qui sont l'inverse de leur masse volumique, soit $v = \frac{1}{\rho}$) :

$$\frac{D^2}{v_0^2} = - \frac{P_1 - P_0}{v_1 - v_0} \quad (8)$$

Ainsi, la connaissance des propriétés du milieu initial et de la célérité du choc donne des informations sur le couple (P_1, v_1) caractérisant l'état du milieu choqué. En particulier, dans le plan (P, v) , l'équation (8) définit la droite de Rayleigh-Michelson.

La seule connaissance de l'équation (8) ne permet pas de déterminer l'état du milieu choqué, et il est donc nécessaire de déterminer une équation supplémentaire pour résoudre ce problème. De manière analogue, à partir de l'équation de conservation de l'énergie, il est possible d'obtenir une équation (9) faisant intervenir l'enthalpie, la pression et le volume spécifique des milieux. Dans le plan (P, v) , cette relation se présente sous la forme d'une hyperbole connue comme l'adiabatique dynamique ou adiabatique d'Hugoniot.

$$h_1 - h_0 = \frac{1}{2} (P_1 - P_0)(v_1 + v_0) \quad (9)$$

Dans l'hypothèse où les gaz sont considérés parfaits, avec un coefficient polytropique³ constant (i.e. $\gamma_1 = \gamma_0$), l'enthalpie peut alors s'exprimer comme :

$$h = \frac{\gamma P v}{\gamma - 1} \quad (10)$$

Et l'on obtient alors une nouvelle forme de l'équation (9) ne dépendant plus de l'enthalpie :

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_1 v_1 - P_0 v_0) = \frac{1}{2} (P_1 - P_0) (v_1 + v_0) \quad (11)$$

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_1 v_1 - P_0 v_0) = \frac{1}{2} (P_1 - P_0) (v_1 + v_0)$$

La combinaison des équations (8) et (11) permet alors de résoudre le système ayant pour inconnues P_1 et v_1 . Cette résolution peut notamment s'effectuer graphiquement, comme illustré par la Figure 1-9, où les points d'intersection de la droite de Rayleigh-Michelson et de la courbe d'Hugoniot correspondent aux états au repos et choqué.

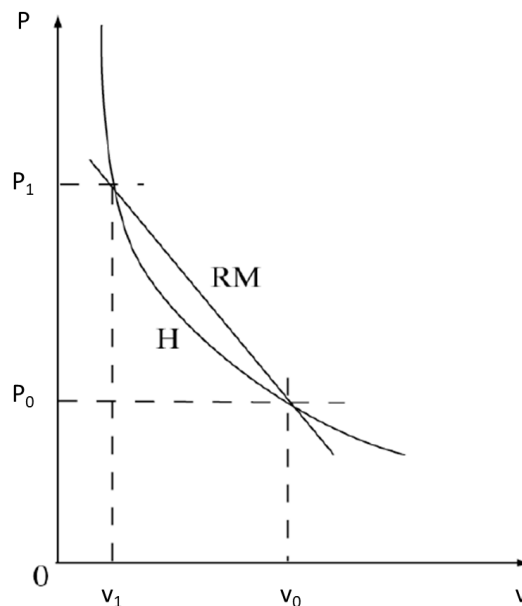


Figure 1-9 : Représentation de la droite de Rayleigh-Michelson (RM) et de l'adiabatique d'Hugoniot dans le plan (P, v) .

³ Le coefficient polytropique γ est défini comme le rapport des chaleurs spécifiques d'un gaz, soit $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

1.4 Propagation d'une onde de choc

Pour un choc se déplaçant à une vitesse D donnée, il y a alors unicité de la solution de ce système, et les propriétés des deux milieux peuvent être déterminées grâce aux relations de saut de Rankine-Hugoniot [74], [75]:

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{2\gamma M_0^2 - \gamma + 1}{\gamma + 1} \quad (12)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M_0^2}{(\gamma - 1)M_0^2 + 2} \quad (13)$$

$$\frac{u_1}{u_0} = \frac{(\gamma - 1)M_0^2 + 2}{(\gamma + 1)M_0^2} \quad (14)$$

Avec M_0 le nombre de Mach du milieu 0, soit $M_0 = \frac{(u_0 - D)}{a_0}$ où a_0 est la vitesse du son (m.s^{-1}) dans le milieu 0

L'état d'un milieu après le passage d'une onde de choc peut donc être parfaitement déterminé grâce à la connaissance de son état au repos et de la célérité du choc. En l'absence de perturbation extérieure, la pression derrière le choc reste constante et le profil de pression correspond donc à un échelon, comme illustré dans la Figure 1-10.

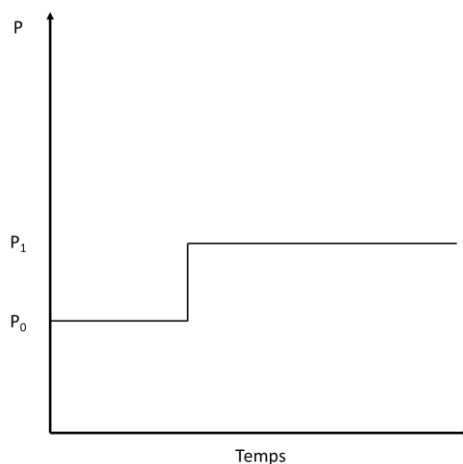


Figure 1-10 : Évolution de la pression derrière une onde de choc.

1.4.2 Onde de souffle

Dans le cas de la détonation d'un matériau énergétique, l'onde de choc générée se propage dans l'atmosphère ambiante, et les relations de saut de Rankine-Hugoniot peuvent alors s'appliquer. Toutefois, l'expansion des produits de détonation entraîne la naissance d'une onde de détente qui se propage derrière le front de choc [76], [77] et permet à l'atmosphère de revenir à son état ambiant. L'onde de choc est alors évanescente, et est communément appelée onde de souffle. Friedlander [78] a décrit l'évolution de l'onde par une décroissance exponentielle, présentée dans l'équation (15) et la Figure 1-11. La forme de l'onde peut toutefois varier loin de la charge ou selon la topographie locale [79].

$$\Delta P(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) e^{-\alpha \frac{t}{t_0}} \quad (15)$$

Avec $\Delta P(t)$ l'évolution de la surpression en fonction du temps (Pa), P_{so} la surpression de crête du choc (Pa), t_0 la durée de phase positive (s) et α le coefficient de forme fourni dans les tables de [12].

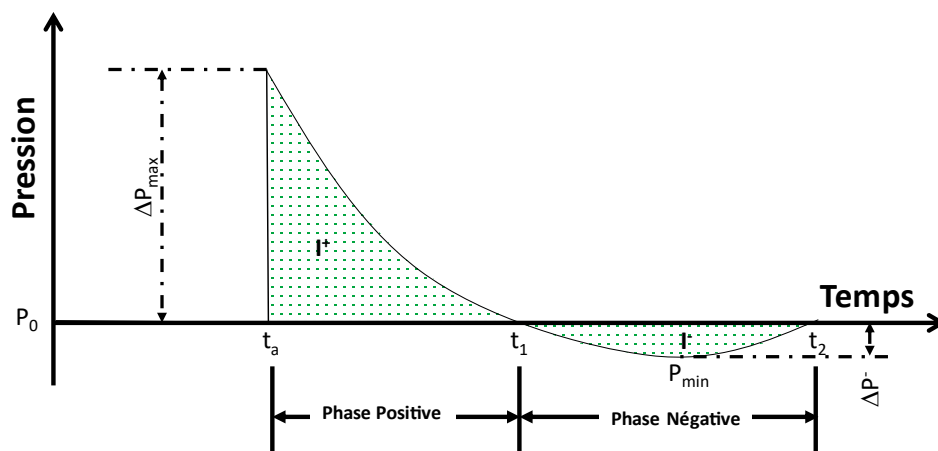


Figure 1-11 : Évolution temporelle de la pression derrière une onde de souffle, d'après [63].

D'autres modélisations plus complexes ont également été proposées, notamment par Bach [80] et Sakurai [81]. De manière générale, une onde de souffle peut être décrite par plusieurs de ses caractéristiques :

- La surpression maximale ΔP_{max} correspond à la surpression de crête de l'onde de souffle générée par la détonation. Il est notamment possible de la déterminer par les équations de Rankine-Hugoniot, sous réserve de connaître la célérité de l'onde.

1.4 Propagation d'une onde de choc

- Le temps d'arrivée t_a correspond au moment auquel l'onde atteint un point considéré.
- La durée de phase positive t_0 représente le délai entre le temps d'arrivée de l'onde et le moment où la pression revient à sa valeur initiale.
- L'impulsion positive I^+ est l'aire sous la phase positive du profil de pression, déterminée par $I^+ = \int_{t_a}^{t_a+t_0} \Delta P(t) dt$. Elle correspond à la quantité de mouvement transportée par l'onde de souffle.

Une onde de souffle est le plus souvent décrite par les grandeurs découlant de sa phase positive, et les caractéristiques de la phase négative sont souvent négligées, notamment car celle-ci est difficile à prédire [82], bien que cette phase puisse avoir un impact important sur les structures, en particulier vitrées [83], [84]

De nombreux travaux menés sur le TNT ont permis d'établir des modèles afin de prédire les caractéristiques d'une onde de souffle générée par une charge sphérique d'explosif, à l'instar des modèles de Brode [85], Henrych [86] ou encore Kinney & Graham [12]. Les équations Brode (16), Henrych (17), Kinney & Graham (18) présentent les calculs de la surpression incidente en fonction de la distance réduite Z (exprimée en $m.kg^{-1/3}$) définis par ces modèles.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta P}{P_0} = 1 + \frac{6,7}{Z^3}, \quad Z \in [0,1; 1] \\ \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{-0,019}{Z} + \frac{0,975}{Z^2} + \frac{1,455}{Z^3} + \frac{5,85}{Z^4}, \quad Z \in [1; 20] \end{array} \right. \quad \text{Brode (16)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,54}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4}, \quad Z \in [0,05; 0,3] \\ \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{6,194}{Z} - \frac{0,326}{Z^2} + \frac{2,132}{Z^3}, \quad Z \in [0,3; 1] \\ \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3}, \quad Z \in [1; 10] \end{array} \right. \quad \text{Henrych (17)}$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{808 \left(1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}}, \quad Z > 0,053 \quad \text{Kinney \& Graham (18)}$$

Les travaux de Baker [87], de l'AMCP [88] et l'UFC3-340-02 (ex TM5-1300) [63] permettent également de déterminer de nombreux paramètres des ondes de souffle (durée de phase positive, impulsion négative, etc.) grâce à leurs abaques, comme celui pour la détonation d'explosif sphérique au niveau de la mer présenté Figure 1-12.

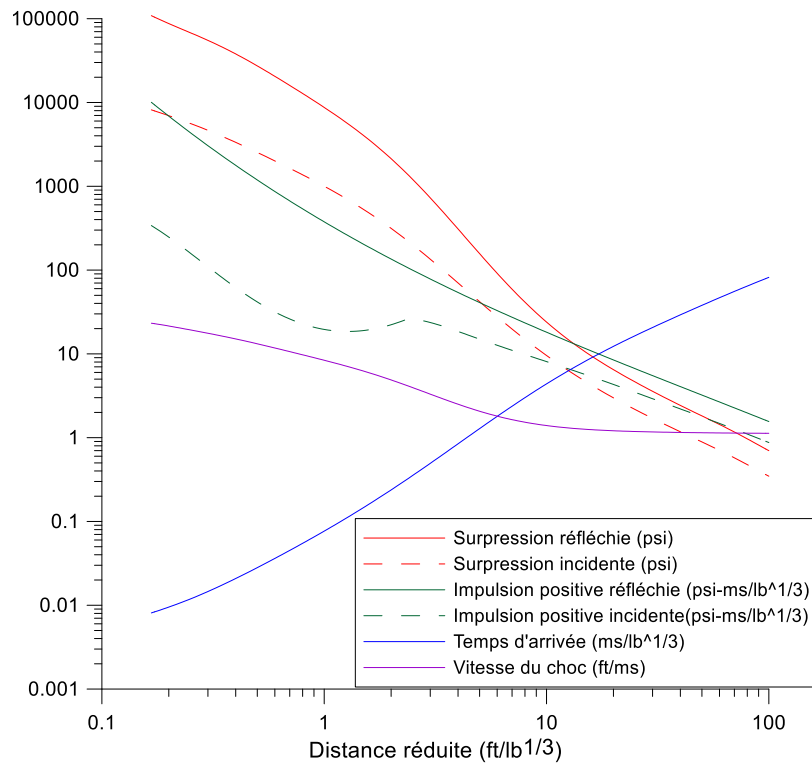


Figure 1-12 : Abaque de l'UFC 3-340-02 [63] pour la détonation d'explosif hémisphérique au niveau de la mer.

En ce qui concerne la détonation d'explosif hémisphérique, les travaux de Gelfand [89] permettent de calculer la surpression, mais seuls l'UFC 3-340-02 [63] et les travaux de Kingery [90], [91] fournissent des outils simples permettant de déterminer la surpression, l'impulsion positive mais aussi la durée de phase positive. Une solution permettant de compenser le manque de données pour les charges hémisphériques est d'utiliser les modèles développés pour les charges sphériques, en multipliant la masse par un facteur k tenant compte notamment de la nature du sol. Dans le cas d'une réflexion idéale, ce coefficient k serait égal à 2 ; toutefois, des travaux [92], [93] ont montré qu'il pouvait être pertinent d'utiliser un facteur compris entre 1,8 et 2 afin de prendre en considération l'énergie perdue dans le sol.

1.4 Propagation d'une onde de choc

1.4.3 Interaction de l'onde de choc avec un obstacle

La section précédente a présenté des modèles prédisant les caractéristiques d'une onde de souffle se propageant en champ libre. Néanmoins, il est courant qu'un obstacle se retrouve sur le chemin de l'onde, ce qui entraîne des phénomènes de réflexion, qui sont associés à des niveaux de surpression plus élevés à la surface de la structure, ou encore de diffraction. En fonction de la géométrie de la structure rencontrée par l'onde, plusieurs types de réflexion peuvent se produire [94] :

- La réflexion normale
- La réflexion oblique, ou réflexion régulière
- La réflexion de Mach, ou réflexion irrégulière

Cette section s'attachera donc, dans un premier temps, à présenter les phénomènes de réflexions planes, avant de décrire l'interaction entre une onde de choc et des obstacles de formes convexes.

1.4.3.1 Réflexions planes

Les réflexions planes concernent les cas où une onde de choc droite rencontre un obstacle plan. En fonction de la valeur de l'angle d'incidence β entre la direction de l'onde et la normale à l'obstacle, plusieurs types de réflexion plane peuvent être observés, à savoir la réflexion normale, la réflexion oblique, ou encore la réflexion de Mach.

Cas de la réflexion normale

La réflexion normale se produit quand l'onde de choc rencontre un obstacle avec une incidence normale, soit pour $\beta = 0^\circ$ (Figure 1-14). Dans ce cas, l'obstacle constitue un point d'arrêt pour les particules transportées par le choc ; ne pouvant pénétrer la surface de celui-ci, la direction des particules s'inverse et l'onde de choc retransverse le milieu précédemment choqué, créant un milieu choqué deux fois (Figure 1-13).

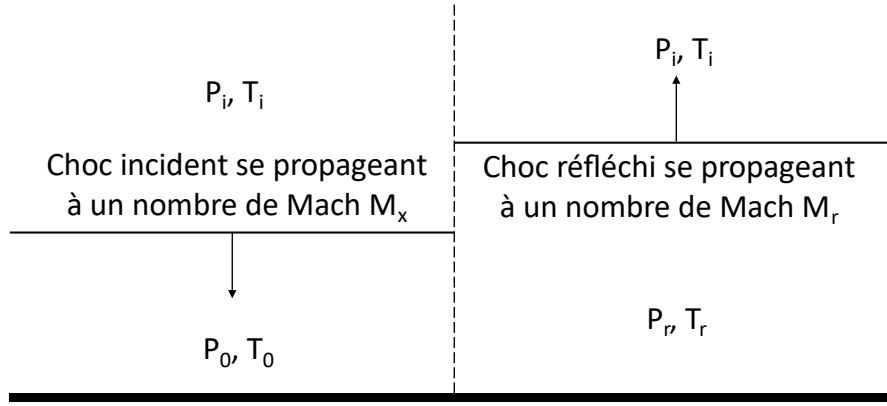


Figure 1-13 : Réflexion normale d'une onde de choc.

Il est alors possible d'utiliser à nouveau les relations de Rankine-Hugoniot décrites dans la section 1.4.1 pour déterminer l'état du milieu derrière le choc réfléchi [12], et l'on obtient alors :

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta P_i} = \frac{(3\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} + \gamma + 1}{(\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} + \gamma + 1} \quad (19)$$

Avec γ le coefficient polytropique du gaz considéré, 0 représente l'état du milieu au repos, i celui du milieu choqué une fois, et r celui du milieu choqué deux fois après passage du choc réfléchi.

Dans le cas général où le milieu est considéré comme un gaz parfait diatomique à température ambiante, alors il est possible de prendre $\gamma = 1,4$, ce qui permet d'exprimer l'équation (19) sous la forme :

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta P_i} = \frac{8P_i + 6P_0}{P_i + 6P_0} \quad (20)$$

Cette équation montre que la pression réfléchie derrière le choc ne dépend pas linéairement de la pression incidente, et que le coefficient de réflexion $\frac{\Delta P_r}{\Delta P_i}$ est compris entre 2 et 8 ; toutefois, les variations d'état thermodynamique engendrées par le passage d'un choc peuvent modifier la valeur de γ , et Baker [87] indique que le coefficient de réflexion peut atteindre la valeur de 20.

1.4 Propagation d'une onde de choc

Cas de la réflexion oblique

Dans le cas où l'angle d'incidence β n'est pas nul, alors un phénomène de réflexion oblique apparaît : le choc oblique dévie les particules d'air rencontrées vers la paroi, et par conséquent un choc réfléchi apparaît afin de rediriger le flux de particules parallèlement à l'obstacle, comme illustré dans la Figure 1-14.

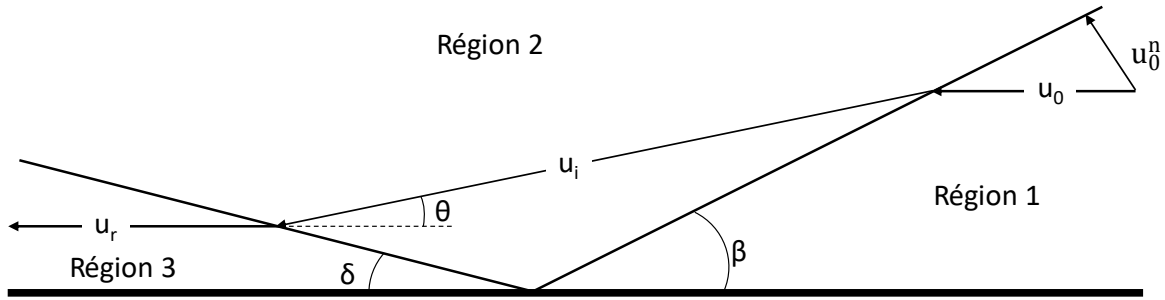


Figure 1-14 : Réflexion oblique d'une onde de choc, d'après [12].

Il est toujours possible de déterminer l'état des milieux choqués par le biais des équations de conservation (5) à (7), mais en les appliquant cette fois-ci à la composante normale de l'écoulement $u_0^n = u_0 \sin(\beta)$, et en utilisant le nombre de Mach normal au choc $M_0^n = M_0 \sin(\beta)$. Les relations de saut de Rankine-Hugoniot deviennent alors :

$$\frac{P_i}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M_0^{n^2} - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (21)$$

$$\frac{\rho_i}{\rho_x} = \frac{(\gamma + 1) M_0^{n^2}}{2 + (\gamma - 1) M_0^{n^2}} \quad (22)$$

$$\frac{u_i^n}{u_0^n} = \frac{(\gamma - 1) M_0^{n^2} + 2}{(\gamma + 1) M_0^{n^2}} \quad (23)$$

L'angle de déviation θ , correspondant à l'angle de l'écoulement dans la région 2 par rapport à la paroi, peut ensuite être déterminé par l'équation (25), ou grâce à des abaques comme celui présenté dans la Figure 1-15.

$$\frac{\tan(\beta - \theta)}{\tan(\beta)} = \frac{2 + (\gamma - 1)M_0^{n^2}}{(\gamma + 1)M_0^{n^2}} \quad (24)$$

Soit

$$\theta = \beta - \arctan \left(\frac{2 + (\gamma - 1)M_0^{n^2}}{(\gamma + 1)M_0^{n^2}} \tan(\beta) \right) \quad (25)$$

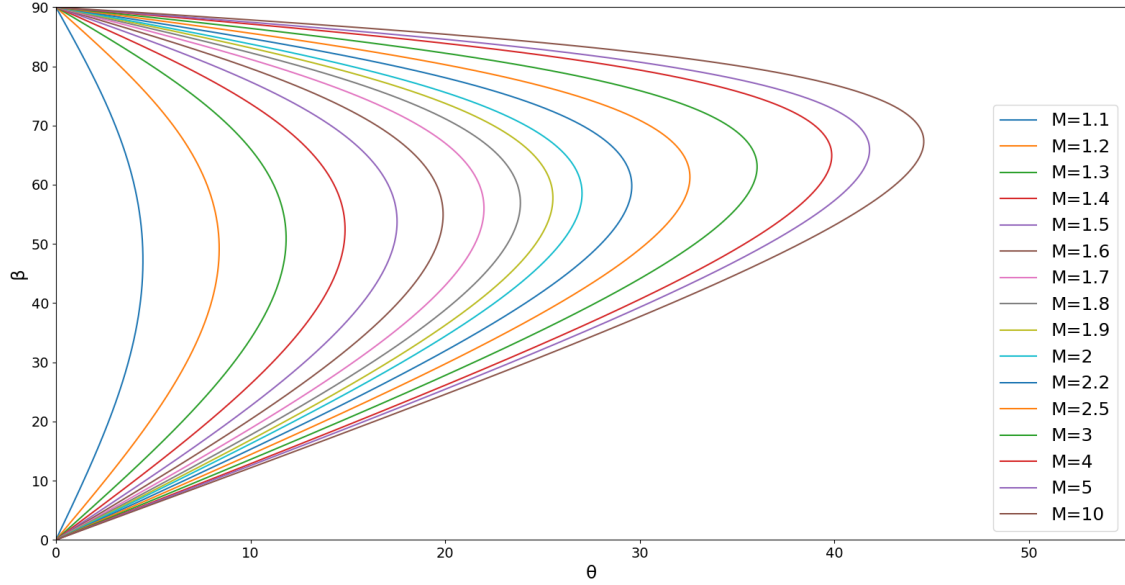


Figure 1-15 : Relation entre l'angle d'incidence d'un choc oblique et l'angle de déviation derrière lui.

La connaissance de la vitesse particulière dans la région 2 u_i^n et de θ permet alors de déterminer le nombre de Mach M_i^n du milieu :

$$M_i^n = \frac{u_i}{c_i} = \frac{u_i^n}{\sin(\theta) \sqrt{\gamma \frac{P_i}{\rho_i}}} \quad (26)$$

Il est alors possible de déterminer l'état de la région 3 (située derrière le choc réfléchi) en appliquant de nouveau les équations de Rankine-Hugoniot. En particulier, les valeurs de l'angle d'incidence β_r et de déviation θ_r au niveau de la réflexion peuvent être déterminées. Kinney & Graham [12] stipulent notamment que dans le cas d'une réflexion régulière, les angle de déviation sont identiques pour les chocs incident et réfléchi, i.e. $\theta = \theta_r$, et il est possible de déterminer β_r en utilisant l'abaque présenté Figure 1-15. Par conséquent, l'angle de réflexion δ peut être déterminé par :

1.4 Propagation d'une onde de choc

$$\delta = \beta_r - \theta \quad (27)$$

Toutefois, il est à noter que pour une valeur de Mach M donnée, il existe une valeur θ_{lim} au-delà de laquelle il n'y a pas de solution pour déterminer β (cf. Figure 1-15), et donc δ . Ainsi, Kinney & Graham [12] définissent un angle d'incidence limite β_{lim} à partir duquel aucun angle de déviation θ ne permet l'apparition d'une onde réfléchie, et qui peut être déterminé par :

$$\beta_{lim} = \frac{1,75}{M - 1} + 39 \quad (28)$$

Au-delà de cette valeur limite, la réflexion devient une réflexion de Mach, notion développée plus bas. Par ailleurs, il est remarquable dans la Figure 1-15 que pour chaque valeur de θ , il existe deux valeurs de β_2 solutions ; la valeur située le plus haut dans la figure correspond à la solution du choc « fort », considérée comme impossible dans le cas des explosions d'après [12]. Ainsi, il n'existe plus qu'une seule solution pour β_2 et δ . Une fois toutes les caractéristiques de l'écoulement connues, il est possible de déterminer un coefficient de réflexion :

$$\frac{P_r}{P_x} = \frac{(7M_r^2 - 1)(7M_0^{n^2} - 1) - 36}{42(M_0^{n^2} - 1)} \quad (29)$$

Cas de la réflexion de Mach

Comme mentionné plus haut, il existe un angle d'incidence limite β_{lim} à partir duquel la réflexion oblique n'est plus possible, et c'est alors que la réflexion de Mach apparaît. En effet, dans le cas de la réflexion oblique, l'onde réfléchie se propage dans un milieu choqué et plus dense, et se déplace donc plus rapidement que l'onde incidente. Elle peut alors, dans certaines conditions, finir par la rattraper et donner naissance à un pied de Mach (Figure 1-16). La zone située derrière le pied de Mach subit un choc plus important, avec une augmentation de pression de 10 à 50 %, et est

séparée de la zone ayant subi deux chocs par une ligne de glissement que ne traverse aucun flux de matière. Cette ligne de glissement part du point d'intersection des trois chocs, nommé le point triple. Dans la configuration illustrée par la Figure 1-16, le point triple s'éloigne de la paroi et par conséquent le pied de Mach grandit durant sa propagation, comme étudié dans [95], [96] ; dans certains cas, l'effet inverse est possible, avec un point triple qui se rapproche de la surface [97].

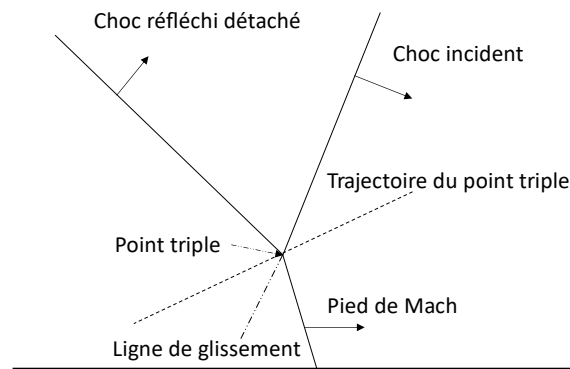


Figure 1-16 : Phénomène de réflexion de Mach, d'après [12].

Dans le cas de la réflexion de Mach, il est également plus complexe de déterminer les valeurs thermodynamiques derrière les chocs ; en effet, le fluide dans la partie supérieure de l'écoulement initial traverse deux chocs obliques tandis que la partie inférieure rencontre un seul choc droit, ce qui crée des états thermodynamiques différents derrière ces deux zones et aboutit à la formation d'une ligne de glissement séparant les deux états. Il est par conséquent courant d'utiliser des abaques comme ceux de l'UFC 3-340-02 [63], à l'instar de celui présenté dans la Figure 1-17, pour effectuer ces calculs. On remarque une forte augmentation du coefficient de réflexion aux environs de $\beta = 40^\circ$, qui traduit la transition de la réflexion oblique régulière à la réflexion de Mach. Cet effet de Mach a notamment été étudié dans [98].

1.4 Propagation d'une onde de choc

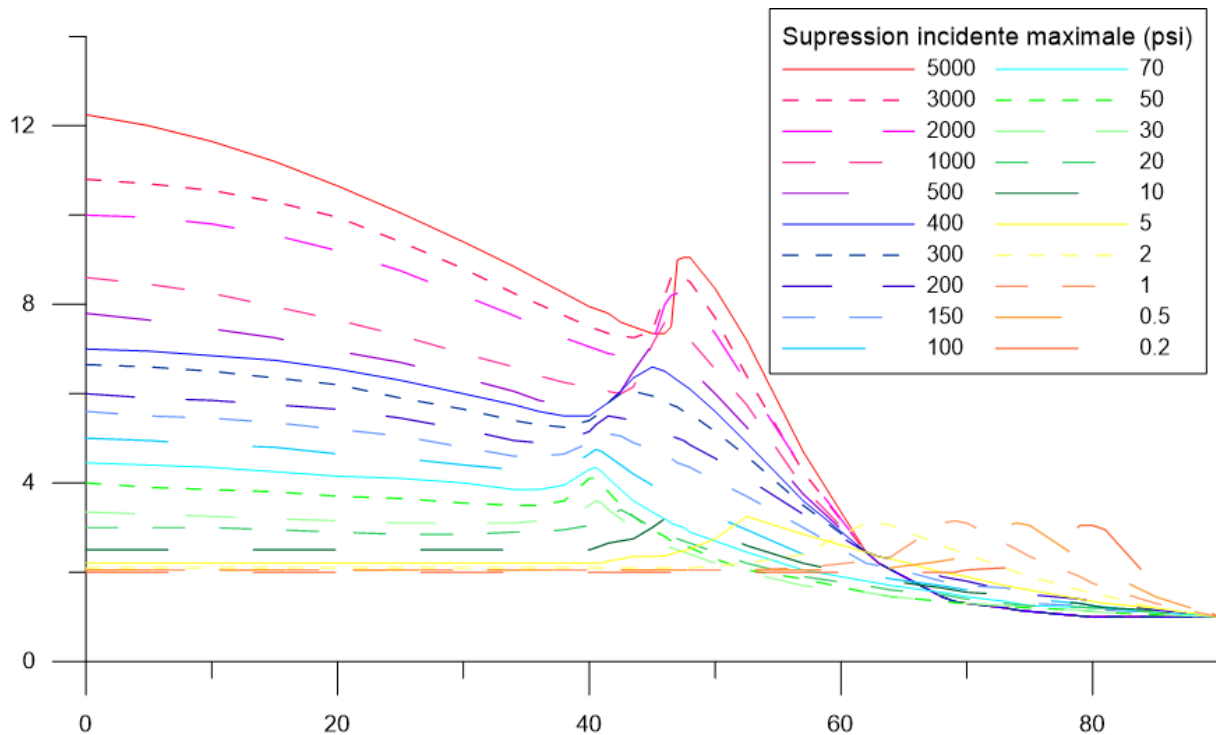


Figure 1-17 : Coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence β , d'après [63].

L'étude de ces régimes est la source de nombreux travaux, comme ceux de Mouton [99], qui a étudié les différents domaines de réflexion de choc. Une liste détaillée des différents types de réflexion est présentée dans la Figure 1-18, tirée de [97], dont les ramifications dépendent de critères comme la célérité du choc et la trajectoire du pied de Mach. Ainsi, le passage de la réflexion régulière (RR) à la réflexion irrégulière (IR) se produit quand le nombre de Mach derrière l'onde de choc réfléchi devient inférieur à 1, et les différents types de réflexion de Mach dépendent de la trajectoire du point triple, suivant qu'il se rapproche de la surface de réflexion (réflexion de Mach inverse - InMR) ou qu'il s'en éloigne (réflexion de Mach directe - DiMR) ; par ailleurs, dans le cas de la réflexion de Mach inverse, lorsque le point triple atteint la paroi, la réflexion irrégulière bascule en réflexion régulière.

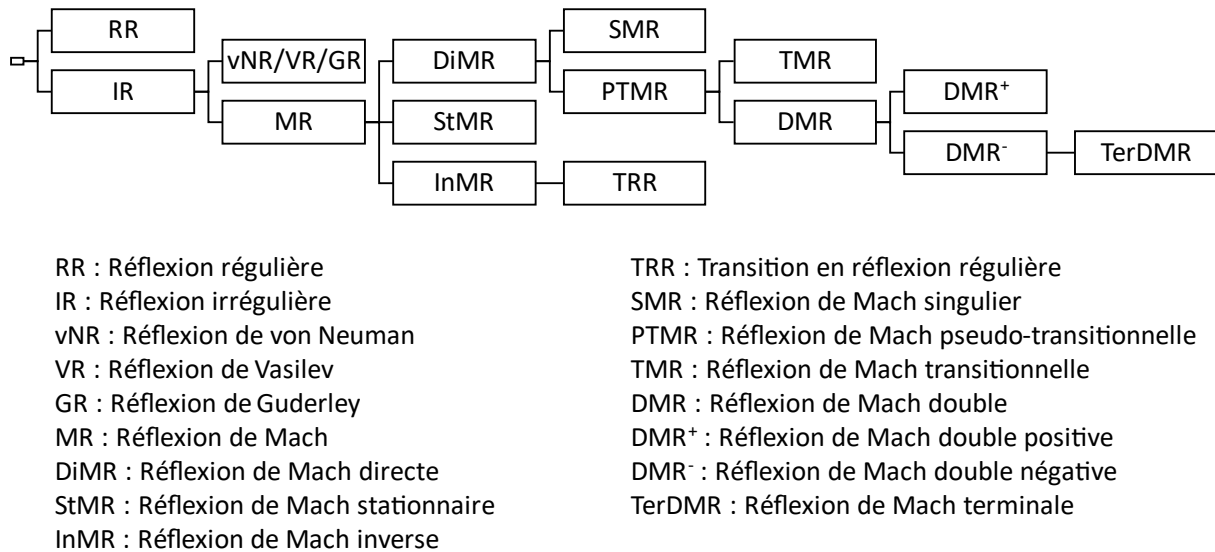


Figure 1-18 : Représentation des différents types de réflexion d'onde de choc, d'après [97].

1.4.3.2 Interaction avec une structure

L'interaction entre l'onde de choc générée par une explosion et une structure a commencé à être particulièrement étudiée à partir de la première guerre mondiale, par exemple au travers des travaux d'Hopkinson sur la loi de similitude [3]. Jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, très peu d'informations sur le sujet ont été rendues disponibles en raison de leur caractère sensible. Les premiers travaux réalisés et publiés après la guerre étaient basés sur des essais mettant en jeu des milliers de tonnes d'explosif, afin notamment de reproduire les effets d'une explosion nucléaire [90], [100], [101], les mesures étant effectuées à grande distance des charges considérées. Cette distance à la charge permet en effet à l'onde de choc de se développer largement, et ainsi d'atteindre une géométrie proche de celle d'une onde plane comparativement à la taille des structures étudiées, et ces essais ont permis l'élaboration de modèles prédictifs comme ceux de Kinney & Graham [12] ou encore Kingery [90]. Les travaux présentés dans cette thèse portant sur l'interaction entre une onde de souffle et un obstacle hémicylindrique, seules les études menées sur des géométries convexes seront développées ici.

En particulier, Glasstone [30] (chapitre IV) a établi des modèles permettant de prédire la surpression générée par une explosion nucléaire autour d'obstacles

1.4 Propagation d'une onde de choc

sphériques et hémicylindriques. Ainsi, lorsque l'onde de souffle générée par une explosion impacte la surface d'une structure voûtée, la Figure 1-19 indique que la pression augmente tout d'abord jusqu'à atteindre une pression P_1 , qui dépend de la pression réfléchie, en un temps t_1 nul en face avant, puis positif, ce qui traduit une moindre raideur du front de choc. Ensuite, la pression diminue rapidement à cause de la formation de vortex, avant de revenir à la pression d'arrêt P_3 (Figure 1-19) en un temps t_3 . S'ensuit une décroissance exponentielle de pression derrière l'onde de souffle. Un abaque, présenté en Figure 1-20, est également donné afin de déterminer les différentes valeurs de pression et de temps évoqués plus haut, ainsi que la valeur du coefficient de traînée autour de l'obstacle.

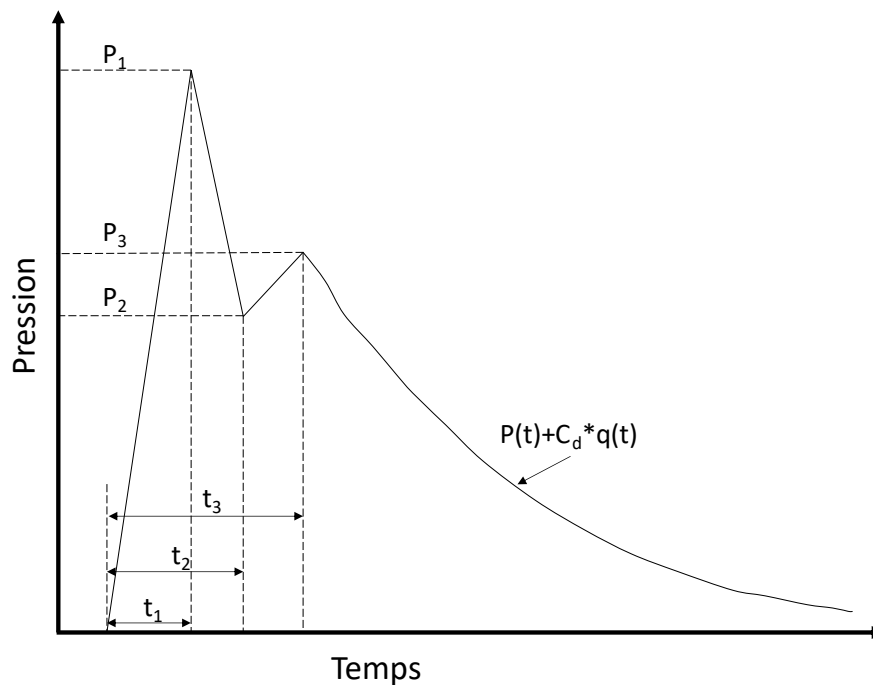


Figure 1-19 : Profil de pression à la surface d'une structure voûtée, d'après [30].

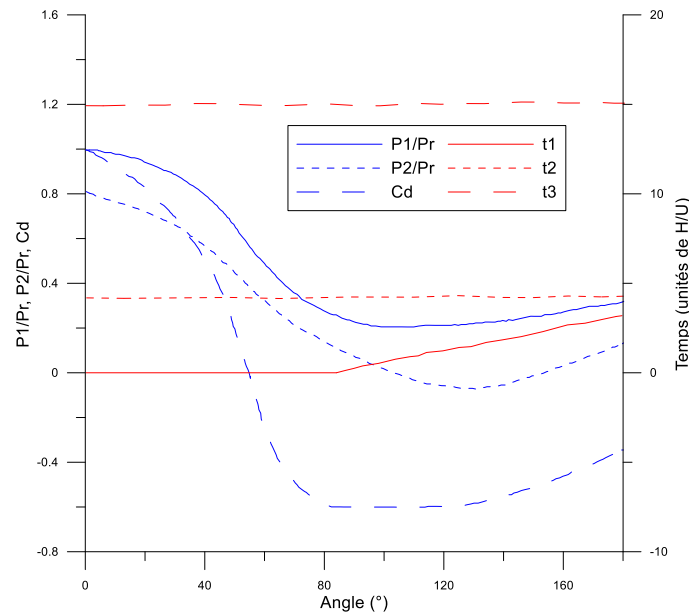


Figure 1-20 : Évolution des coefficients de pression, de traînée et des intervalles de temps pour une structure voûtée, d'après [30].

Ces modèles sont pratiques pour déterminer la surpression à laquelle des structures peuvent se trouver exposées, mais en raison des grandes distances considérées plus haut, ils ne sont valables que dans le cas où les surpressions sont inférieures à 50 psi (soit 3,45 bar) et l'obstacle se trouve dans la région de réflexion de Mach, ce qui correspond à une onde incidente quasiment plane.

Par la suite, de nombreux essais ont été réalisés en tube à choc afin d'étudier les différents régimes de réflexion d'onde [102], notamment sur des surfaces convexes ou concaves [94], [103], [104], pour des écoulements stationnaires, pseudo-stationnaires, ou non stationnaires. Réalisés en tube à choc, avec une onde de choc plane impactant un obstacle convexe, ces essais ont permis d'étudier l'évolution de la réflexion lors de la propagation du choc à la surface de l'obstacle. Ainsi, Bazhenova *et al.* [105] remarquent que la réflexion de l'onde sur une surface convexe est un phénomène non stationnaire, et qu'elle transite d'une réflexion régulière à une réflexion de Mach à mesure que l'angle d'incidence de l'onde augmente (Figure 1-21) ; de plus, le point triple suit une trajectoire incurvée et ne se déplace pas à vitesse constante.

1.4 Propagation d'une onde de choc

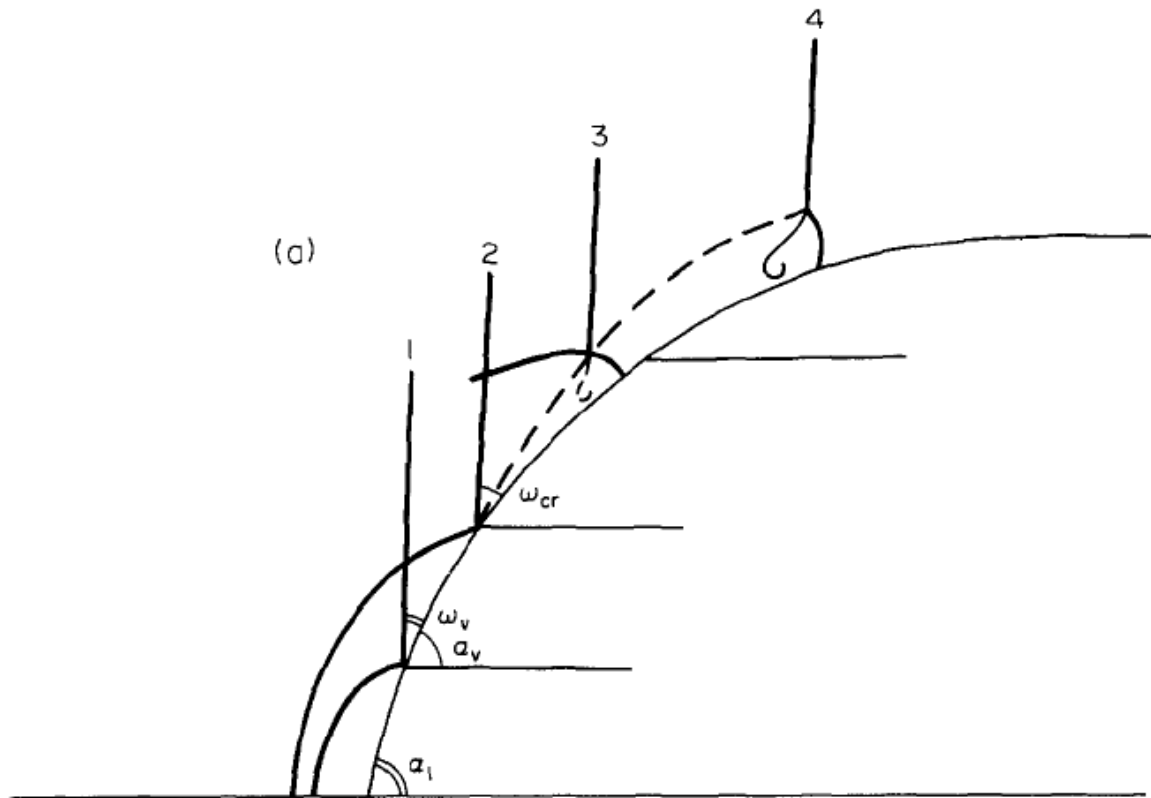


Figure 1-21 : Évolution de la réflexion d'une onde de choc à la surface d'un obstacle convexe, d'après [105].

Toutefois, les vitesses du point d'intersection de l'onde et de la surface ou encore du point triple n'étant pas constantes, Bazhenova *et al.* considèrent que la théorie des deux chocs [97] ou trois chocs [106], [107] n'est pas applicable. Par ailleurs, il est mentionné que des réflexions de Mach double ou complexe peuvent avoir lieu, mais avec des angles de transition différents. Ben Dor complète cette étude dans [97], où il mentionne 4 types de réflexions survenant successivement et toujours dans le même ordre : réflexion régulière, puis réflexion de Mach double, puis réflexion de Mach transitionnelle, et enfin une réflexion de Mach singulier (Figure 1-22 gauche) ; ces types de réflexion correspondent à ceux identifiés par Bazhenova, mais ici Ben Dor précise que la réflexion de Mach double a lieu systématiquement durant la transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach singulière. Il indique par ailleurs que dans le cas d'un cylindre tronqué (Figure 1-22 droite), les mêmes régimes de réflexion sont observés, dans le même ordre, et seul change le type de réflexion initiale, qui dépend de l'angle θ_w formé par la tangente à l'obstacle au point d'impact de l'onde.

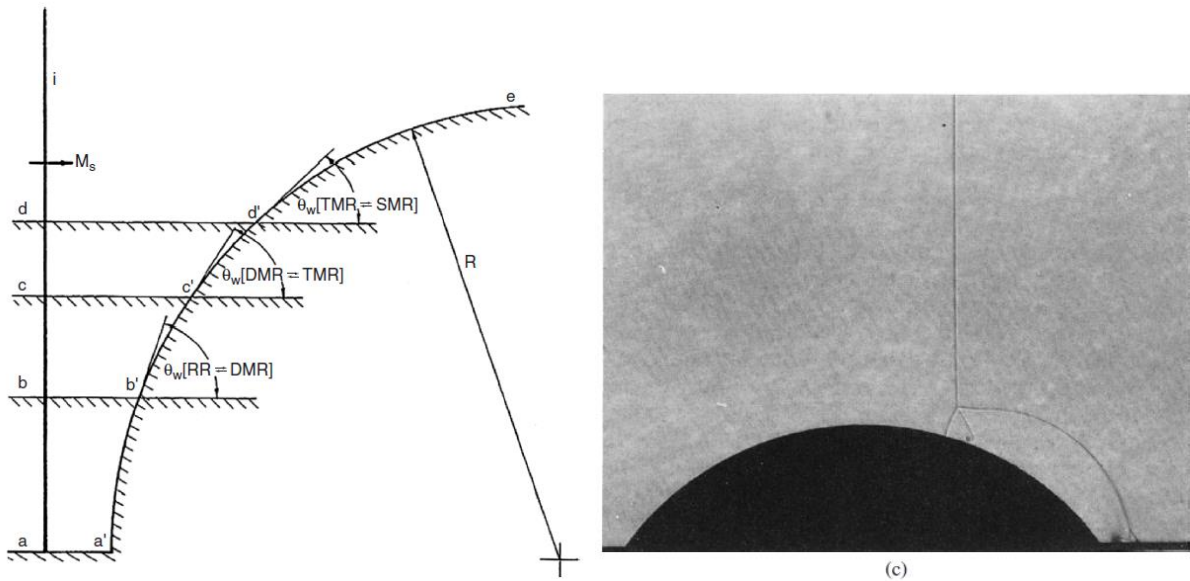


Figure 1-22 : Réflexions successives sur une surface convexe, et réflexion de Mach transitionnelle à la surface d'un cylindre tronqué, d'après [97].

Kaca [108] observe également une transition en réflexion de Mach double et en réflexion de Mach complexe [109], bien que les réflexions régulières et de Mach soient majoritaires. Il identifie également que pour un nombre de Mach inférieur à 4, les résultats obtenus à la surface d'un obstacle semi-cylindrique sont similaires à ceux obtenus avec des chocs obliques, en considérant l'angle formé par la tangente en un point de l'obstacle. Toutefois, cette considération devient caduque quand l'onde dépasse le sommet de l'obstacle. Les résultats numériques de Drikakis [110] confirment l'évolution de la réflexion autour de l'obstacle, et montrent par ailleurs que la réflexion de Mach singulier est remplacée par une réflexion de Mach transitionnelle pour un nombre de Mach de 5.

Toutefois, si les critères de transition de la réflexion régulière à une réflexion irrégulière sont connus pour les écoulements stationnaires [102] ou pseudo-stationnaires [107], il ne semble pas exister de critère simple pour caractériser cette transition dans le cas instationnaire et le recours à des méthodes numériques semble nécessaire pour la prédire [107], [110]. Skews & Kleins [111] ont également établi que, lors de la propagation de l'onde le long d'un obstacle convexe, l'écoulement derrière l'onde de choc réfléchie devient subsonique et donc, le critère sonique de détachement ne peut s'appliquer à cette configuration. Eux aussi concluent quant à la nécessité de

1.4 Propagation d'une onde de choc

réaliser des simulations numériques à haute résolution, malgré le problème posé par le manque de précision de celles-ci dû à la discrétisation du maillage.

Plusieurs études numériques ont été réalisées dans les années 2010 afin d'étudier la propagation d'ondes de choc [112]–[114] et les phénomènes de réflexion d'ondes à la surface d'obstacles convexes [115], [116]. En particulier, Krassovskaya et Berezkina [117] ont simulé l'interaction d'une onde de choc plane avec un polyèdre circonscrit à un cylindre pour un nombre de Mach donné ($M = 2,4$), et avec une surface convexe pour trois nombres de Mach différents ($M \in [1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 1,5 ; 2,5 ; 5,0]$). Dans le cas d'un choc à faible nombre de Mach (Figure 1-23 gauche), seules les réflexions régulières et de Mach singulier sont observées, tandis qu'à une célérité intermédiaire, on observe la transition réflexion régulière $\rightarrow$ réflexion de Mach transitionnelle $\rightarrow$ réflexion de Mach double (Figure 1-23 droite). Enfin, dans le cas d'une onde de choc forte, la réflexion régulière transite directement en réflexion de Mach double (Figure 1-24).

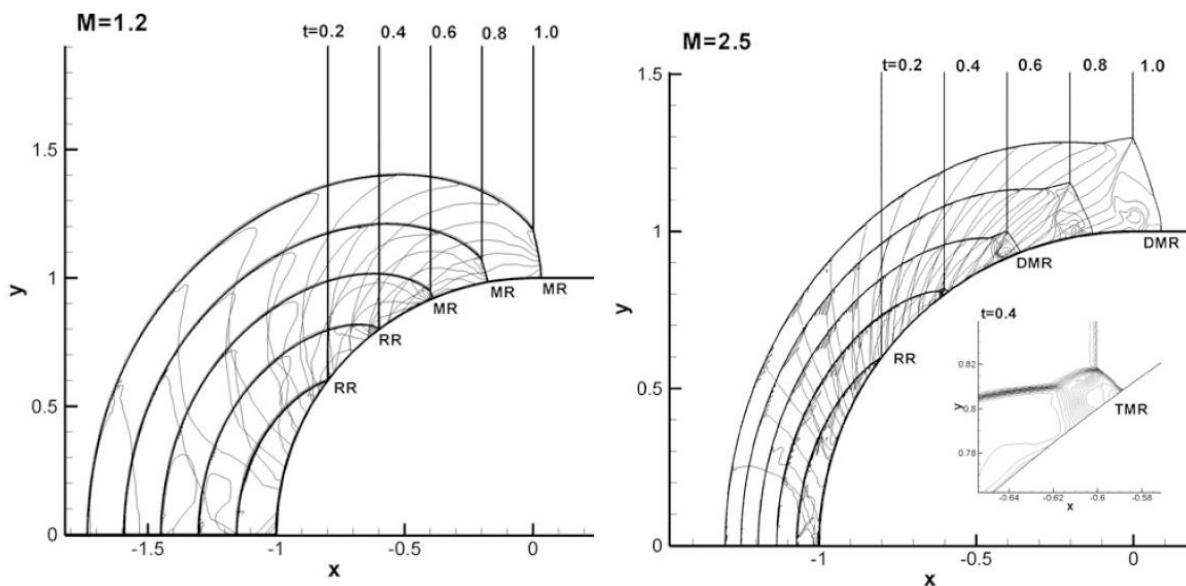


Figure 1-23 : Réflexion d'une onde de choc sur une surface convexe pour $M=1,2$ (gauche) et $M=2,5$ (droite), d'après [117].

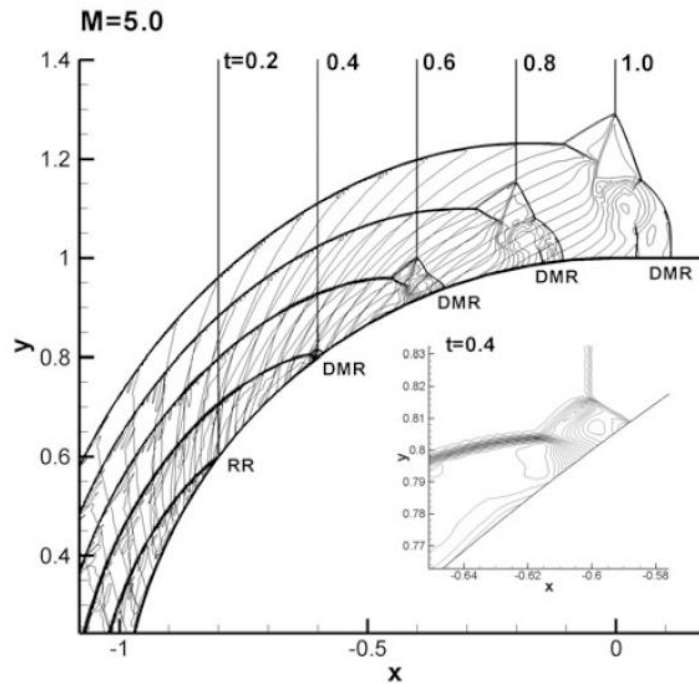


Figure 1-24 : Réflexion d'une onde de choc sur une surface convexe pour $M=5$, d'après [117].

Ainsi, bien que les phénomènes de réflexion obtenus ici soient identiques à ceux identifiés dans [97], leur succession diffère légèrement, avec notamment une réflexion de Mach double au sommet du cylindre pour les nombres de Mach supérieurs à 2,5, contrairement à la réflexion de Mach singulier prévue.

En 2017, Geva *et al.* [118] ont étudié en particulier la transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach singulier d'un écoulement instationnaire sur une surface convexe. Grâce à un système de visualisation à haute précision et un algorithme de traitement des images obtenues, ils ont pu analyser l'influence de différents paramètres géométriques sur la transition et l'évolution du pied de Mach. Leur première constatation a été que seul le rayon de courbure de la surface exerçait une influence sur la transition. Ils ont également mis en évidence le fait que, pour des nombres de Mach de 1,3 et 1,5, la variation continue de « pente » entraîne une modification continue de l'orientation de l'onde réfléchie, et donc de l'angle entre l'onde incidente et elle. En particulier, il a été noté que la transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach singulier se produit quand les ondes incidente et réfléchie sont perpendiculaires, et cela a donc été proposé comme nouveau critère de transition, en plus d'une modification de la théorie des deux chocs afin d'intégrer le cas instationnaire.

1.4 Propagation d'une onde de choc

Cependant, tous les résultats présentés ci-dessus ont été obtenus avec des ondes de choc planes stationnaires. Ainsi, d'autres études ont été menées afin d'étudier les effets d'ondes tridimensionnelles issues de la détonation d'explosifs sur des obstacles cylindriques. Par exemple, Shi *et al.* [119] ont analysé le chargement généré par la détonation de TNT sur des colonnes en béton de forme rectangulaire ou cylindrique. Il en résulte que la largeur de l'obstacle a un effet important sur le coefficient de réflexion sur la face avant, qui est d'autant plus élevé que l'obstacle est large ; cet effet tend toutefois vers une limite quand l'obstacle est plus loin de la charge. Par ailleurs, si la réflexion est plus faible sur la face avant des colonnes cylindriques, la diffraction est plus forte sur leur face arrière, avec une pression plus élevée.

De la même façon, Zhi *et al.* [120] ont étudié l'interaction entre une onde de souffle et un dôme hémisphérique surélevé, et ont comparé leurs résultats expérimentaux à des simulations numériques réalisées avec LS-Dyna, Conwep et Autodyn, afin de développer des formules prédisant les paramètres de l'onde de souffle autour de l'obstacle (surpression, impulsion...) en fonction de ses caractéristiques géométriques. Ces essais leur ont également permis de mettre en évidence un « effet symétrique », à savoir que la distribution des paramètres de l'onde à la surface de l'obstacle est symétrique par rapport à la direction de propagation du choc (Figure 1-25). Qi *et al.* [121] ont poursuivi cette étude en réalisant des essais avec un dôme plus surélevé, et ont notamment montré que l'« effet symétrique » était également applicable au cas d'un dôme monté sur un cylindre. Ils ont par ailleurs démontré que des variables adimensionnées (largeur/masse d'explosif, distance à la charge/largeur, surélévation/largeur ou encore hauteur/largeur) exerçaient une influence majeure sur la distribution de l'onde de souffle à la surface du dôme. De plus, leurs résultats montrent que les prédictions de l'UFC 3-340-02 [63] pour des surfaces planes inclinées ne sont pas applicables dans le cas d'un dôme hémisphérique, l'écart relatif entre la pression (resp. impulsion) mesurée expérimentalement et les prédictions pouvant atteindre -150% (resp. -90%).

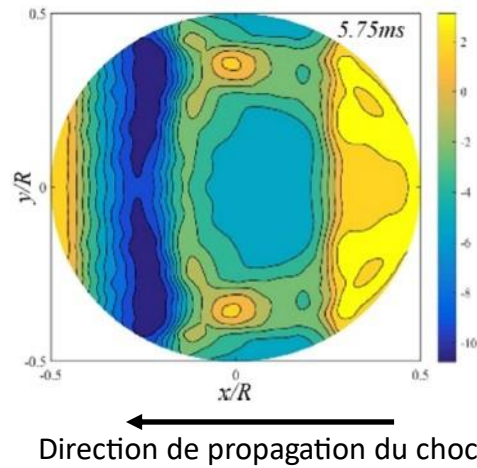


Figure 1-25 : Répartition de la pression à la surface d'un dôme hémisphérique, d'après [120].

Dans sa thèse, Duong [122] a étudié l'interaction de structures cylindriques réduites exposées à la détonation d'une charge gazeuse de propane-oxygène. Ses travaux lui ont permis de décliner des corrélations de la forme de l'équation (30) afin de prédire l'évolution des paramètres de l'onde incidente en champ libre.

$$\ln(X) = A \ln(\lambda)^3 + B \ln(\lambda)^2 + C \ln(\lambda) + D \quad (30)$$

Il a également réalisé des essais avec des obstacles hémicylindriques, dont certains avaient pour but de déterminer le chargement autour de ces derniers. Un cylindre vertical en PVC était équipé de trois capteurs situés le long d'une de ses génératrices, et cet obstacle pouvait pivoter afin de mesurer les caractéristiques de l'onde de souffle pour différents angles d'observation. Ces expériences lui ont permis de développer des polynômes basés sur l'équation (30) afin de prédire la surpression réfléchie pour les différents angles d'observation en fonction de leur distance réduite λ énergétique à la charge (Tableau 1-1 et Figure 1-26).

Tableau 1-1 : Coefficients de l'équation (30) pour différents angles d'observation, d'après [122].

Angle d'observation (°)	0	30	60	90	120
$[\lambda_{min}; \lambda_{max}]$	[0,57 ; 6,66]	[0,66 ; 6,75]	[0,88 ; 7,32]	[1,04 ; 7,66]	[1,16 ; 9,02]
A	0	0	0	0	0
B	0,274	0,136	0,0029	0,103	0,189
C	-2,116	-1,765	-1,172	-1,311	-1,414
D	1,102	0,815	0,16	-0,366	-0,996

1.4 Propagation d'une onde de choc

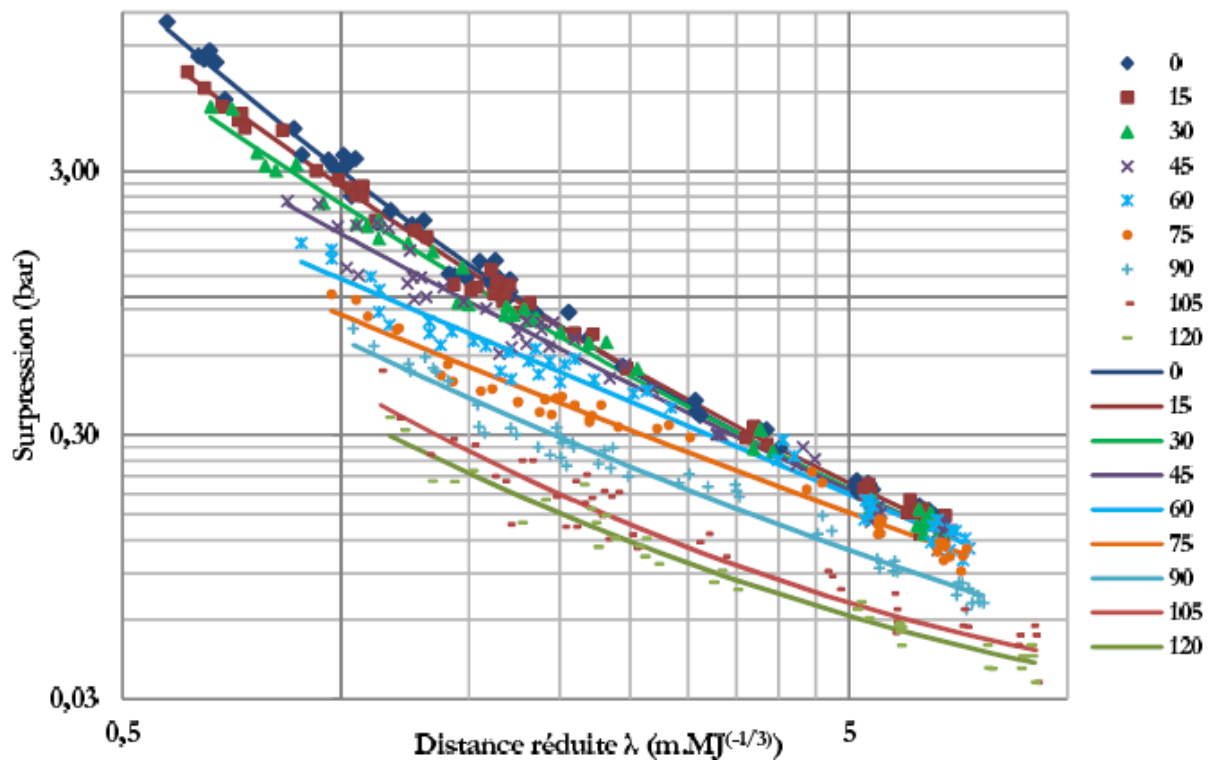


Figure 1-26 : Surpression réfléchie à la surface d'un cylindre pour différents angles d'observation en fonction de la distance réduite, d'après [122].

Afin de reproduire les effets d'une forte explosion sur un conteneur de transport ou une installation industrielle, Trélat *et al.* [123] ont réalisé des travaux avec une structure hémicylindrique soumise à la détonation d'une charge d'Hexomax®. Le dispositif à échelle réduite utilisé a été validé par des travaux antérieurs étudiant la propagation de souffle en champ libre [124], les réflexions d'ondes sur des obstacles plan [125], ou encore comparant les résultats expérimentaux obtenus en présence d'un obstacle hémicylindrique avec des simulations numériques réalisées sous LS Dyna [115]. Durant les essais présentés dans [123], l'obstacle, d'un diamètre de 0,40 m et d'une longueur d'1,60 m, était placé à trois distances différentes (0,4, 0,6 et 1,6 m) de la charge équivalente à 50 g de TNT en surpression. Si la surpression sur la face avant de l'hémicylindre pouvait être prédite en utilisant l'UFC 3-340-02 [63] pour des réflexions obliques, le chargement sur la face arrière, située dans la zone de diffraction de l'onde, ne pouvait être anticipé. Un modèle prédictif a alors été proposé pour déterminer la surpression dans cette zone. L'utilisation d'un coefficient de transmission, défini comme le ratio entre la surpression mesurée en un point de l'hémicylindre et celle mesurée en champ libre au même endroit permet de comparer

directement les résultats à différentes échelles. Le modèle permet de déterminer ce coefficient en fonction d'une distance directe réduite adimensionnée (DDRA) tenant compte de la géométrie de l'obstacle et des phénomènes de réflexion d'onde de la façon suivante (cf. Figure 1-27) :

$$C_t = 0,396 * DDRA^2 - 1,4385 * DDRA + 1,347 \quad (31)$$

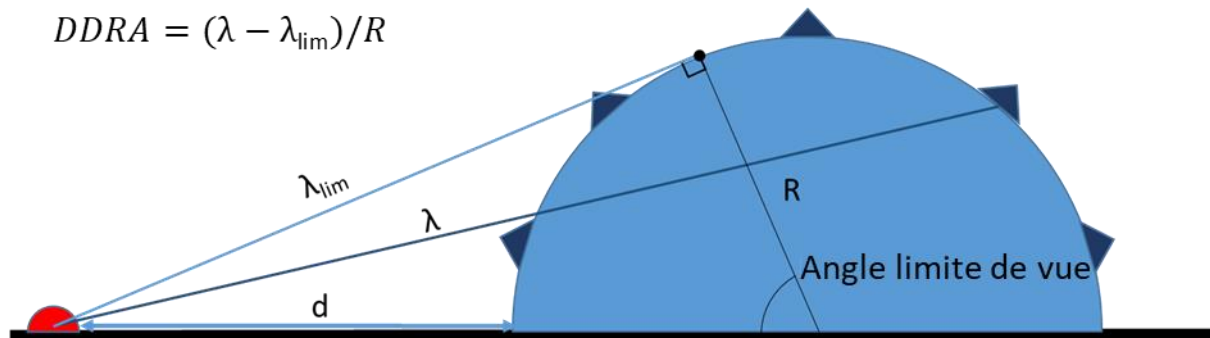


Figure 1-27 : Définition de la DDRA, d'après [123].

C'est dans le prolongement de ces derniers travaux que s'inscrit la thèse présentée ici ; si la littérature décrivant l'interaction entre une onde de choc plane et un obstacle convexe est importante, elle détaille essentiellement cette interaction d'un point de vue phénoménologique. Ainsi, l'analyse quantitative des effets du passage d'une onde de souffle sphérique (notamment la surpression) est peu développée, ce que l'étude présentée ici cherche à compléter. Nombre d'infrastructures courantes (silos, cheminées d'usines, camions citernes...) ou critiques (bâtiments réacteurs de centrales nucléaires, colis de matières nucléaires...) étant de forme cylindrique, c'est cette géométrie particulière qui a été étudiée. Afin de simplifier l'étude de l'interaction entre l'onde de souffle générée par une charge sphérique et une structure cylindrique, les installations expérimentales ont été conçues en considérant le sol comme un plan de symétrie (Figure 1-28) ; cette configuration permet notamment de s'affranchir des effets de pied de Mach inhérents à la détonation aérienne d'une charge explosive sphérique.

1.4 Propagation d'une onde de choc

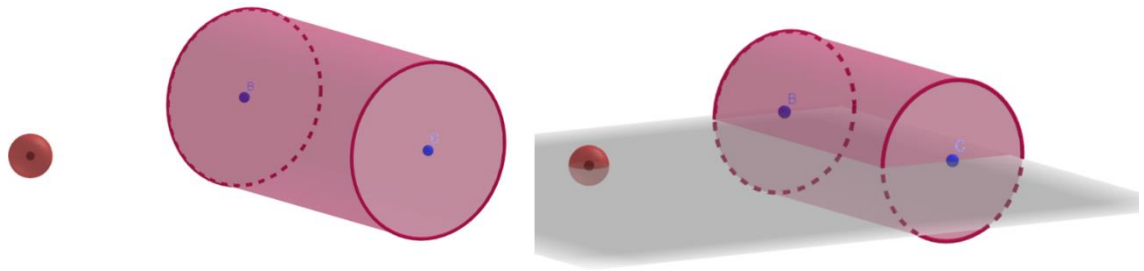


Figure 1-28 : Comparaison entre l'étude d'une structure cylindrique ou hémicylindrique

Le chapitre suivant décrit les dispositifs expérimentaux employés afin de poursuivre l'étude de [123], avant que la dernière partie ne présente les résultats expérimentaux obtenus.

1.5 Diagnostics

Plusieurs moyens de métrologie peuvent être mis en œuvre afin de mesurer les paramètres d'une onde de souffle, comme sa trajectoire ou la pression. Cette dernière peut être mesurée grâce à différentes méthodes :

- Des capteurs utilisent l'effet piézo-électrique : étudié par Becquerel [126] puis démontré par les frères Curie [127], celui-ci repose sur la propriété de certains matériaux à générer des charges électriques proportionnellement à la contrainte mécanique exercée sur eux. Ils sont donc particulièrement adaptés à la mesure de pression et sont couramment utilisés pour la mesure d'ondes de souffle générées par des explosifs condensés ou des explosions gazeuses [128]–[132]. Les capteurs PVDF sont basés sur les propriétés piézo-électriques du polyfluorure de vinylidène [133], [134] et présentent des temps de réactions très rapides, mais sont toutefois complexes à mettre en œuvre [135].
- D'autres capteurs sont basés sur l'effet piézorésistif, découvert par Lord Kelvin en 1857 [136] et développé par Smith [137] en 1954 pour le silicium et le germanium ; les matériaux piézorésistifs présentent une résistance électrique qui varie en fonction de la contrainte mécanique subie, et cette variation peut être mesurée grâce à un pont de Wheatstone [138]. Des capteurs basés sur cette technologie ont été développés par Keough [139] pour mesurer des pressions inférieures à 40 kbar, ou encore avec différents matériaux [140], notamment des jauges de déformation au manganin. Ces capteurs sont d'ailleurs utilisés régulièrement pour mesurer les pressions générées par des ondes de souffle en champ libre [141] ou sur des structures [142], notamment des pressions quasi-statiques [143].
- Les capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg sont un type de fibre optique à la structure périodique réfléchissant une longueur d'onde particulière [144]. Lorsque cette fibre est soumise à une variation de pression, la longueur d'onde réfléchie varie également, et il est donc possible d'utiliser ces fibres pour mesurer le saut de pression à travers une onde de souffle [145], [146].
- L'évaluation de la surpression maximale peut également être réalisée en mesurant la déformation de structures standardisées. Ainsi, Needham [76] évoque l'utilisation de canettes de bière de 12 onces liquides (environ 350 ml)

1.5 Diagnostics

dont la variation de volume après le passage de l'onde permettait de déterminer la surpression maximale appliquée sur ces canettes. Igra et Seiler [147] décrivent l'utilisation de poutres cantilever que le passage de l'onde de souffle courbe, et qui sont sensibles aux forces dynamiques et de traînée ; ces barres permettent notamment de déterminer la hauteur de la couche limite d'une onde de souffle.

De nombreuses techniques existent également pour suivre la propagation dans l'air de l'onde de souffle générée par une explosion, souvent grâce à une caméra rapide. Durant les premiers essais nucléaires, des fusées fumigènes étaient lancées dans le ciel avant la détonation, et la propagation de l'onde de souffle déformait alors les traînées de fumée, permettant de suivre sa trajectoire [76]. Ce même principe est utilisé avec des ballons de fumée disposés en quadrillage afin de suivre la propagation du choc horizontalement et verticalement ; le positionnement régulier des ballons permet alors de déterminer le temps d'arrivée de l'onde à chaque position, puis de remonter aux autres paramètres de l'onde de souffle grâce aux équations de Rankine-Hugoniot [76]. Le changement de densité derrière l'onde de souffle engendre une modification de l'indice de réfraction de l'air qui peut être visualisé directement à l'aide d'une caméra rapide ; associé à des marqueurs donnant l'échelle de l'image, il est alors possible de suivre la progression du front de choc [147], [148], et l'utilisation d'un fond peint avec des motifs permet de mieux suivre le front [76]. Ces variations de densité peuvent également être observées avec un dispositif basé sur l'interférométrie [76] ou l'effet Schlieren [149].

En revanche, la mesure de la température derrière l'onde de souffle est particulièrement complexe [76], [147]. En effet, les thermocouples habituellement utilisés sont trop épais pour avoir le temps de réponse attendu de l'ordre de la milliseconde, et ceux conçus avec de fins fils sont fragiles et résistent mal au passage de l'onde de souffle [76]. Ainsi, Igra et Seiler [147] conseillent de déterminer la température à partir de la mesure d'autres paramètres comme la pression et la densité. Toutefois, les fibres optiques à réseaux de Bragg semblent capable de mesurer des températures derrière un front de choc [150] en plus de la pression, et le CEA-List a réussi à développer des fibres résistant à des températures jusqu'à 900°C [151].

Enfin, il est également possible d'utiliser des accéléromètres, capteurs de force ou hydrophones pour mesurer la déformation et la pression à l'intérieur de structures [148], [152], ou encore des caméras rapides pour étudier la déformation de matériaux soumis à une onde de choc grâce à la corrélation d'images numériques [153], méthode déjà employée pour des essais sous contrainte statique [154].

La présentation ici faite des différents moyens de mesure n'est pas exhaustive, et une description plus détaillée des méthodes applicables au suivi des ondes de souffle peut être trouvée dans les travaux de Reisler *et al.* [155]–[157], Yang [158], ou encore ceux de Needham [76] ou Igra et Seiler [147].

1.6 Principes de similitude

La réalisation d'essais à échelle réelle étant complexe et coûteuse, il est pratique et utile de concevoir des installations répliquant une configuration à l'échelle réduite du laboratoire. Cela est possible grâce à la loi de similitude d'Hopkinson-Cranz [3] qui indique que : si un observateur situé à une distance r d'une charge explosive de rayon R_0 est soumis à une surpression ΔP et une impulsion I^+ , alors un observateur situé à une distance kr d'une charge de rayon kR_0 sera soumis à la même surpression ΔP mais subira une impulsion positive kI^+ , comme illustré dans la Figure 1-29. La distance réduite massique $Z = \frac{r}{\sqrt[3]{m}}$ (avec m la masse de la charge considérée) est ainsi souvent utilisée pour comparer des résultats obtenus dans des configurations avec des rapports d'échelle différents.

1.6 Principes de similitude

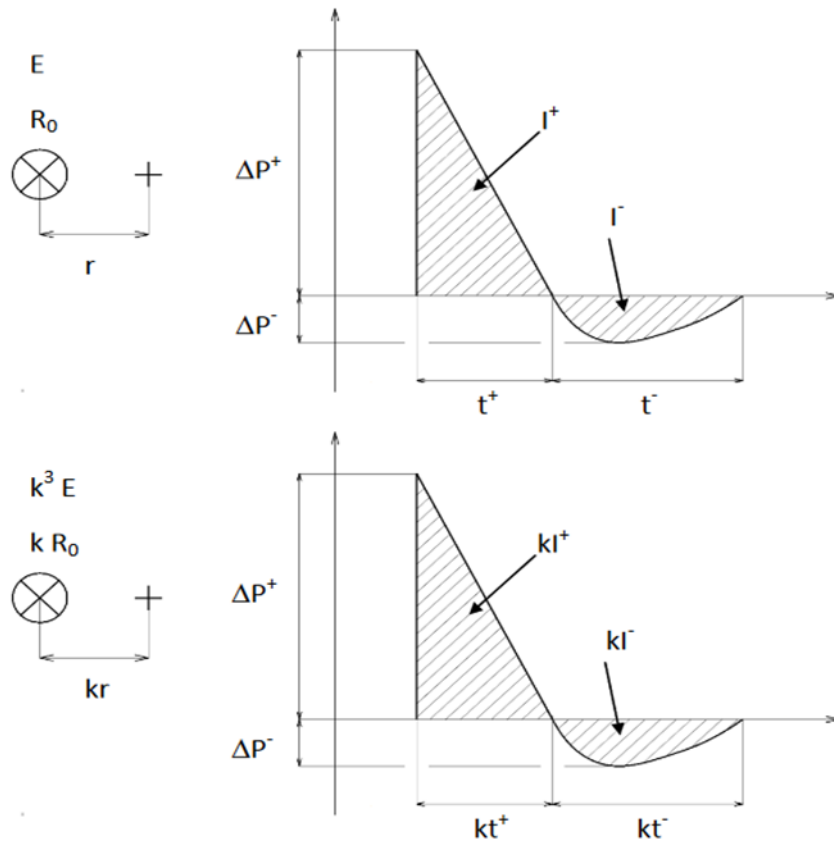


Figure 1-29 : Principe de similitude d'Hopkinson-Cranz [89].

Dans le cas où les paramètres ambiants diffèrent grandement entre deux configurations, par exemple dans le cas de détonations ayant lieu à haute altitude, il est également possible d'utiliser la similitude de Sachs, qui prend en compte des paramètres adimensionnels (présentés dans le Tableau 1-2) basés sur la pression atmosphérique P_0 et la célérité a_0 du son.

Tableau 1-2 : Paramètres de la similitude de Sachs.

$\bar{d} = d \left(\frac{P_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}}$	Distance adimensionnée
$\bar{\Delta P} = \frac{\Delta P}{P_0}$	Pression adimensionnée
$\bar{I} = \frac{I a_0}{E^{\frac{1}{3}} P_0^{\frac{2}{3}}}$	Impulsion adimensionnée
$\bar{t} = t a_0 \left(\frac{P_0}{E} \right)^{\frac{1}{3}}$	Temps adimensionné

2 Installations et Méthodes Expérimentales

Avant d'analyser les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette thèse, il est important de décrire les installations qui ont permis leur acquisition. Dans le cadre de la coopération IRSN-ISL [159], les deux instituts ont développé une série de campagnes expérimentales multi-échelles basées sur le principe de similitude d'Hopkinson décrit précédemment. Cette section s'attache donc à présenter l'installation expérimentale de l'IRSN qui est l'installation à l'échelle originale [115], ainsi que celle de l'ISL qui en est une transposition à échelle double. Seront également présentés les déroulements des campagnes expérimentales réalisées à l'IRSN et l'ISL. Enfin, la méthodologie utilisée afin de déterminer les incertitudes expérimentales associées aux mesures réalisées sera détaillée, ainsi qu'un algorithme Python développé pour traiter les images obtenues à l'ISL.

2.1 Installation Expérimentale de l'IRSN

2.1.1 Table à détonation

La table à détonation (2,40 x 1,60 m) se compose d'une armature métallique sur laquelle reposent 20-trois plaques modulaires carrées en bois (40x40x5 cm), et a été dimensionnée pour réaliser des essais avec une charge explosive de masse allant jusqu'à 64 g d'équivalent TNT [124] ; elle est schématisée dans la Figure 2-1. Une 20-quatrième plaque en acier est dédiée au support de la charge explosive. Tous ces modules sont percés afin d'accueillir des capteurs affleurant comme des sondes de pression (à raison de neuf orifices par plaque soit un espacement inter-capteurs de 133 mm). Les orifices non utilisés sont obturés par des bouchons afin de ne pas perturber la propagation des ondes de pression. La plaque en acier est équipée, en son centre, d'un support contenant un logement pour placer le détonateur au centre de la charge. Ces éléments, présentés dans la Figure 2-2, permettent de positionner avec précision les capteurs et la charge, et donc de d'optimiser la reproductibilité des essais. La table a aussi été conçue de manière à minimiser la transmission d'ondes mécaniques entre les modules : chaque module en bois est isolé de la table en acier par une plaque de protection en caoutchouc, tandis qu'une plaque de caoutchouc et

2.1 Installation Expérimentale de l'IRSN

une plaque en bois isolent la plaque acier sacrificielle placée sous la charge de la table ; enfin, une bande de cales en mousse est disposée pour combler les interstices séparant les modules des bords de la table. Les pieds de la table sont réglables, afin de pouvoir l'utiliser sur des sols irréguliers. La forte modularité des différents composants de la table permet aussi de fixer à sa surface des structures, dont les obstacles hémicylindriques objets de l'étude ici présente.

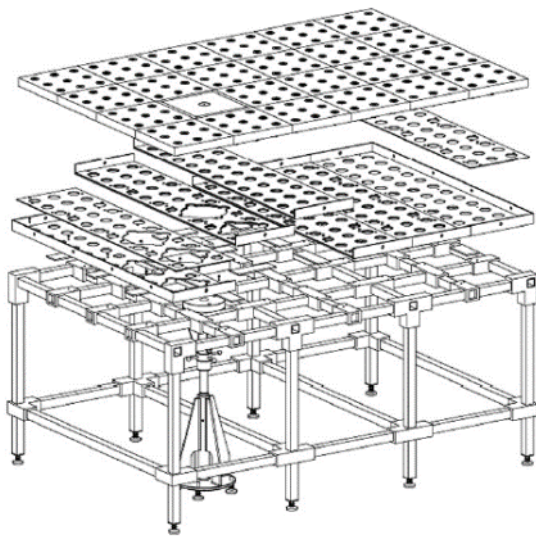


Figure 2-1 : Vue éclatée de la table à détonation utilisée lors des essais de l'IRSN, d'après [124], et photo de la table lors d'un essai en champ libre de la campagne expérimentale 9.



Figure 2-2 : Plaque en bois modulaire (gauche), plaque d'acier sacrificielle (centre) et support de charge et détonateur (droite) composant la table à détonation de l'IRSN.

2.1.2 Charges explosives

Les charges explosives utilisées sont des charges hémisphériques d'Hexomax[®], un explosif plastique produit par Eurenco et de masse volumique 1580 kg.m⁻³. L'équivalent TNT en surpression de cette explosif est de 1,2 d'après un calcul thermodynamique d'ArianeGroup basé sur le rapport des énergies massiques libérées par l'Hexomax[®] et par le TNT au cours de la détente de leurs produits de détonation ; les travaux de Jenny [160] mentionnent un équivalent de 1,27 suivant la méthode de Cooper ou 1,39 avec le Power Index, ceux de Tillet [161] un équivalent autour de 1,2, et les travaux de Trélat *et al.* [162] indiquent que cet équivalent est compris entre 1 et 1,5. En prenant un équivalent de 1,2, pour avoir une charge équivalente à 50 g de TNT, la charge hémisphérique d'Hexomax[®] doit avoir une masse de $\frac{50}{1,2} = 41,67$ g. L'Hexomax[®] étant un explosif plastique, les charges sont réalisées manuellement par un opérateur pyrotechnique à l'aide d'un moule téflonné dont les dimensions ont été déterminées en fonction de la densité apparente moyenne de l'explosif déterminée expérimentalement, comme détaillé dans l'équation (32). La masse de la charge explosive est mesurée avant et après moulage afin de vérifier que la quantité d'explosif est respectée. Le Tableau 2-1 résume les caractéristiques de ces charges.

$$M = \rho V = \rho \times \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi R^3 \Leftrightarrow R = \sqrt[3]{2 \times \frac{3}{4} \times \frac{M}{\pi \rho}} = \sqrt[3]{2 \times \frac{3}{4} \times \frac{41,67}{1,58\pi}} = 2,33 \text{ cm} \quad (32)$$

Où M est la masse de la charge explosive, ρ la densité apparente moyenne de l'explosif considéré, V le volume de la charge, et R son rayon (et par extension le rayon du moule)

Tableau 2-1 : Caractéristiques des charges explosives de l'IRSN.

Type d'explosif	Hexomax [®]
Masse (g)	41,67
Masse du relais (g) / type	N/A
Équivalent TNT de la charge + relais (g) (en surpression)	50

La charge est amorcée à l'aide d'un détonateur SA 4201A02 (Davey-Bickford) contenant 140 mg d'azoture de plomb (explosif primaire) et 100 mg de pentrite. Le détonateur est inséré dans le perçage central du support de détonateur comme illustré

2.1 Installation Expérimentale de l'IRSN

dans la Figure 2-3. Une sonde torsadée (fils de cuivre émaillé 18/10^e finement torsadés) est ajustée entre le support et la charge d'Hexomax®, afin de déclencher précisément les enregistreurs [163]. Chaque essai est répété au moins trois fois pour vérifier la reproductibilité des charges explosives et permettre l'analyse statistique des données.

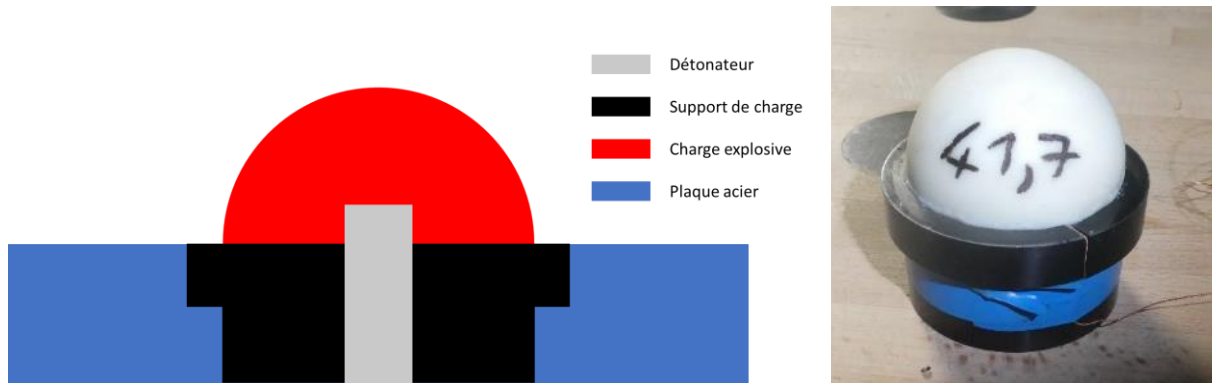


Figure 2-3 : Placement de la charge sur son support et du détonateur au milieu de celui-ci.

2.1.3 Diagnostics associés

L'onde de souffle générée par la détonation de la charge explosive à échelle réduite engendre une surpression mesurée à l'aide de capteurs de deux technologies, à savoir :

- Des capteurs de pression piézo-électriques Kistler 603B et 603CA.
- Et des capteurs piézorésistifs Kulite XTL-190.

L'utilisation conjointe des capteurs piézorésistifs en sus des capteurs piézo-électriques a pour but de comparer la réponse de ces deux technologies face à une même sollicitation de choc pour en mettre en évidence les forces et faiblesses respectives. Ceux-ci sont installés dans la table grâce à des inserts en aciers dont ils sont isolés par des bagues en caoutchouc (Figure 2-4) afin de limiter la transmission d'ondes de choc de la table aux capteurs.



Figure 2-4 : Montage des capteurs piézorésistifs (gauche) et piézo-électrique (droite) dans leurs inserts.

Ces capteurs sont reliés à des amplificateurs adaptés à leur technologie de mesure ; ainsi les capteurs piézo-électriques Kistler sont chacun reliés à un amplificateur Kistler 5011 ou 5018, tandis que les capteurs piézorésistifs Kulite sont connectés à un amplificateur Vishay 2311. Les capteurs Kulite sont notés P_i ($i \in \{1, \dots, 5\}$) et les Kistler K_j ($j \in \{1, \dots, 11\}$).

Les signaux temporels de pression mesurés par les capteurs sont enregistrés à l'aide d'une plate-forme d'acquisition rapide Genesis (Bridge 1M iso Card), de la marque Nicolet, à enregistrement continu (24 voies, échantillonnage à 500 kHz et filtre passe-bas à 125 kHz). La chaîne d'acquisition complète est représentée dans la Figure 2-5.

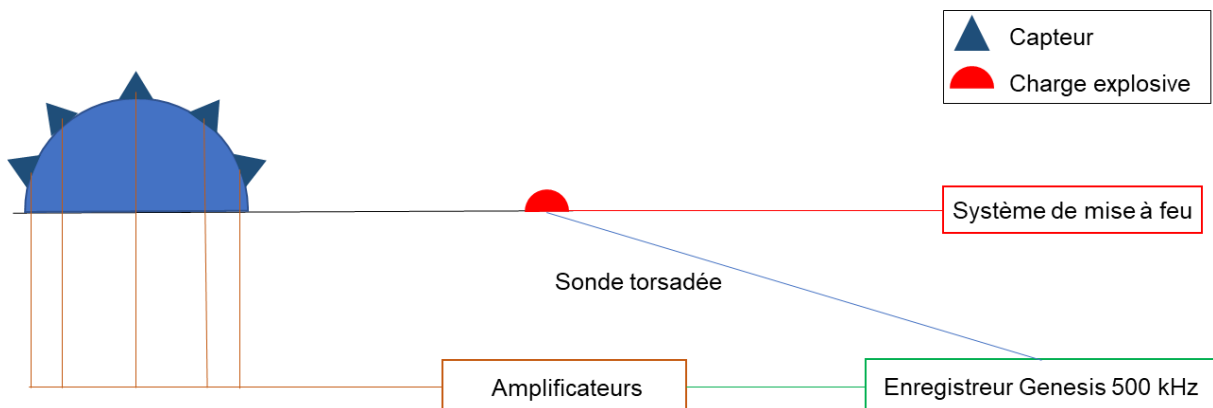


Figure 2-5 : Schéma de la chaîne d'acquisition de l'IRSN.

2.1.4 Obstacle hémicylindrique

L'obstacle hémicylindrique est principalement constitué de bois. Une armature interne en acier (solides bleu et vert sur la Figure 2-6 gauche) renforcée par des barres horizontales, et une peau en élastomère (solide jaune) permettent de garantir sa rigidité et de limiter la transmission d'ondes dans la maquette. La structure est découpée en 4 tronçons de 40 cm de côté et a un diamètre de 40 cm ; chaque tronçon a donc les mêmes dimensions que les dalles de la table. Le cylindre complet mesurant 1,60 m de longueur, il occupe toute la largeur de la table à détonation (Figure 2-6 droite), ce qui permet de limiter les effets de contournement latéral de l'onde de souffle.

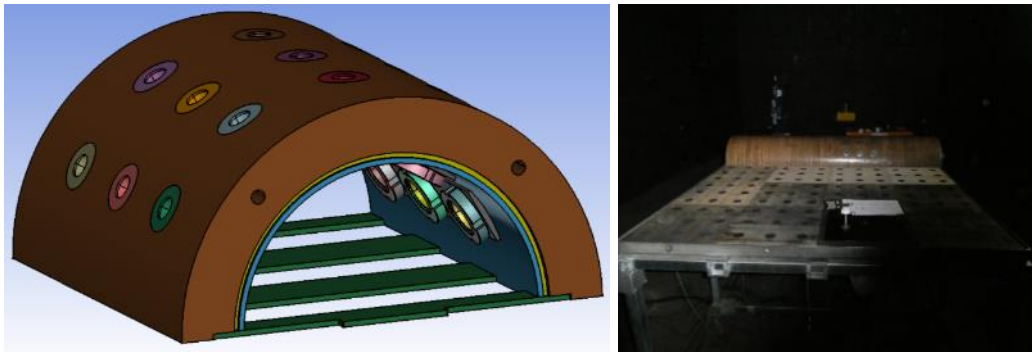


Figure 2-6 : Structure de l'obstacle hémicylindrique utilisé et son placement sur la table à détonation.

Des dispositifs de fixation situés entre les éléments de l'hémicylindre leur permettent d'être parfaitement solidaires, et l'hémicylindre est fixé à la table au moyen de tiges filetées et d'entretoises en acier. Deux tronçons seulement peuvent être instrumentés, grâce à 15 emplacements de capteurs, répartis en trois rangées : une rangée centrale et deux rangées parallèles situées à 10 cm de chaque côté de la première. Chacune de ces rangées peut recevoir cinq capteurs le long de l'arc de l'hémicylindre, répartis tous les 30° (soit un capteur à 30°/60°/90°/120°/150°), comme illustré sur la Figure 2-7.

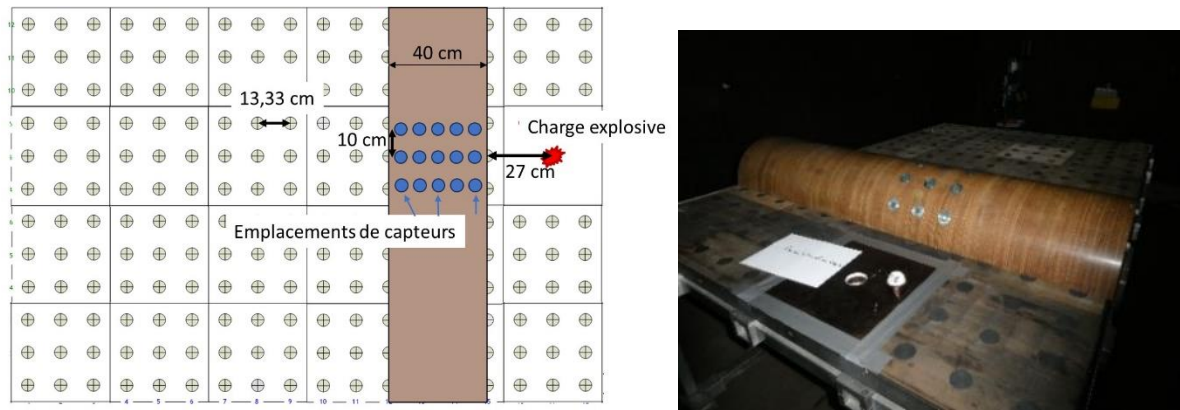


Figure 2-7 : Hémicylindre en bois de l'IRSN, ici à 0,27 m de la charge explosive.

L'obstacle peut être positionné à des distances d de la charge, d variant entre 0,27 et 1,60 m. Lors des essais, deux capteurs en champ libre conservent leur position pour la durée totale de la campagne afin de contrôler la répétabilité des charges explosives.

2.1.5 Déroulé type d'un essai

Avant chaque essai, le même mode opératoire est suivi :

- la table à détonation est remise en place et mise à niveau : la plaque acier sous la charge est remise en place, éventuellement changée, les mousses isolant les plaques du bord de la table sont remplacées et celles autour de la plaque acier sont scotchées à la table ;
- la surface de la table est nettoyée afin d'éliminer tout débris qui pourrait être projeté par la détonation de la charge et perturber l'essai ;
- les branchements des capteurs sont inspectés pour vérifier leur intégrité ;
- la position des capteurs de pression est vérifiée (surface affleurant à la table ou à la surface de l'obstacle notamment) ;
- le gain des amplificateurs est adapté afin d'éviter leur saturation par atteinte de leur tension maximale admissible et par conséquent d'éviter l'écrêtage des pics de pression étudiés ;
- la charge d'Hexomax est moulée par l'opérateur pyrotechnique[®], placée sur son support avec la sonde torsadée, et apportée dans la casemate ;
- la sonde torsadée est testée pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'acquisition ;

2.2 Installation Expérimentale de l'ISL

- la charge est amorcée ;
- la sirène d'avertissement du bunker est sonnée par le directeur d'essais ;
- les amplificateurs Kistler sont enclenchés au dernier moment afin de limiter leur dérive dans le temps ;
- la mise à feu est déclenchée ;
- une fois le tir réalisé, la sirène d'avertissement est retentie à nouveau et les amplificateurs Kistler sont désactivés.

Il est ainsi possible de réaliser 3 à 4 essais par jour. Enfin, à chaque fin de journée, la configuration expérimentale suivante est mise en place.

2.2 Installation Expérimentale de l'ISL

2.2.1 Pas de tir

L'ISL a modifié une dalle de tir sur son Terrain d'Expériences (TE) de Baldersheim pour les mesures de souffle, soit en champ libre, soit avec des obstacles, afin de réaliser des essais à échelle double de ceux de l'IRSN. Cette dalle de tir de béton mesure 15 m de largeur pour 30 m de long, et est dimensionnée pour résister aux effets d'une charge explosive placée au sol et d'une masse maximale de 36 kg d'équivalent TNT. Elle permet notamment d'étudier la protection des plateformes et des véhicules contre des effets de souffle. Breda [131] y a ainsi conduit ses travaux de thèse sur l'utilisation de mousses aqueuses pour confiner les effets de souffle et les fragments dus à un engin explosif, et Grégoire [164] sur la dispersion explosive de particules solides ; Schunck [165] y a également étudié l'atténuation d'une explosion par un système de grilles et de rideau d'eau. Il est aussi possible d'utiliser l'installation pour analyser la propagation de l'onde de souffle d'un explosif, comme dans le cadre du PFE de Tillet [161]. Un bloc d'acier est inséré dans la dalle au niveau de la position des charges au sol, afin de la protéger des effets des détonations. Une réservation parallélépipédique est usinée dans le bloc afin d'y insérer un sandwich de plaques acier et polymères consommables qui limitent aussi la transmission de vibrations dans le bloc d'acier et l'endommagement de la dalle. La plaque d'acier supérieure supporte

la charge explosive et est percée pour que le détonateur puisse la traverser et ainsi reproduire la géométrie d'amorçage des essais à l'IRSN, comme représenté en haut de la Figure 2-8.

Cependant, les dispositifs de mesure utilisés par l'ISL pour caractériser la propagation du souffle généré par une composition explosive [161] au sol (perçage de la dalle et vissage d'une plaque en acier dans laquelle est placé le capteur) ne permettent pas de reproduire la densité spatiale élevée des capteurs de la table IRSN, nous avons opté pour un rail métallique intégré affleurant encastré dans une rainure usinée dans la dalle de tir. Il offre une densité d'implantation de capteurs suffisante pour les besoins de l'étude, avec 20-deux positions séparées de 266 mm, soit le double de la distance entre les capteurs de l'IRSN, permettant un positionnement précis des capteurs dans l'axe de la charge (Figure 2-8 - bas).

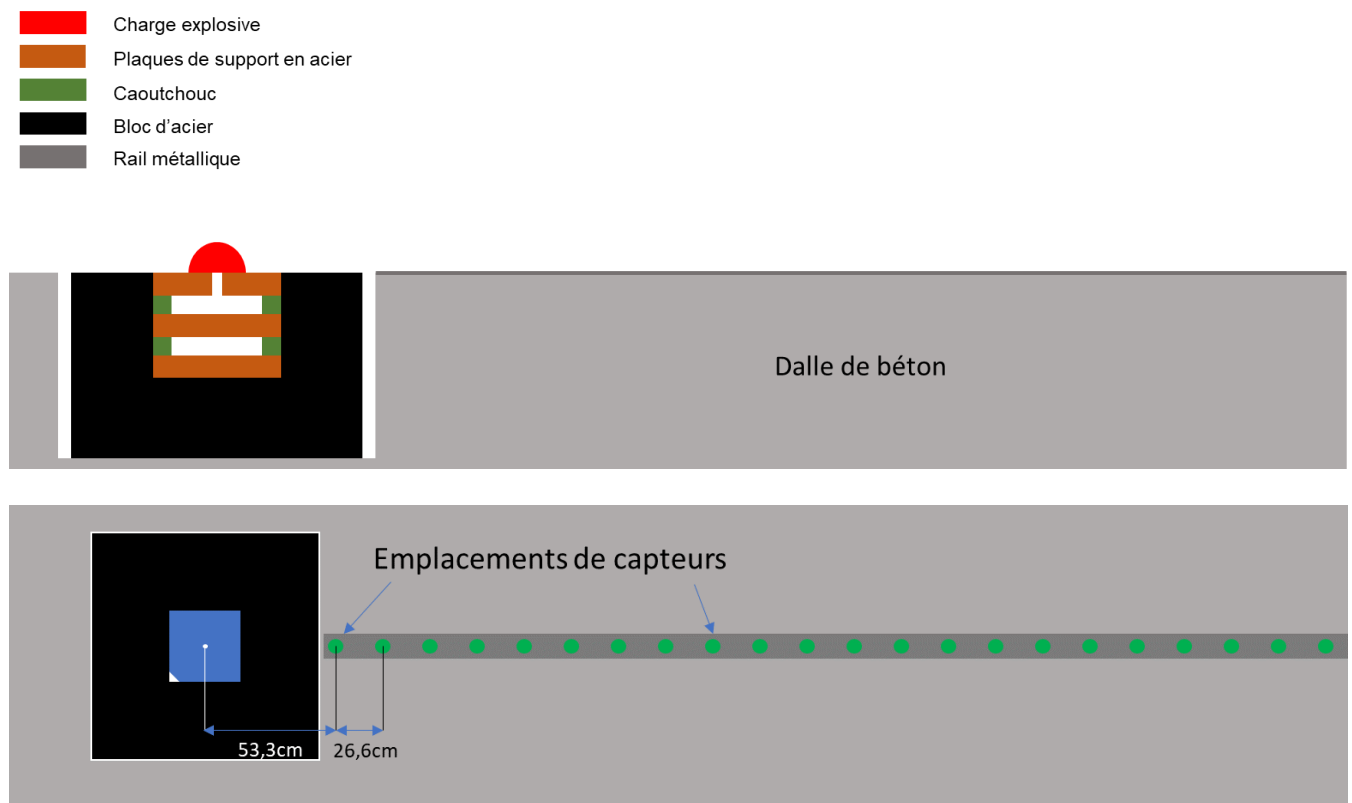


Figure 2-8 : Vue en coupe du pas de tir de l'ISL (haut) et vue du dessus (bas).

2.2.2 Charges explosives

Durant les essais de l'ISL, des charges d'Hexomax® sont aussi utilisées pour permettre la comparaison directe des essais aux deux échelles sans passer par une équivalence. Celles-ci sont façonnées en hémisphères avec un moule, comme à l'IRSN. Trois tailles de charges hémisphériques sont utilisées, détaillées dans le Tableau 2-2, et 4 tests sont réalisés avec chaque type de charge ; les plus importantes charges sont équivalentes à 400 g de TNT, soit l'équivalent à échelle double des charges de 50 g de l'IRSN. Toutes sont amorcées avec un détonateur à filament explosé RP83 de chez Teledyne Defense, qui contient une amorce de 86 mg de pentrite, puis un relais de 123 mg de RDX et enfin 908 mg de HMX [44]. La plaque porte-échantillon carrée est par ailleurs chanfreinée afin de passer le câble de mise à feu (Figure 2-9). Ici, une sonde torsadée n'est pas nécessaire, car l'enregistrement est directement déclenché par le système de mise à feu du détonateur ; ceci est rendu possible par la grande précision des détonateurs utilisés, de l'ordre de quelques microsecondes (+/- 5,38 µs en moyenne, d'après [44] par rapport aux +/- 6 ms des détonateurs Davey-Bickford [166]).

Par ailleurs, l'ISL étant doté d'un laboratoire permettant la production de charges coulées en TNT, des charges de TNT ont également été utilisées dans le cadre de cette thèse. Ces charges sont amorcées par l'intermédiaire d'un relais de C4 ; la masse de ce relais d'amorçage est calculée selon l'équivalent TNT du C4, de manière à ce que la masse équivalente de l'ensemble charge/relais soit la masse de TNT attendue⁴, ainsi que détaillé dans le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Caractéristiques des charges explosives.

Type d'explosif	TNT	TNT	Hexomax®	Hexomax®	Hexomax®
Masse (g)	42	336	66,5	166,5	333
Masse du relais (g) / type	6,6 / C4	52,5 / C4	N/A	N/A	N/A

⁴ L'équivalent TNT du C4 a été établi à 1,22, selon de précédents essais réalisés à l'ISL. La masse équivalente de l'ensemble charge/booster est donc calculée comme suit : $m_{eqTNT} = m_{TNT} + 1,22 * m_{C4}$

Équivalent TNT de la charge + relais (g) (en surpression)	50	400	80	200	400
--	----	-----	----	-----	-----



Figure 2-9 : Placement d'une charge de 333 g d'Hexomax® sur la plaque porte-échantillon.

2.2.3 Diagnostics associés

Afin d'étudier la propagation d'ondes de souffle et leur interaction avec des obstacles, l'ISL a recours à de nombreux moyens de mesure ; toutefois, le dispositif présenté ici ayant été conçu afin de répliquer les essais de l'IRSN à échelle double, il a été choisi d'utiliser les mêmes technologies de mesure de pression, soit des capteurs piézoélectriques de la marque PCB (l'ISL ne disposant pas de capteurs Kistler pour ses installations extérieures), placés sur la ligne centrale de l'hémicylindre, et des capteurs piézorésistifs de la marque Kulite, sur une ligne parallèle. Différents modèles de chacune de ces marques sont utilisés en fonction de la distance de l'hémicylindre et des niveaux de pression attendus (M102A et 113B28 pour PCB, HKS et XT190 pour Kulite. À noter également qu'un capteur piézorésistif Endevco 8530C-100, mis à disposition gracieusement par le fabricant, a été utilisé lors d'une campagne d'essais, avec son amplificateur Model 136.

Les capteurs placés sur l'hémicylindre sont notés « P XY », X représentant leur index de ligne et Y leur position sur cette ligne : le capteur P31 est ainsi placé en position 1 (30°) sur la ligne centrale, tandis que le capteur P25 est en position 5 (150°) sur la ligne adjacente, comme illustré en Figure 2-10.

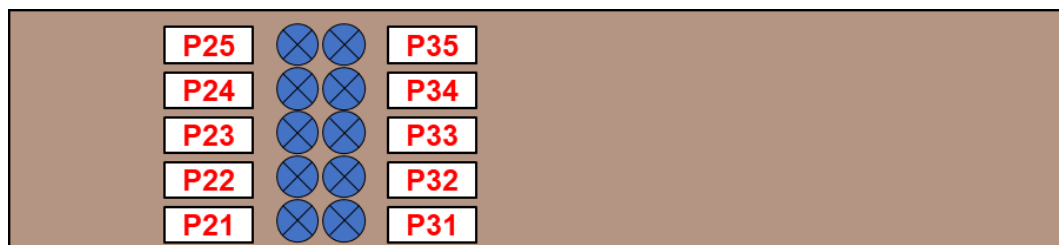


Figure 2-10 : Numérotation des capteurs de l'ISL.

Chaque capteur Kulite est relié à un conditionneur de signal Kyowa CDV 700A et chaque capteur PCB est connecté à un conditionneur de signal PCB modèle 482A22. Tous ces conditionneurs sont ensuite reliés à un enregistreur MF Transcom Rac (échantillonnage à 1 ou 2 MHz, application d'un filtre passe-bas de Bessel du 5^e ordre à 500 kHz).

Par ailleurs, les essais de l'ISL sont filmés à l'aide de caméras rapides ; les premiers essais ont été filmés avec une seule caméra Phantom V310, puis une

seconde caméra Phantom V311 a été ajoutée au dispositif expérimental. Les deux caméras sont équipées d'un objectif Nikon 135 mm F/2 et placées à 10 m de l'hémicylindre (Figure 2-11).



Figure 2-11 : Disposition des deux caméras lors des essais de l'ISL.

La résolution des images est choisie de manière à assurer une cadence de prise de vue de 10000 images par seconde, et est donc fixée à 400×600 pixels². La durée d'exposition a ensuite été choisie pour optimiser la qualité des données extractibles des images et minimiser le flou de bouger.

La répétition de chaque essai 4 fois permet de déplacer la caméra et d'avoir une vue d'ensemble de la propagation du choc autour de l'hémicylindre ; les images obtenues depuis ces différents points de vue peuvent ensuite être assemblées comme dans la Figure 2-12.

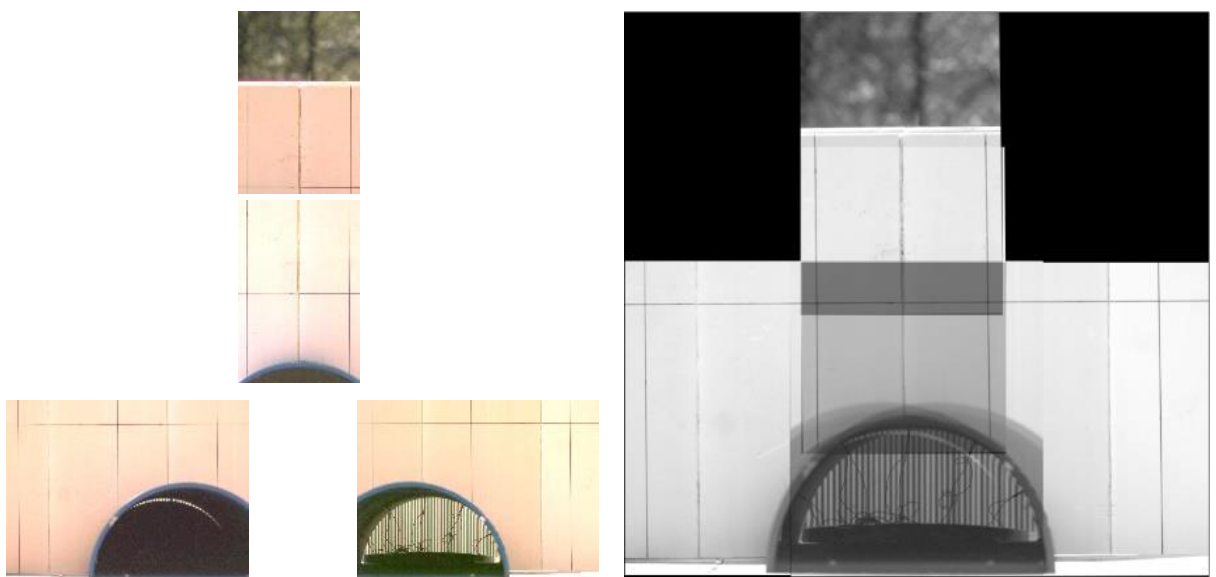


Figure 2-12 : Recomposition des images obtenues en déplaçant les caméras lors des essais.

2.2.4 Obstacle hémicylindrique

La maquette utilisée à l'ISL est un hémicylindre en acier. L'obstacle est placé en aval de la charge, perpendiculairement au rail (Figure 2-13). Il est constitué de 4 sections de 0,8 m de côté et de diamètre qui sont vissées dans la dalle de béton, et mesure donc 3,2 m de longueur au total. Ce choix de matériau différent de l'IRSN a été fait pour des raisons de rapidité de production et permet par ailleurs de minimiser les manipulations : l'hémicylindre peut ainsi rester à l'extérieur, exposé aux éléments, tout au long de l'année, ce qui évite de devoir le mettre à l'abri et d'effectuer des manœuvres supplémentaires. Cet hémicylindre peut être déplacé, donnant la possibilité de tester différentes distances entre la charge et l'obstacle, de 0,53 à 3,20 m. L'hémicylindre est également instrumenté de plusieurs capteurs de pression, localisés à sa surface. La ligne principale de capteurs suit la ligne médiane d'un tronçon et 4 lignes secondaires de capteurs lui sont parallèles : deux lignes sont décalées de 200 mm l'axe principal pour reproduire l'écartement sur l'hémicylindre de l'IRSN, et deux autres de 50 mm afin de réduire cet écartement et pouvoir mieux comparer la différence de réponse des deux technologies de capteurs. Cinq capteurs peuvent être placés sur chaque ligne, espacés d'un angle de 30° (un capteur à 30°/60°/90°/120°/150°), comme pour l'obstacle de l'IRSN. Ces capteurs sont montés dans un insert en polypropylène, lui-même vissé dans l'hémicylindre. Un capteur piézo-électrique supplémentaire (PArr) est systématiquement vissé dans le premier emplacement libre du rail derrière l'hémicylindre, ainsi qu'une sonde effilée PCB 137A23 (PStylo) placée en champ libre en amont de la charge, afin de mesurer la pression incidente engendrée par le choc lorsqu'il n'est pas perturbé par l'hémicylindre. Ces deux capteurs sont placés à la même distance de la charge et servent à évaluer l'atténuation du souffle en aval de l'obstacle, la propagation des effets de pressions étant supposée uniforme dans toutes les directions autour de la charge hémisphérique, hors effets de contournement sur l'obstacle.



Figure 2-13 : Photo de l'installation avec une charge de 400 g de TNT à 0,53 m de l'hémicylindre.

2.2.5 Déroulé d'un essai

Avant de procéder à chaque nouvel essai, la surface de la dalle de tir est nettoyée pour éviter la présence d'éclats risquant d'être projetés par le souffle de l'explosion, ce qui pourrait endommager la caméra ou les capteurs. Une mire est replacée et les plaques de protection situées sous la charge explosive sont remises dans leur logement. La plaque supérieure, déformée par la détonation, est systématiquement remplacée par une neuve. La ligne de mise à feu à haute tension est également vérifiée. L'opérateur pyrotechnique prépare la charge dans le local dédié, puis la sirène sonne deux coups lorsqu'il l'apporte sur le pas de tir, afin de signaler qu'un essai est en cours de préparation. Il place alors la charge sur la plaque de support et y insère le détonateur ; la charge amorcée, il vient s'abriter dans le poste de commandement de tir, un test de déclenchement des enregistreurs et de la caméra est effectué, et la sirène sonne trois coups pour annoncer que le tir est imminent. Une fois l'exploseur chargé, le tir a lieu, puis la sirène sonne une fois pour annoncer la fin de l'essai. 5 essais en moyenne peuvent ainsi être réalisés dans une journée.

2.3 Méthodologie

2.2.6 Application du principe de similitude

Suivant le principe de similitude d'Hopkinson [3], le pas de tir de l'ISL a été modifié pour réaliser des essais à échelle double de la table à détonation de l'IRSN. Par conséquent, la masse des charges explosives utilisées à l'ISL (400 g éq. TNT) est huit fois celle des charges utilisées à l'IRSN (50 g éq. TNT), et les distances charge explosive/hémicylindre testées à l'ISL sont le double de celles testées à l'IRSN. Le Tableau 2-3 résume les dimensions des installations aux deux échelles.

Tableau 2-3 : Application du principe de similitude aux expériences IRSN/ISL.

	Échelle IRSN	Échelle ISL
Diamètre de l'hémicylindre (m)	0,4	0,8
Longueur de l'hémicylindre (m)	1,6	3,2
Espacement des capteurs (m)	0,133	0,266
Distances charge / hémicylindre (m)	0,266	0,533
	0,4	0,8
	0,6	1,2
	1	2
	1,6	3,2
Charge explosive de référence (g éq TNT)	50	400

Les principales différences entre les deux installations résident donc dans leur mise en œuvre : l'hémicylindre de l'IRSN possède une armature en acier recouverte de bois, tandis que celui de l'ISL est simplement en acier. De plus, la table à détonation de l'IRSN est en bois tandis que celle de l'ISL est une dalle en béton équipée d'un rail métallique, la différence d'échelle entraîne une différence dans la longueur des câbles utilisés, et les systèmes d'acquisition diffèrent entre les deux instituts.

2.3 Méthodologie

2.3.1 Évaluation des incertitudes expérimentales

Avant de se pencher sur les résultats obtenus durant la thèse, il est important de faire un point sur les incertitudes de mesure et leur détermination. En effet, *no measurement is exact* [167], et il est donc essentiel de pouvoir quantifier la déviation

de valeurs mesurées afin de présenter des résultats de la manière la plus objective possible. Cette inexactitude provient aussi bien de la précision de la métrologie utilisée (sensibilité, déviation, résolution, etc.), que de l'habileté de l'opérateur, ou encore des conditions environnementales (pression ambiante, hygrométrie, température ambiante, etc.) [168]. Ainsi, la grandeur étudiée varie aléatoirement selon ces conditions, et la mesurer consiste à estimer sa valeur et à lui associer une incertitude donnant des indications sur la précision de cette mesure.

2.3.1.1 Définitions

Tout d'abord, il est essentiel de rappeler quelques définitions autour des incertitudes de mesure afin de bien définir les objets statistiques qui seront employés dans ce chapitre. Le *Joint Committee for Guides in Metrology* fournit un guide sur le vocabulaire à employer en métrologie [169], dont sont tirées les définitions suivantes :

- Mesurage : processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur ;
- Métrologie : science des mesurages et ses applications ;
- Mesurande : grandeur que l'on veut mesurer ;
- Valeur mesurée : valeur d'une grandeur représentant un résultat de mesure ;
- Valeur vraie : valeur d'une grandeur compatible avec la définition de la grandeur ;
- Erreur de mesure : différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence.

Dans le cas des essais réalisés durant ces travaux de thèse, les mesurandes correspondent ainsi aux paramètres physiques des ondes de souffle étudiées (surpression maximale, temps d'arrivée, impulsion positive). L'erreur de mesure peut être séparée en deux types d'erreur [169] :

- L'erreur de mesure systématique se reproduit dans un mesurage répété, de manière constante, et son estimation est appelée le biais de mesure. Elle peut notamment être causée par le mauvais étalonnage d'un instrument de mesure, et elle peut être corrigée.

2.3 Méthodologie

- L'erreur de mesure aléatoire est caractérisée par une distribution aléatoire des valeurs d'un mesurage répété dans les mêmes conditions autour d'une valeur moyenne.

Dans le cadre de nos essais, l'erreur aléatoire peut notamment être due à la précision des capteurs employés, aux changements de conditions atmosphériques, ou encore au processus de détonation de l'explosif (homogénéité et géométrie de la charge ou de son amorçage, temps de fonctionnement du détonateur, etc.).

Toutes les erreurs non maîtrisées peuvent alors être exprimées par l'incertitude de mesure, ou incertitude expérimentale. Elle représente la dispersion des valeurs d'un mesurage qui peut être associé à un mesurande donné, et permet de déterminer un intervalle de valeurs (intervalle de confiance) dans lequel la valeur vraie du mesurande peut être trouvée. Cette incertitude peut être évaluée de deux manières [170] :

- L'évaluation de type A de l'incertitude consiste en une étude statistique des valeurs mesurées obtenues dans des conditions définies de mesurage. Cette évaluation est basée sur le calcul de l'écart-type des valeurs mesurées.
- L'évaluation de type B de l'incertitude concerne toutes les méthodes d'évaluation non statistiques. Elle est utile quand l'analyse statistique est difficile et se base alors sur l'évaluation d'incertitudes types définies dans des certificats d'étalonnages, des valeurs de la littérature ou encore des notices. C'est une évaluation purement théorique.

Il est possible de limiter l'incertitude de mesure, pour l'évaluation de type A, en augmentant la taille de l'échantillon de mesurages ou en contrôlant les conditions de mesurage, et donc les facteurs influençant la mesure. Ces conditions peuvent être classées en deux types, les conditions de répétabilité, et les conditions de reproductibilité. Les conditions de répétabilité sont basées sur la répétition des conditions de mesurage : même procédure de mesure, mêmes opérateurs, même système de mesure, mêmes conditions de fonctionnement, même lieu, et mesurages effectués en un court laps de temps. Les conditions de reproductibilité, quant à elles, concernent des mesures effectuées par des opérateurs différents, avec des systèmes de mesure différents, dans des lieux différents, ou quand le mesurage concerne un même objet ou des objets différents par exemple.

Dans le cadre de cette étude, les conditions de répétabilité concernent donc l'ensemble des dispositions prises sur chacune des installations afin d'assurer la cohérence des mesures (protocole expérimental précis, même opérateur à chaque étape, essais réalisés en un même lieu et dans des conditions expérimentales similaires), tandis que les conditions de reproductibilité s'appliquent à la façon dont l'installation de l'ISL a été conçue pour reproduire les essais de l'IRSN à échelle double (opérateurs différents d'un institut à l'autre, deux lieux d'expérimentation, avec des outils de mesurage différents).

2.3.1.2 Méthodes d'évaluation

Les principes gouvernant le calcul de l'incertitude de mesure ayant été exposé, il est à présent possible présenter leur application pour la détermination de l'incertitude expérimentale dans le cadre de nos essais en détonique. Étant donné les considérations définies plus haut sur les installations expérimentales nous concernant et les conditions de répétabilité associées, l'incertitude expérimentale peut donc être déterminée à partir des méthodes de type A et B.

2.3.1.2.1 Méthode de type A :

Le but de nos mesures est de déterminer la surpression engendrée par l'onde de souffle créée par une charge explosive à une distance donnée. Mais la valeur exacte de cette pression est, par définition, inconnue, et ne peut être qu'approchée en raison de la nature finie des échantillons étudiés, qui dans notre cas consistent en une série d'essais généralement compris entre 3 et 4. L'hypothèse fondamentale consiste alors à considérer le résultat de chaque mesurage comme le tirage d'une variable aléatoire de moyenne la valeur vraie cherchée μ et d'écart-type σ , cet écart-type mesurant la dispersion des mesurages autour de μ et étant lui aussi inconnu.

Pour un échantillon X de n mesurages $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, les mesures x_i changent d'un essai à l'autre à cause de facteurs de fluctuation. Toutefois, dans le cadre des conditions de répétabilité, chaque mesurage x_i peut être assimilé au tirage d'une

2.3 Méthodologie

variable aléatoire X_i indépendante, mais suivant une loi identique de moyenne μ et d'écart-type σ . Malgré le caractère fini de l'échantillon, il est possible de définir des estimateurs [171] afin d'approcher les valeurs de μ et σ , à savoir la moyenne $\bar{X}$ (33) et l'écart-type S (34), qui sont des variables aléatoires également :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (33)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (34)$$

Cependant, un autre échantillon X_1 pourrait présenter une moyenne et un écart-type différents, mais toujours représentatifs de $\bar{X}$ et S ; c'est pourquoi on notera plus couramment $\bar{x}$ la moyenne arithmétique et s l'écart-type non biaisé associés à un échantillon.

Dans le cas de nos essais, les facteurs de fluctuations sont nombreux : variations de pression et de température ambiantes, erreur de mesure des capteurs, densité de la charge explosive, centrage de la charge, vibrations parasites... Toutefois, on peut considérer que :

- Ces facteurs de fluctuation ont tous la même importance ;
- Ils sont indépendants ;
- Les conditions de répétabilité sont réunies (le même opérateur suit toujours le même protocole, au même endroit, avec les mêmes instruments de mesure, et dans un intervalle de temps réduit)

Par conséquent, d'après [172], on peut estimer que X_i suit une loi normale de paramètres (μ, σ^2) , et il est donc possible de déterminer la loi de probabilité de la moyenne arithmétique et de l'écart-type non biaisé. La Figure 2-14 rappelle les principales propriétés de la loi normale : dans ce type de distribution, les valeurs probables de X_i sont concentrées autour de μ , et la probabilité que X_i prenne une valeur différente de μ diminue quand l'écart augmente. L'aire sous la courbe entre deux valeurs correspond alors à la probabilité qu'une valeur aléatoire de X appartienne à cet intervalle ; parmi les intervalles utilisés couramment, on peut citer l'intervalle $[\mu - \sigma ; \mu + \sigma]$ ayant une probabilité de 68% de contenir une valeur aléatoire

de mesure, ou encore $[\mu - 2\sigma ; \mu + 2\sigma]$ pour une probabilité de 95%. Avec la loi normale, il est donc considéré qu'il n'y a pas de raison objective pour que les valeurs situées d'un côté de la valeur μ soient plus représentées que les autres, ou que les valeurs soient éloignées de la valeur moyenne μ . Il est alors possible de définir l'incertitude expérimentale $u_a(x) = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$, qui est une estimation de $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ et mesure la dispersion des résultats expérimentaux autour de leur moyenne $\bar{x}$, ainsi que l'incertitude relative $\bar{s} = \frac{s}{\sqrt{n}} \frac{1}{\bar{x}}$ qui permet de comparer les niveaux d'incertitude entre différentes configurations.

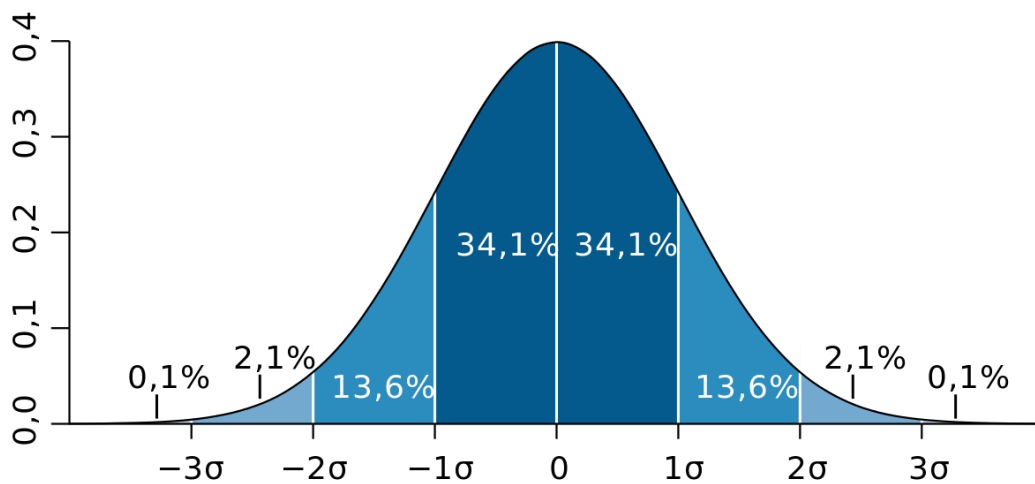


Figure 2-14 : Représentation de la fonction de densité d'une loi normale.

Par ailleurs, la variable aléatoire $T = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}}$ suit une loi de Student [173] à $\nu = n - 1$ degré(s) de liberté [171]. En considérant un risque d'erreur maximale accepté α compris entre zéro et un, alors cette propriété de T induit que la valeur vraie μ a une probabilité $1-\alpha$ d'appartenir à l'intervalle :

$$\left[\bar{X} - t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} ; \bar{X} + t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \right]$$

Le coefficient $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ est déterminé par la loi de Student, et la Figure 2-15 présente les valeurs de ce coefficient pour des valeurs de n comprises entre 1 et 100 ; on notera notamment qu'avec l'augmentation du nombre d'essais, la valeur de $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ diminue ainsi que celle de $\frac{1}{\sqrt{n}}$, et par conséquent la largeur de l'intervalle de confiance.

2.3 Méthodologie

$n \backslash t$	$t_{0.55}$	$t_{0.75}$	$t_{0.9}$	$t_{0.95}$	$t_{0.975}$	$t_{0.99}$	$t_{0.995}$	$t_{0.999}$
1	0.158	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309
2	0.142	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.137	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215
4	0.134	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.132	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.131	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.130	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.130	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.129	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.129	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.129	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.128	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.128	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.128	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.128	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.128	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.128	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.127	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.127	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.127	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.127	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.127	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.127	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.127	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.127	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.127	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.127	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.127	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.127	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.127	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	0.126	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
50	0.126	0.679	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
60	0.126	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232
70	0.126	0.678	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211
80	0.126	0.678	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195
90	0.126	0.677	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183
100	0.126	0.677	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174

Figure 2-15 : Valeurs des coefficients de la loi de Student pour un nombre d'essai n et un niveau de confiance donnés, extrait de [171].

On appelle niveau de confiance la probabilité $1-\alpha$ que la valeur vraie μ appartienne à cet intervalle, α correspondant alors au risque que la valeur μ ne se trouve pas dans cet intervalle. Par extension, on peut également exprimer cet intervalle de la façon suivante : parmi tous les échantillons de mesurage de taille n observables, une proportion $1-\alpha$ d'entre eux permet de déterminer un intervalle de confiance valide, contenant la valeur μ . Pour un échantillon donné, de moyenne $\bar{X}$ et d'écart-type s , il y a donc une probabilité α que la valeur μ ne soit pas incluse dans l'intervalle :

$$\left[\bar{X} - t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} ; \bar{X} + t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \right]$$

La valeur $t_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}}$ est appelée écart-type élargi et quantifie la dispersion des résultats autour de μ pour un niveau de confiance $1-\alpha$ donné.

Enfin, il est donc possible de déterminer des intervalles de confiance différents afin d'exprimer l'incertitude expérimentale d'un même échantillon de mesures, et se pose alors la question de choisir l'intervalle le plus pertinent pour cela. Lorsque cela est possible, la comparaison de l'intervalle obtenu avec des valeurs de la littérature ou des valeurs théoriques peut donner des indications sur sa pertinence, et permettre ainsi de le valider ou de le rejeter. Il est également possible de reproduire l'essai afin d'obtenir des échantillons de mesurage supplémentaires et de confirmer ou non la validité d'un intervalle déterminé précédemment.

2.3.1.2.2 Méthode de type B

Contrairement à la méthode de type A, qui nécessite de réaliser une étude statistique d'un échantillon de mesurages obtenu et ne peut donc s'effectuer qu'après avoir réalisé des essais, la méthode de type B permet d'évaluer l'incertitude de mesure même dans le cas d'un essai unique, et se base sur des valeurs d'incertitude connues. Dans le cas de nos essais, cette incertitude peut se calculer grâce aux données techniques provenant des fabricants des différents éléments utilisés dans nos systèmes de mesure. Toutefois, toutes les fiches techniques ne présentent pas les mêmes informations quant à la précision des dispositifs, et sont parfois peu fournies

2.3 Méthodologie

ou imprécises ; à titre d'exemple, la fiche des capteurs piézorésistifs Kulite XT190 [174] indique ainsi que ces instruments ont une résolution infinitésimale (Figure 2-16).

OUTPUT	Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)		
	Full Scale Output (FSO)	100 mV (Nom.)		
	Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)		
	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)		
	Resolution	Infinitesimal		
	Natural Frequency of Sensor Without Screen (KHz) (Typ.)	240	300	380

Figure 2-16 : Extrait de la fiche technique des capteurs Kulite XT190.

Selon le type d'incertitude indiqué dans les fiches techniques, l'incertitude-type associée à un dispositif peut être déterminée de plusieurs manières [175] :

- Pour un dispositif ayant une résolution δx (par exemple un capteur PCB 137A23 [176]), alors une valeur mesurée X se trouve dans l'intervalle $[X - \frac{\delta x}{2} ; X + \frac{\delta x}{2}]$. La probabilité que la valeur se trouve en n'importe quel point de l'intervalle est alors équiprobable, et peut être décrite par une loi de probabilité rectangulaire de variance $u^2 = \frac{\delta x^2}{12}$. Par conséquent, l'incertitude-type du dispositif est alors $u_b = \frac{\delta x}{2\sqrt{3}}$.
- Dans le cas d'un appareil vérifié, donné avec une précision $\pm a$ (à l'instar du conditionneur PCB 482A22 [177]), la variance découle encore une fois d'une loi rectangulaire, et vaut $u_b^2 = \frac{a^2}{3}$. D'où l'incertitude-type associée $u_b = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

2.3.1.2.3 Incertitude composée

Dans le cas où les différentes sources d'incertitude sont indépendantes, ce qui est assuré par nos conditions expérimentales, il est alors finalement possible de calculer l'incertitude composée, notée $u_c(x)$, tenant compte de l'ensemble des sources d'incertitude standard déterminées avec des méthodes de type A et/ou B :

$$u_c(x) = \sqrt{\sum u(x)^2} \quad (35)$$

Il est alors possible d'exprimer le résultat de la grandeur mesurée X avec son incertitude de mesure associée, sous la forme :

$$X = \bar{x} \pm u_c(x) \quad (36)$$

De la même manière qu'il est possible de déterminer un intervalle associé à un niveau de confiance pour les incertitudes de type A, il est possible de calculer l'incertitude élargie associée à l'incertitude type composée en la multipliant par un facteur d'élargissement k déterminé par le niveau de confiance exigé. Dans le cas d'une loi normale, ce coefficient peut être déterminé d'après la Figure 2-17.

Niveau de confiance P %	Facteur d'élargissement k
68.27	1
90	1.645
95	1.96
95.45	2
99	2.576
99.73	3

Figure 2-17 : Facteur d'élargissement selon le niveau de confiance demandé, d'après [175].

Finalement, un résultat de mesure peut donc s'exprimer avec son incertitude élargie sous la forme :

$$X = \bar{x} \pm k * u_c(x) \quad (37)$$

2.3.1.3 Application aux mesures de cette étude

2.3.1.3.1 Évaluation de type A

Les nombreuses mesures effectuées grâce à aux capteurs permettent de mettre en application les principes statistiques développés plus haut, notamment l'évaluation de l'incertitude de type A. Ainsi, à partir des 26 mesures de pression présentées dans

2.3 Méthodologie

le Tableau 2-4, obtenues lors de la seconde campagne expérimentale réalisée à l'IRSN, il est possible de déterminer la pression moyenne mesurée ainsi que l'écart-type caractérisant l'erreur de cette mesure. Le capteur dont les résultats sont présentés ici se situait à 93 cm de la charge explosive équivalente à 50 g de TNT.

Tableau 2-4 : Surpressions maximales relevées par le capteur K11 durant la seconde campagne expérimentale de l'IRSN.

Essai N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pression (bar)	1,59	1,74	1,66	1,58	1,82	1,79	1,87	1,95	2,03
Essai N°	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Pression (bar)	1,69	1,67	1,78	1,33	1,53	1,95	1,55	1,72	1,68
Essai N°	19	20	21	22	23	24	25	26	
Pression (bar)	1,69	2,33	1,87	1,22	1,63	1,61	1,98	1,92	
Pression moyenne $\bar{P}$ (bar)			1,74		Écart-type s (bar)			0,23	

L'incertitude expérimentale définie plus haut vaut alors $\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,23}{\sqrt{26}} = 0,04 \text{ bar}$, et il est donc possible d'exprimer la pression relevée par le capteur K11 comme étant $P_{K11} = 1,74 \pm 0,04 \text{ bar}$. Toutefois, il peut s'avérer plus pertinent d'exprimer cette pression en utilisant un intervalle de confiance. Le Tableau 2-5 présente les écarts-types associés aux niveaux de confiance de 80, 95 et 99 %. Afin de choisir l'intervalle le plus adéquat, il est possible de chercher à comparer ceux obtenus avec des valeurs de la littérature : les valeurs prédites par Kinney & Graham [12] (2,03 bar), l'AMCP [88] (1,59 bar) ou encore l'UFC [63] (1,89 bar) encadrent tous les intervalles déterminés avec le Tableau 2-5 (Figure 2-18), et seule l'estimation de Kingery & Bulmash [90] (1,68 bar) est incluse dans l'un d'entre eux. Par conséquent, l'intervalle le plus large étant tout de même restreint (avec moins de 6 % de dispersion), nous avons choisi d'exprimer la pression sous la forme $P_{K11} = 1,74 \pm 0,1 \text{ bar}$ afin de conserver un niveau de confiance élevé.

Tableau 2-5 : Incertitudes expérimentales associées aux niveaux de confiance de 80, 95 et 99 %.

Niveau de confiance	$\frac{s}{\sqrt{n}}$	80%	95%	99%
Écart-type associé u_A (bar)	0,04	0,05	0,08	0,1

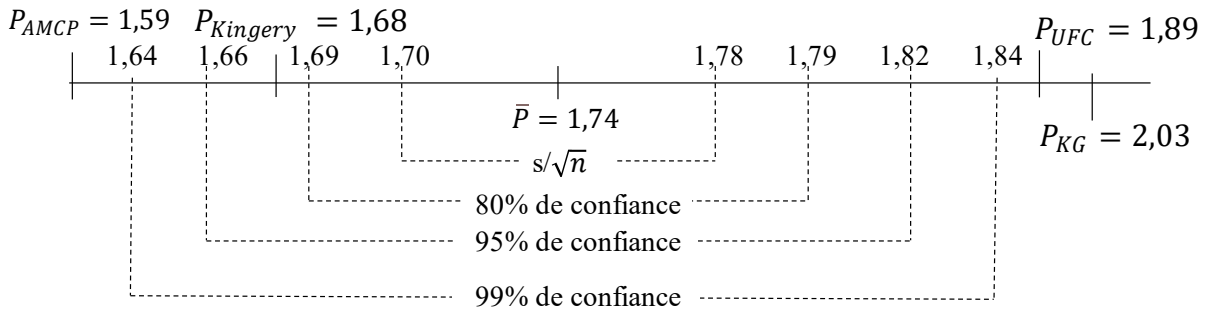


Figure 2-18 : Comparaison des intervalles de confiance du Tableau 2-5 avec des valeurs de référence.

A l'inverse, dans le cas du capteur K10, placé à 0,27 m de la charge lors de la première campagne expérimentale de l'IRSN, avec seulement 13 mesures, l'incertitude expérimentale est plus large et l'intervalle qu'elle délimite contient les valeurs prédites par Kinney & Graham [12], l'UFC [63] et l'AMCP [88] (Figure 2-19). Bien que cet intervalle soit seulement équivalent à un niveau de confiance d'environ 70 %, il est considéré que la présence de ces valeurs de référence permet de l'estimer fiable. Ainsi, la surpression mesurée par le capteur K10 dans ces conditions sera exprimée par $P_{K11} = 30,18 \pm 1,86 \text{ bar}$, ce qui correspond à une dispersion de 6 %.

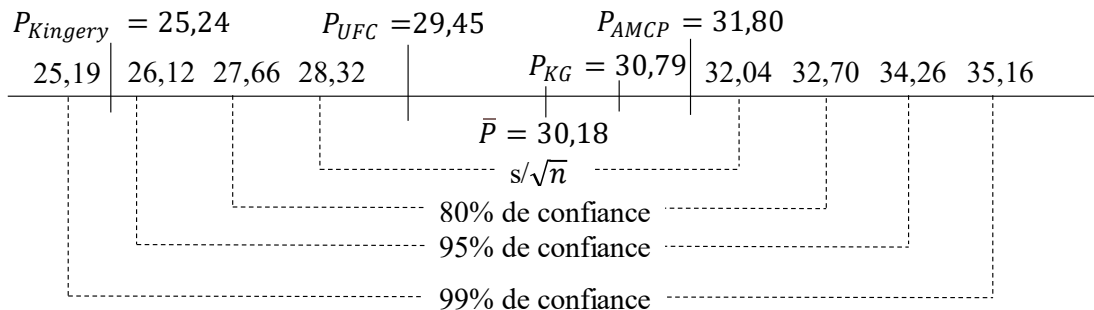


Figure 2-19 : Intervalles de confiance pour le capteur K10.

Dans le cas de l'ISL, les résultats de surpression obtenus avec la sonde effilée placée à 1,6 m d'une charge de 333 g d'Hexomax sont présentés dans le Tableau 2-6. Ils sont associés à une incertitude expérimentale $\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,2}{\sqrt{4}} = 0,1 \text{ bar}$, et les intervalles de confiance de 80, 95 et 99% associés à cette incertitude sont représentés dans la Figure 2-20. Ici, les valeurs de référence sont dispersées autour de la valeur moyenne de la série : celles de Kingery [90] et l'UFC [63] sont incluses dans l'intervalle de confiance à 95%, et celles de Kinney & Graham [12] et l'AMCP [88] sont comprises dans l'intervalle à 99% ; la moyenne des valeurs de référence est par ailleurs de

2.3 Méthodologie

2,52±0,16 bar. Par conséquent, dans cette situation, nous avons choisi d'exprimer la pression avec l'intervalle de confiance à 80 %, soit $P_{Stylo} = 2,45 \pm 0,13 \text{ bar}$.

Tableau 2-6 : Surpressions maximales relevées par la sonde effilée placée à 1,6 m d'une charge de 333 g d'Hexomax.

Essai n°	1	2	3	4
Pression (bar)	2,50	2,65	2,58	2,28
Pression moyenne $\bar{P}$ (bar)	2,50	Écart-type s (bar)		0,08

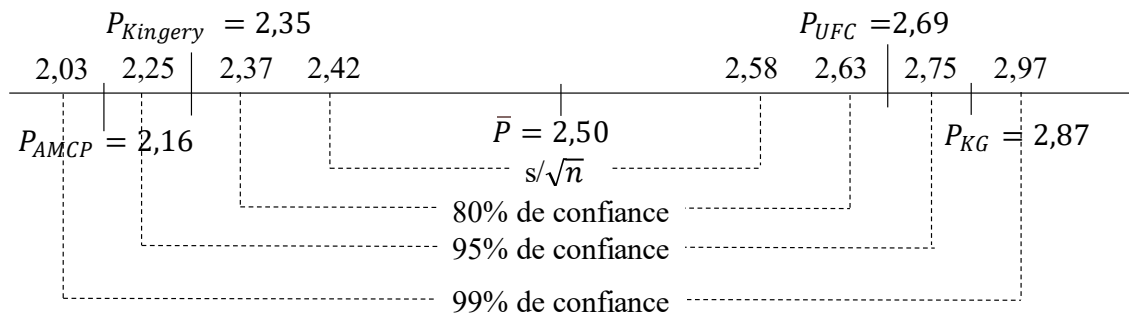


Figure 2-20 : Intervalles de confiance pour la sonde effilée.

2.3.1.3.2 Évaluation de type B

L'incertitude de mesure associée aux chaînes de mesure décrites plus haut peut être déterminée grâce aux documentations techniques de leurs différents composants (capteurs, amplificateurs et enregistreurs), dont les incertitudes sont présentées dans le Tableau 2-7.

Tableau 2-7 : Incertitude de mesure associée aux composants des chaînes de mesure employées.

Chaîne de mesure	Erreur du capteur	Erreur de l'amplificateur	Précision de l'enregistreur
Kulite (IRSN)	Infinitésimale	1%	16 bits
Kistler (IRSN)	0,2%	2%	
Kulite (ISL)	Infinitésimale	0,1%	
PCB (ISL)	0,007 kPa	1%	

Ces valeurs connues, il est alors possible de déterminer l'incertitude de mesure u_B associée à chacune de ces chaînes d'acquisitions suivant les principes définis dans la section 2.3.1.2.2 :

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{Capteur}}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{Amplificateur}}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{Enregistreur}}}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (38)$$

Le Tableau 2-8 résume les valeurs d'incertitude de type B pour chacune des chaînes de mesure, exprimée en fonction de la pression P (kPa) mesurée et du gain G (kPa.V⁻¹) de l'enregistreur.

Tableau 2-8 : Incertitude de mesure de type B associée à chacune des chaînes d'acquisition.

$u_B(Kulite_{IRSN}) = \sqrt{\left(\frac{0,01 * P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{G * 10}{2^{16} * 2\sqrt{3}}\right)^2}$	(39)
$u_B(Kistler_{IRSN}) = \sqrt{\left(\frac{0,002 * P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,02 * P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{G * 10}{2^{16} * 2\sqrt{3}}\right)^2}$	(40)
$u_B(Kulite_{ISL}) = \sqrt{\left(\frac{0,001 * P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{G * 10}{2^{16} * 2\sqrt{3}}\right)^2}$	(41)
$u_B(PCB_{ISL}) = \sqrt{\left(\frac{0,007}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 * P}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{G * 10}{2^{16} * 2\sqrt{3}}\right)^2}$	(42)

Par conséquent, dans le cas du capteur K11 mesurant une pression de 1,74 bar avec un enregistreur dont le gain est fixé à 0,5 bar.V⁻¹, et du capteur K10 mesurant 30,18 bar avec un gain de 5 bar.V⁻¹, l'incertitude de type B de chacun de ces capteurs vaut :

$$u_B(K_{11}) = 0,01 \text{ bar et } u_B(K_{10}) = 0,18 \text{ bar}$$

Dans le cas de la sonde effilée de l'ISL qui mesure une pression de 2,45 bar avec un gain de 0,5 bar.V⁻¹, on a alors :

$$u_B(\text{Stylo}) = 0,007 \text{ bar}$$

2.3 Méthodologie

On remarque que la plus grande source d'erreur est l'amplificateur de charge, dont l'erreur de mesure est proportionnelle à la pression mesurée, et que l'incertitude associée à la chaîne de mesure est au moins dix fois plus faible que l'incertitude évaluée par la méthode de type A.

2.3.1.3.3 Incertitude combinée

Finalement, l'incertitude combinée des mesurages de chacun des trois capteurs présentés ici est donnée par :

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Soit :

$$u_C(K_{11}) = 0,1 \text{ bar}, u_C(K_{10}) = 1,87 \text{ bar} \text{ et } u_C(\text{Stylo}) = 0,13 \text{ bar}$$

Et finalement, les pressions mesurées en champ libre par ces capteurs peuvent s'écrire :

$$\overline{P_{K_{11}}} = 1,74 \pm 0,1 \text{ bar}, \overline{P_{K_{10}}} = 30,18 \pm 1,87 \text{ bar}, \text{ et } \overline{P_{\text{Stylo}}} = 2,45 \pm 0,13 \text{ bar}$$

Cette même méthodologie peut s'appliquer à toutes les caractéristiques mesurées (pression, temps d'arrivée, impulsion positive), et dans la suite du document, les barres d'erreurs présentées dans les figures et la dispersion des résultats mentionnée seront désormais basées sur l'incertitude de mesure calculée telle que présenté ci-dessus⁵.

⁵ L'incertitude expérimentale associée à certains résultats étant très faible, les barres d'erreur peuvent être moins large que les symboles utilisés dans certains graphiques et ainsi sembler absentes.

2.3.2 Algorithme de traitement des images

Afin de réaliser le suivi de l'onde de souffle et de points caractéristiques (point triple, interface choc/hémicylindre...), un programme Python dédié a été développé. Ce programme comporte deux modules : le premier permet de recomposer les différentes images enregistrées durant les essais afin d'avoir une vision globale de la propagation du choc et les inscrire dans un repère commun, et le second permet de suivre la progression du choc (si besoin à l'aide d'un traitement d'image) et de déterminer ses coordonnées dans le repère défini grâce au premier module.

2.3.2.1 Module Calibration de l'algorithme

Comme mentionné dans le paragraphe 2.2.3, les essais de l'ISL ont été filmés à l'aide d'une caméra haute vitesse. Toutefois, afin de conserver un nombre d'images par seconde suffisant (10000 ips ici), la résolution des images a dû être diminuée, et il était donc impossible de filmer l'intégralité de l'hémicylindre avec une résolution totale suffisante. Par exemple, la Figure 2-21 illustre la configuration avec l'hémicylindre court situé à 3,2 m de la charge explosive : chaque image présente une section différente de l'hémicylindre (avant, arrière, en haut derrière, et un plan derrière l'hémicylindre).

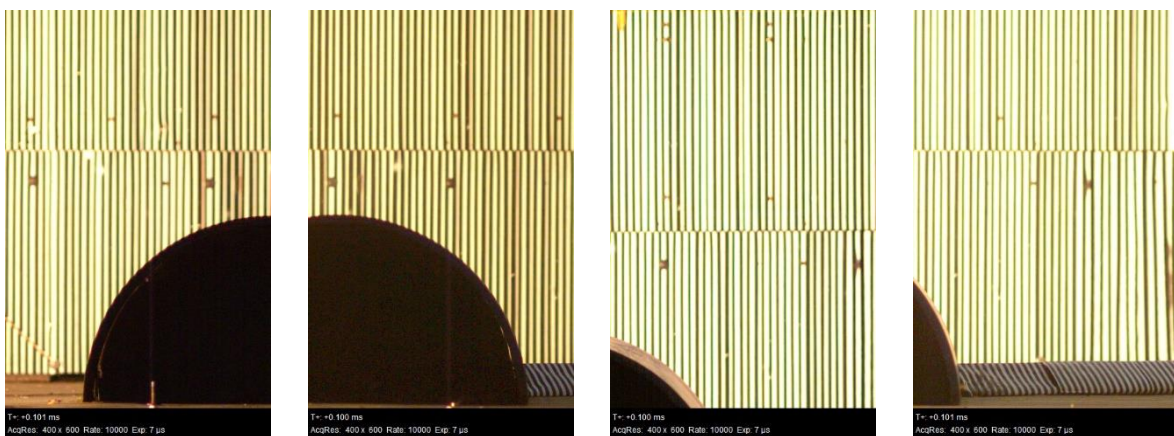


Figure 2-21 : Images d'une même configuration obtenues à l'ISL avec des tirs différents.

L'objectif du premier module du programme Python est donc de recomposer les images obtenues, afin d'avoir une vision globale de la propagation de l'onde de souffle

2.3 Méthodologie

générée par la charge explosive. Toutefois, il est nécessaire d'avoir un élément commun dont la position est la même sur chacune des images afin de les réunir ; c'est pourquoi, au fil des campagnes expérimentales, une mire a été développée, placée sur l'hémicylindre (dans l'axe de la charge explosive) et capturée sur une image de référence à chaque nouveau positionnement des caméras (Figure 2-22), avant d'être retirée lors des essais. Le champ des images de calibration prises avec la mire en position est plus large que celui des images enregistrées durant les tirs (800x600 généralement, 1200x600 pour les deux dernières de la Figure 2-22) : cet élargissement a été choisi de manière à mieux visualiser les deux intersections des lignes de la mire dans l'image, qui servent de repère pour la recombinaison des images. Ainsi, comme illustré dans la Figure 2-23, l'augmentation de la résolution des images de calibration est symétrique, et les bandes blanches représentent la différence entre les dimensions des images des essais (au centre) et de calibration ; on voit bien ici que l'intersection de droite sur la mire ne serait pas visible sans élargissement.



Figure 2-22 : Images prises avec la mire et servant de base à la recombinaison.

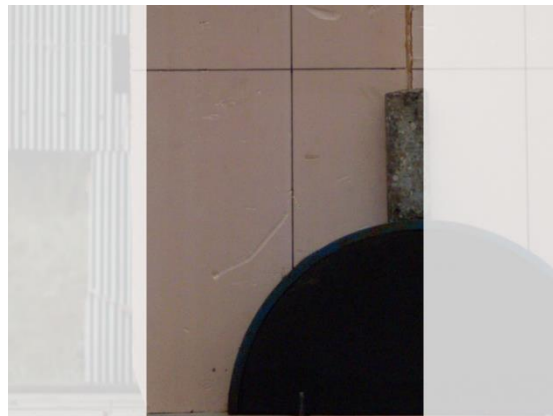


Figure 2-23 : Illustration du changement de résolution des images de calibration.

L'exemple qui sera dans cette partie détaillé est la recombinaison des images présentées dans la Figure 2-22. Les intersections des lignes sur ces images de calibration servent de repère pour les superposer, et il faut donc repérer leur position dans chaque image pour pouvoir les recombinaison. Pour cela, une fois les images à

superposer chargées dans l'algorithme (de 2 à 4 images), il faut sélectionner la position des intersections sur chacune d'entre elles (Figure 2-24). Ce faisant, l'algorithme calcule la distance en pixels entre les deux intersections ; en effet, cette distance doit être la même sur toutes les images pour pouvoir les combiner. Par ailleurs, les lignes étant écartées de 50 cm, il est ainsi possible de déterminer le nombre de pixels par mètre dans les images, ce qui servira à établir une échelle.

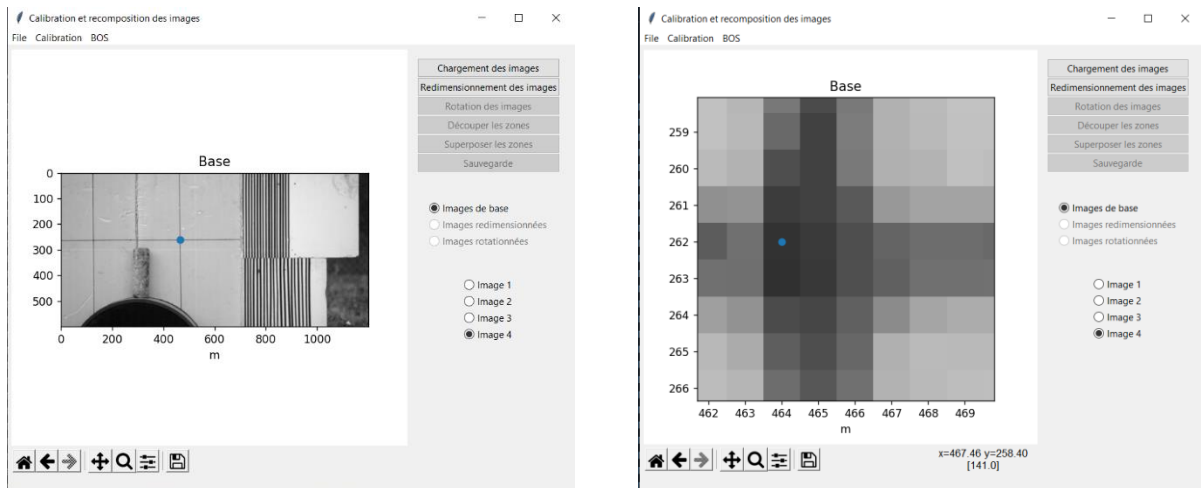


Figure 2-24 : Repérage des intersections sur les images de calibration.

En l'occurrence, dans cet exemple, il apparaît que le nombre de pixels entre les droites est différent entre les images de calibration (Figure 2-25). Cet écart peut être dû à une légère différence de distance entre la caméra et la mire, etc. Dans le cas où les images ne présentent pas la même échelle, les images trop grandes sont redimensionnées pour coller à la distance la plus petite ; ce choix a été fait afin de ne pas créer de fausses données qui n'auraient pas de sens physique et seraient uniquement dues à l'étirage d'une image. Cela s'effectue avec la fonction *resize* d'OpenCV [178].

```
[[409, 92]]
[[409, 92], [747, 91]]
[[71, 89]]
[[71, 89], [410, 88]]
[[14, 89]]
[[14, 89], [354, 90]]
[[126, 263]]
[[126, 263], [465, 262]]
Les points de repère de chaque image ont été enregistrés

Distance 1 : 338
Distance 2 : 339
Distance 3 : 340
Distance 4 : 339
Des images doivent être redimensionnées
```

2.3 Méthodologie

Figure 2-25 : Sortie de la console Ipython après avoir sélectionné les intersections sur les images de calibration.

Une fois que les images le nécessitant ont été redimensionnées, il faut sélectionner à nouveau les points de repère afin de vérifier que l'opération s'est effectuée correctement. Les coordonnées des points enregistrées permettent également de déterminer si les images sont alignées horizontalement avec l'image 1, qui sert de repère pour cette opération. Ainsi, dans cet exemple, il apparaît que l'image 3 n'est pas tout à fait alignée avec l'image 1, avec un décalage de $-0,51^\circ$ (Figure 2-26), et nécessite donc une rotation pour corriger cet écart. Cette opération est réalisée par les fonctions *getRotationMatrix2D* et *warpAffine* d'OpenCV [178].

```
Des images doivent être redimensionnées

Passage au traitement des points de repère
Image 2 redimensionnée
Image 3 redimensionnée
Image 4 redimensionnée
[[71, 89]]
[[71, 89], [409, 88]]
[[14, 88]]
[[14, 88], [352, 90]]
[[125, 262]]
[[125, 262], [463, 261]]
ok
Ancienne distance 1 338.0014792867037
Nouvelle distance 1 338.0014792867037

Ancienne distance 2 339.0014749230451
Nouvelle distance 2 338.0014792867037

Ancienne distance 3 340.00147058505496
Nouvelle distance 3 338.00591710797016

Ancienne distance 4 339.0014749230451
Nouvelle distance 4 338.0014792867037

Vérification de l'alignement horizontal des images

phi_1= 0.0
phi_2= 0.0
phi_3= -0.5085379704285261
phi_4= 0.0
```

Figure 2-26 : Sortie de la console Ipython après avoir sélectionné les intersections sur les images redimensionnées.

De même que pour le redimensionnement, après avoir fait pivoter les images en ayant besoin (ici l'image 3), il est nécessaire de sélectionner la position des intersections sur l'image afin de vérifier que la correction d'alignement a bien été effectuée (Figure 2-27). Une fois cette étape accomplie, toutes les images ont la même échelle (*i.e.* le même nombre de pixels entre les deux intersections) et le même alignement horizontal. Grâce à cela, il est alors possible de découper chaque image en neuf zones délimitées par ces deux points (Figure 2-28), et dont la zone V a la même dimension pour toutes les images.

```

Vérification de l'alignement horizontal des images

phi_1= 0.0
phi_2= 0.0
phi_3= -0.5085379704285261
phi_4= 0.0

Vérifications d'alignement terminées
Image 3 non alignée, rotation nécessaire ; phi_3=
-0.5085379704285261
[[14, 88]]
[[14, 88], [352, 87]]
phirotate_1= 0.0
phirotate_2= 0.0
phirotate_3= 0.0
phirotate_4= 0.0

```

Figure 2-27 : Sortie de la console Ipython après avoir sélectionné les intersections sur les images pivotées.

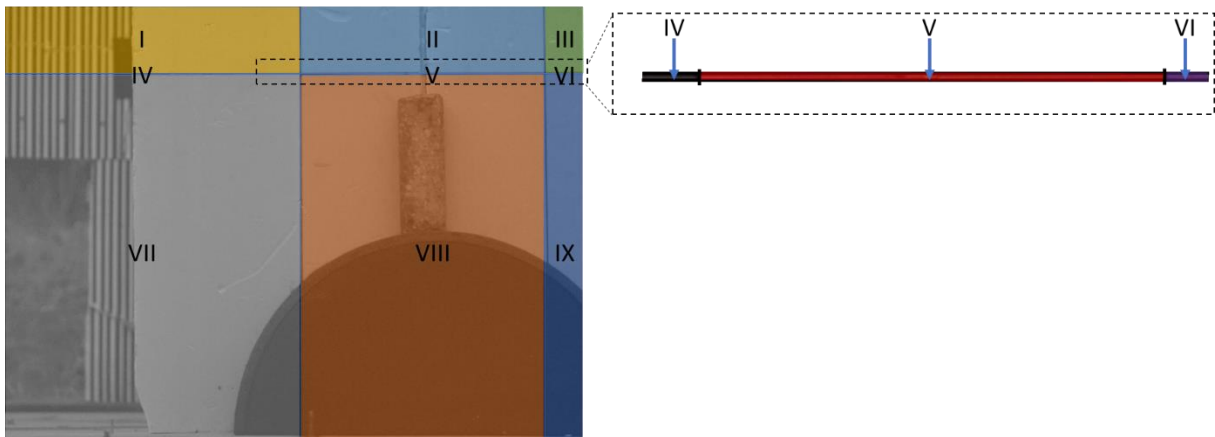


Figure 2-28 : Découpage d'une image en neuf zones.

Une fois les images découpées en neuf zones, celles-ci doivent être superposées pour recomposer l'image complète. Les zones sont superposées par numéro : les zones I des images 1 à 4, les zones II des images 1 à 4, etc. Cette superposition est rendue complexe par la différence de dimensions des zones des différentes images ; par exemple, la zone I de l'image est orientée horizontalement, tandis que celle de l'image 3 est verticale. Une fonction récursive a donc été développée, permettant de superposer d'une à 4 zones, quelles que soient leurs dimensions, en fonction du coin dans lesquelles elles se rejoignent (par exemple, le coin inférieur droit pour les zones I, ou supérieur gauche pour les zones IX). Une fois les neuf zones superposées, elles sont recollées (concaténées) afin de reconstruire l'image recomposée finale, présentée dans la Figure 2-29. Enfin, les points de repère sont sélectionnés une dernière fois pour vérifier leur position et l'échelle de l'image. La position de l'hémicylindre est également relevée, ce qui permet de vérifier la cohérence et

2.3 Méthodologie

l'uniformité de l'échelle déterminée avec la mire, mais aussi de doter les images d'un repère commun pour déterminer précisément la position des éléments d'intérêt. Finalement, il est possible de sauvegarder les paramètres de la calibration (échelle, images redimensionnées, angles de rotation...).

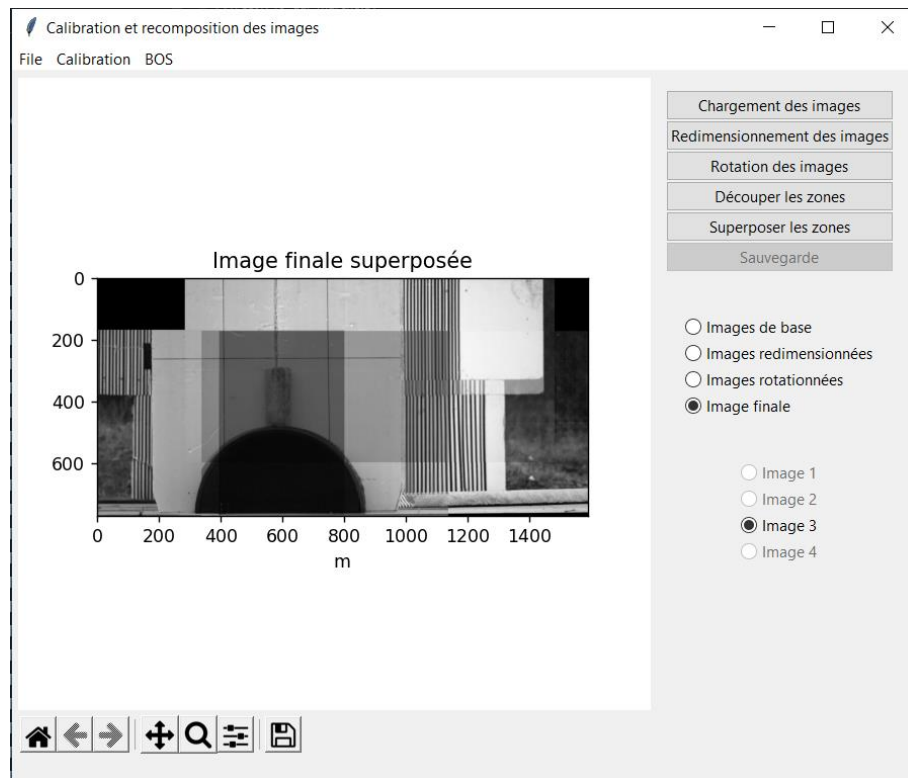


Figure 2-29 : Résultat de la recomposition des images de calibration.

2.3.2.2 Module Suivi d'onde de l'application

Le deuxième module de l'application doit permettre de suivre la trajectoire de l'onde de souffle et de ses différentes composantes. Il permet de faire défiler les images choisies pour l'étude et de sélectionner des points particuliers sur celle-ci, qui seront enregistrés dans des listes. Les boutons *Onde incidente*, *Onde réfléchie* et *Onde de Mach* présents dans la partie droite de la fenêtre permettent de choisir la liste dans laquelle les points sont enregistrés, et le bouton *Ajouter liste pour suivre point(s)* permet de créer des listes personnalisées pour suivre des points d'intérêt (point triple, ligne de glissement, projectile, etc.) ; enfin, il est possible de sauvegarder les listes ainsi remplies dans un même fichier texte. Si l'onde de souffle est difficilement visible dans les images brutes, il est possible de recourir à un traitement d'image de type BOS

(*Background Oriented Schlieren*) [147], illustré dans la Figure 2-30. Cette méthode repose sur la soustraction d'image : les valeurs des pixels d'une image de référence sont soustraites à celles de l'image à traiter ; dans le cas de cet algorithme, l'image de référence pour la soustraction est choisie par l'utilisateur, ici une des premières images prises après la détonation de la charge explosive, dont la luminosité est proche de celle des images à traiter. Une fonction a été ajoutée permettant de charger un fichier de sauvegarde créé avec le module Calibration de l'application ; il est alors possible de récupérer des informations telles que l'échelle de l'image, ou encore la liste des modifications qui ont été réalisées sur chaque image de calibration (redimensionnement, rotation...). Toutefois, comme on le voit dans la Figure 2-30, une seule image est traitée à la fois dans ce module, tandis que le fichier de sauvegarde contient les informations de plusieurs images. Un index établissant la liste des essais réalisés et les images de calibration associées a été créé pour que, lors de l'analyse d'images, si un fichier de sauvegarde a été chargé, l'algorithme établisse le lien entre le numéro d'essai des images étudiées et les images de calibration associées. Ce lien fait, il sera alors possible d'appliquer systématiquement les mêmes transformations des images de calibration aux images étudiées, et ainsi connaître précisément la position des points de l'image. Enfin, il sera donc possible de suivre finement la position et la trajectoire du choc et de ses composantes ; dans le cas de notre installation, la précision est d'environ 1,8mm/pixel.

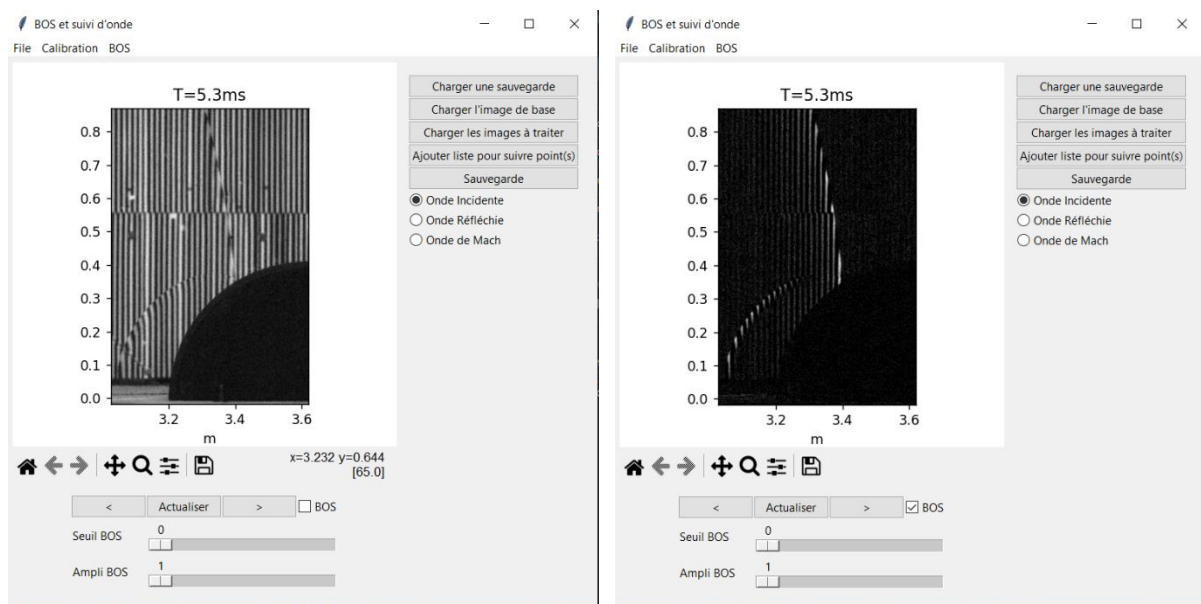


Figure 2-30 : Interface du module de suivi d'onde classique (gauche), et avec BOS (droite).

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux obtenus au cours de ce travail dans les deux installations expérimentales utilisées et décrites dans le chapitre 2. L'analyse de la présence d'un ou deux obstacles sur la trajectoire de l'onde de souffle générée lors de la détonation d'une charge explosive, et des champs de pression dans l'environnement, nécessite la connaissance préalable de ses propriétés en champ libre, i.e. en l'absence de tout obstacle. Dans ce chapitre, les caractéristiques des ondes de souffle, en termes de surpression, de temps d'arrivée et d'impulsion, en champ libre, seront d'abord présentés, puis celles relevées en présence d'un obstacle hémicylindrique, puis de deux obstacles consécutifs. Ces caractéristiques sont comparées aux valeurs issues de la littérature [12], [63], [88], [90].

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

La caractérisation des ondes de souffle en champ libre a été entreprise avec des expériences à l'IRSN (échelle réduite) et à l'ISL (échelle double).

À l'IRSN, des expériences dédiées ont été réalisées pour la caractérisation des ondes de souffle en champ libre. En effet, l'installation expérimentale ne permet pas de mesures la pression loin de l'obstacle.

À l'ISL, de par la disposition des capteurs sur la dalle de tir, il est possible de mesures les caractéristiques des ondes de souffle en absence d'interaction avec le ou les obstacle(s). Ainsi, pour chaque tir effectué les mesures de la propagation des ondes de souffle et des champs de pression générés sont possibles avec le ou les obstacle(s). Il n'est pas nécessaire d'effectuer des essais dédiés aux mesures en champs libres.

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

3.1.1 Mesures en champ libre de l'IRSN

3.1.1.1 Mesures de Répétabilité

Pour l'étude menée à l'IRSN, deux campagnes expérimentales ont été réalisées portant sur la détonation d'une charge hémisphérique de 42 g d'Hexomax®. Pour chaque campagne expérimentale, au moins une même position était toujours équipée d'un capteur de pression afin de disposer d'une référence entre différents essais pour une même charge (répétabilité) et pour analyser différentes charges (essais comparatifs). Pour la première campagne expérimentale, notée CE9 regroupant 13 essais, les capteurs K10 (distance par rapport à la charge, $d_{\text{charge-Capteur}} = 0,27 \text{ m}$) et K11 ($d_{\text{charge-Capteur}} = 0,93 \text{ m}$) ont été conservés pour l'ensemble des essais (Figure 3-1-a). Pour la seconde campagne expérimentale, notée CE10 et regroupant 26 essais, seul le capteur K11 ($d_{\text{charge-Capteur}} = 0,93 \text{ m}$) a été conservé pour tous les essais (Figure 3-1-b et -c).

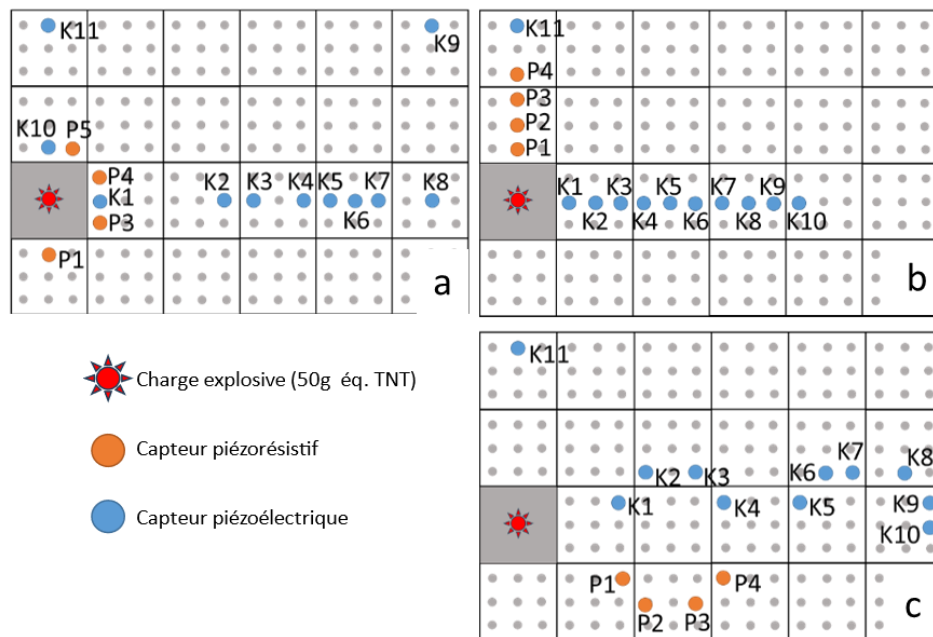


Figure 3-1 : Configurations en champ libre étudiées à l'IRSN. a : campagne expérimentale CE9, b et c : campagne expérimentale CE10.

Chaque signal temporel de pression mesuré est analysé afin de déterminer :

- Le temps d'arrivée de l'onde de souffle, $t_{a,exp}$, mesuré au pied du front montant de pression,

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

- La surpression maximale, $\Delta P_{\max, \exp}$
- L'impulsion positive, $I^+_{\exp}$.

Ces valeurs expérimentales sont comparées à celles estimées sur la base des équations de Kinney et Graham [12] et de l'AMCP [88]. L'ensemble des résultats sont reportés sur la Figure 3-2 pour le capteur K10 et la Figure 3-3 pour le capteur K11.

A une distance de 0,27 m, les mesures de pression n'ont été réalisées que pour la campagne CE9. On peut voir sur la Figure 3-2 (i) que la surpression maximale, $\Delta P_{\max, \exp}$, enregistrée pour les 13 essais, est de $30,18 \pm 1,87$ bar soit une dispersion expérimentale de 6 % correspondant à l'erreur due à la répétabilité des essais, comme étudié au chapitre 2.3.1. Pour une charge de 42g d'Hexomax®, la surpression à une distance de 0,27 m est de 30,8 bar selon Kinney et Graham [12] et de 31,8 bar selon l'AMCP [88]. Ainsi, nous observons un excellent accord entre les valeurs expérimentales et celles déduites des équations et abaques de la littérature à cette distance. La dispersion de nos résultats est nettement plus faible que celle rapportée dans la littérature. En effet, Cheval *et al.* [124] indiquent une dispersion de 15 %, tandis que Needham [76] rapporte une dispersion de 10 à 20 %. Il est à noter que dans le cas de l'essai N°1, le signal de pression n'a pas permis de mesurer $\Delta P_{\max, \exp}$ et $I^+_{\exp}$, seul le temps d'arrivée a pu l'être.

Les temps d'arrivée de l'onde de souffle à cette position, $t_{a, \exp}$, varient entre 0,068 ms et 0,094 ms soit un $t_{a, \exp}$ moyen de $0,083 \pm 0,002$ ms correspondant à une dispersion de 2 %. Selon Kinney et Graham [12], le temps d'arrivée serait de 0,083 ms ce qui est quasi-identique à la valeur prédite par l'AMCP [88] correspondant à 0,084 ms. Nous notons encore une fois l'excellent accord entre valeurs mesurées et valeurs déduites des équations et abaques de la littérature.

L'impulsion positive $I^+_{\exp}$ mesurée sur l'ensemble des essais est de $0,715 \pm 0,030$ bar.ms soit une dispersion de 4 %. L'impulsion positive estimée à partir des équations théoriques de Kinney et Graham [12] est de 0,585 bar.ms et elle est de 0,606 bar.ms pour l'AMCP [88]. Nous notons aussi l'excellent accord entre expériences et valeurs théoriques. La dispersion donnée par Cheval *et al.* [124] est de 20 %..

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

Ces essais nous ont ainsi permis de vérifier la répétabilité de la mesure sur 13 essais distincts obtenus lors de la même campagne expérimentale à une distance de 0,27 m.

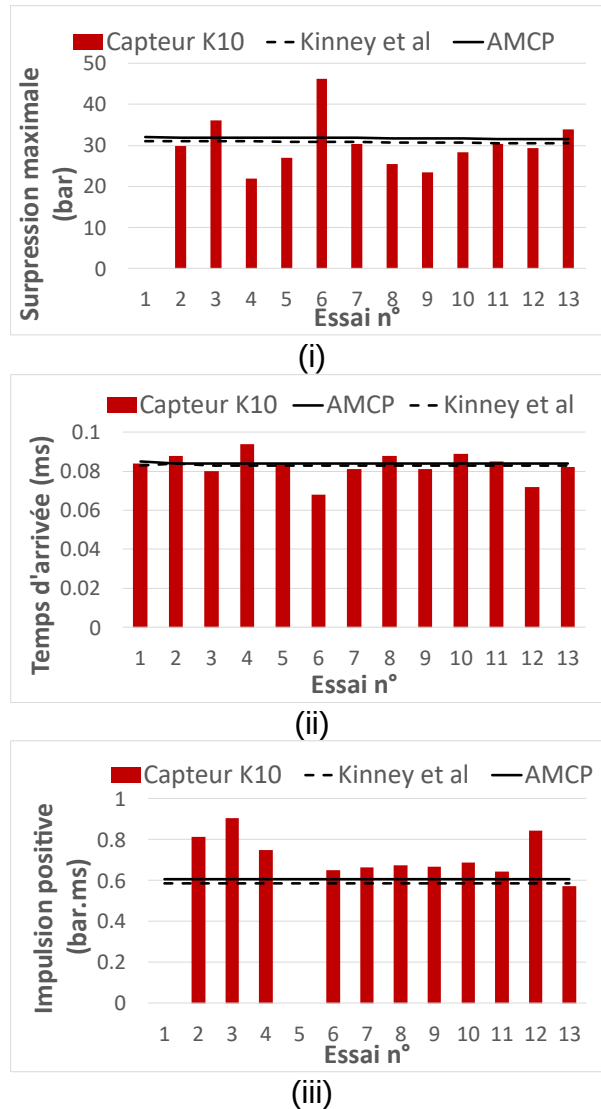


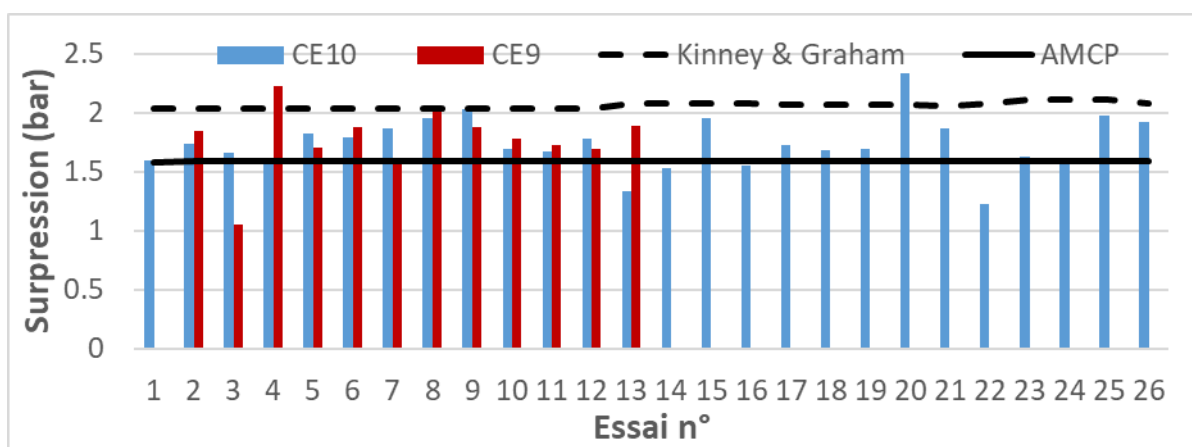
Figure 3-2 : Caractéristiques du souffle mesurées par le capteur K10 lors de la campagne expérimentale CE9 de l'IRSN. Charge 42 g d'Hexomax®.

A une distance de 0,93 m, la pression a été mesurée par le même capteur pour les deux campagnes expérimentales. Nous disposons ainsi de 39 essais au total, 13 pour la campagne CE9 et 26 pour la campagne CE10. Cette série d'essais permet non seulement d'évaluer la répétabilité campagne par campagne mais aussi de vérifier la cohérence des résultats obtenus lorsque les essais sont réalisés avec une coupure temporelle importante (environ 24 mois entre CE9 et CE10).

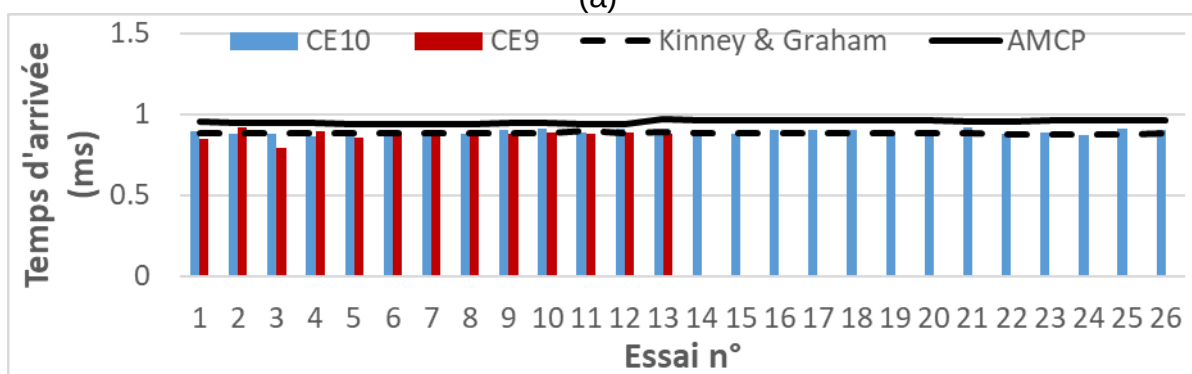
3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Les résultats, en termes de surpression maximale, temps d'arrivée et impulsion positive, pour chaque essai sont reportés sur la Figure 3-3.

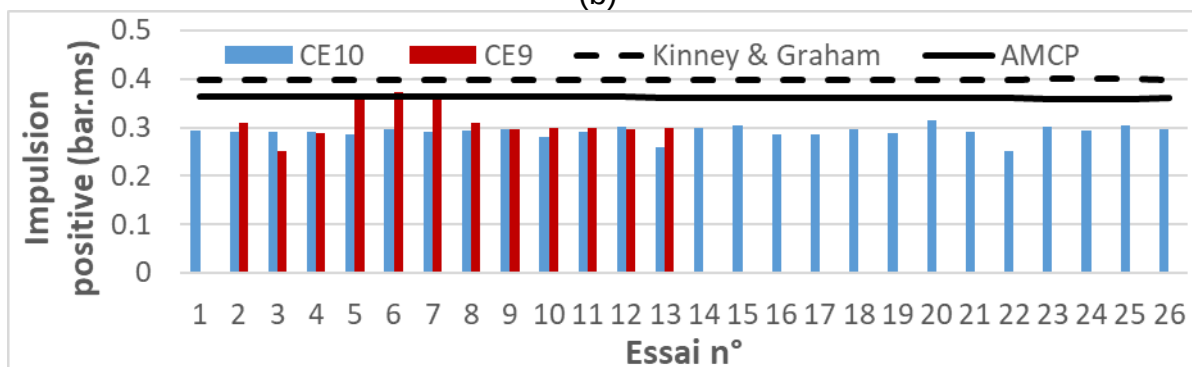
La surpression maximale $\Delta P_{\max, \exp}$ vaut $1,77 \pm 0,08$ bar pour la campagne CE9 et elle est de $1,74 \pm 0,1$ bar pour CE10. La moyenne sur l'ensemble des essais est de $1,75 \pm 0,01$ bar. Cette valeur est comprise entre la valeur prédite par Kinney et Graham et celle prédite par l'AMCP (Tableau 3-1). La dispersion expérimentale est de 4,6 % (CE9) et 6% (CE10), correspondant à 0,4% sur l'ensemble des 39 tirs. On note ainsi, une excellente répétabilité des essais à cette distance.



(a)



(b)



(c)

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

Figure 3-3 : Caractéristiques du souffle mesurées par le capteur K11 lors des campagnes expérimentales CE9 et CE10 de l'IRSN. Charge 42 g d'Hexomax®.

Les temps d'arrivée sont très proches, $0,877 \pm 0,008$ ms pour CE9 et $0,893 \pm 0,003$ ms pour CE10. La moyenne sur l'ensemble des 39 essais est de $0,887 \pm 0,001$ ms ce qui correspond à la valeur prédite par Kinney et Graham (0,886 ms), en revanche elle est plus faible que celle déduite des abaques de l'ACMP (0,954 ms) comme on peut le voir dans le Tableau 3-1.

Les impulsions mesurées lors des deux campagnes sont aussi très proches, I^+_{exp} est de $0,312 \pm 0,010$ bar.ms pour CE9 et $0,291 \pm 0,002$ bar.ms pour CE10. La valeur moyenne sur l'ensemble des deux campagnes, $0,298 \pm 0,001$ bar.ms, est plus basse que les valeurs de la littérature qui sont de 0,399 bar.ms pour Kinney et Graham et de 0,362 bar.ms pour l'AMCP. Cependant, les valeurs sont très proches.

Tableau 3-1 : Caractéristiques moyennes des ondes de souffle déduites du signal du capteur K11 situé à 0,93 m de la charge lors des campagnes CE9 et CE10. Charge 42 g d'Hexomax®. ΔP_{max} : surpression maximale, t_a : temps d'arrivée, I^+ : impulsion positive.

		CE9	CE10	CE9 et CE10
ΔP_{max} (bar)	Ce travail	$1,77 \pm 0,08$	$1,74 \pm 0,04$	$1,75 \pm 0,01$
	Kinney et Graham	2,06		
	AMCP	1,59		
t_a (ms)	Ce travail	$0,877 \pm 0,008$	$0,893 \pm 0,003$	$0,887 \pm 0,001$
	Kinney et Graham	0,886		
	AMCP	0,954		
I^+ (bar.ms)	Exp	$0,312 \pm 0,010$	$0,291 \pm 0,002$	$0,298 \pm 0,001$
	Kinney et Graham	0,399		
	AMCP	0,362		

3.1.1.2 Caractéristiques des ondes de souffle

La caractérisation de l'onde de souffle suite à l'explosion d'une charge de 42 g d'Hexomax®, équivalente à 50g de TNT, est réalisée au moyen de différents capteurs. Dans un premier temps, nous allons nous intéresser aux mesures réalisées par les capteurs piézo-électriques. La Figure 3-4 présente un exemple des profils temporels de pression enregistrés à différentes positions : K4 est situé à 0,67 m, K7 à 1,07 m et K10 à 1,47 m. De cette figure, on peut déduire le temps d'arrivée de l'onde de souffle

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

à une position donnée, le maximum de pression atteint à cette position et la durée de la phase positive de la surpression : $\Delta P_{\max, \exp}$ mesurée est de $3,96 \pm 0,02$ bar à 0,67 m et chute à $1,11 \pm 0,01$ bar et $0,73 \pm 0,00$ bar à respectivement 1,07 et 1,47 m. Les temps d'arrivée, $t_{a, \exp}$, sont respectivement de $0,465 \pm 0,002$ ms, $1,172 \pm 0,002$ ms et $2,058 \pm 0,002$ ms à respectivement 0,67 m, 1,07 et 1,47 m. Les impulsions positives $I^+_{\exp}$, sont respectivement de $0,372 \pm 0,003$ bar.ms, $0,281 \pm 0,003$ bar.ms et $0,232 \pm 0,000$ bar.ms lorsque la distance entre la charge et les capteurs varie de 0,67 m à 1,47 m.

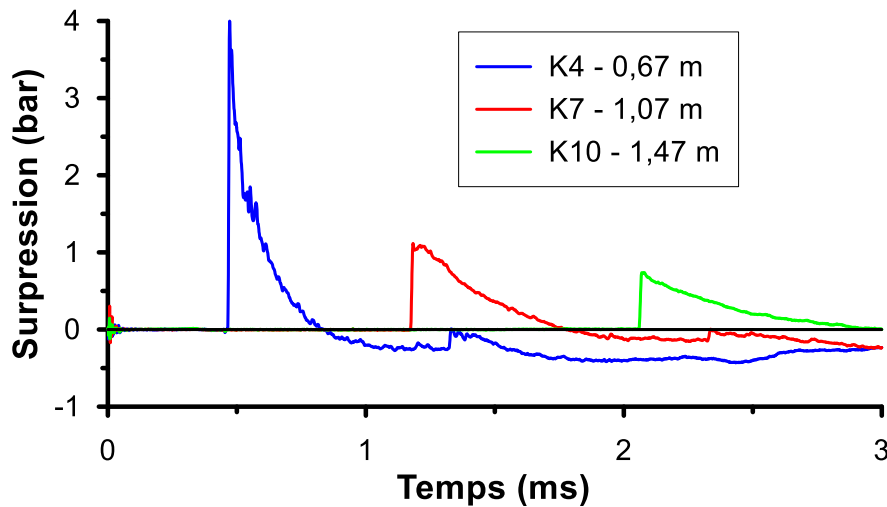


Figure 3-4 : Exemple de signaux de pression mesurés à distance différentes de la charge. $d_{\text{Charge-K4}} = 0,67$ m, $d_{\text{Charge-K7}} = 1,07$ m, $d_{\text{Charge-K10}} = 1,47$ m. Essai N°4 de la CE10.

Les caractéristiques de l'onde de souffle sont comparées aux valeurs estimées, pour un équivalent TNT de 50g, à partir de 4 méthodes de la littérature :

- Kinney et Graham [12]
- AMCP [88]
- Kingery et Bulmash [90]
- UFC 3-340-02 [63]

Pour cela, les valeurs des surpressions maximales observées normalisées par la valeur de la pression initiale, $\Delta P_{\max, \exp}/P_0$, sont reportées en fonction de la distance réduite Z sur la Figure 3-5. Comme on peut le voir, sur le domaine investigué compris entre $0,5$ et $5 \text{ m.kg}^{-1/3}$, les valeurs expérimentales sont en excellents accords avec les valeurs prédites par les différentes méthodes. Les valeurs mesurées présentent un écart relatif moyen de 17% par rapport aux valeurs prédites par Kinney-Graham, 11%

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

par rapport à Kingery, 10% par rapport à l'UFC et de 8% par rapport à l'AMCP. On peut aussi noter la bonne reproductibilité des résultats avec une dispersion expérimentale faible (Figure 3-5).

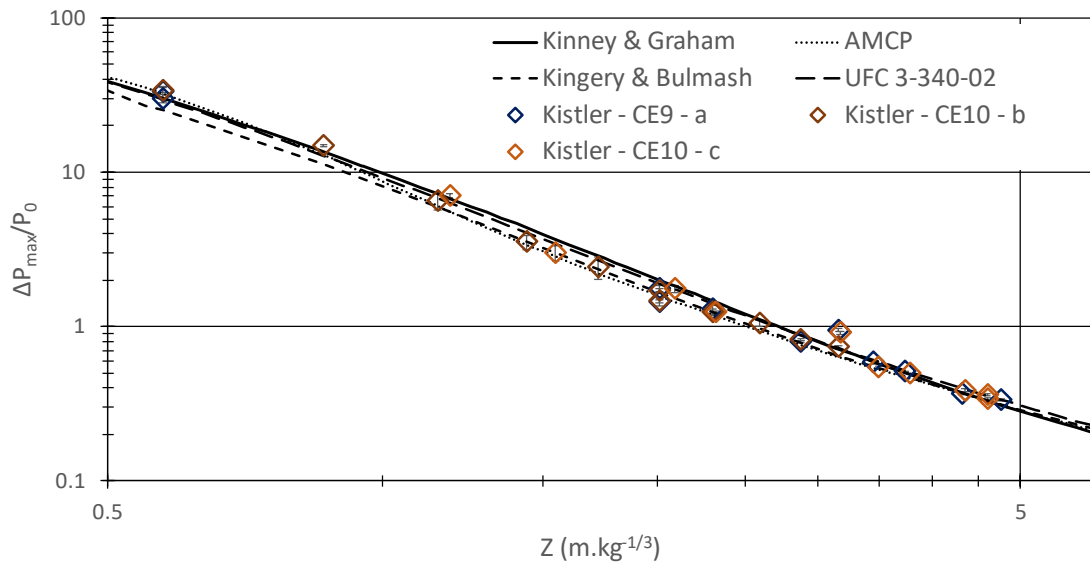


Figure 3-5 : Évolution de la surpression normalisée, $\Delta P_{\max}/P_0$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].

Les temps d'arrivée réduits de l'onde de souffle, expérimentaux et estimés, en fonction de la distance réduite Z sont reportés sur la Figure 3-6. On note aussi un très bon accord avec moins de 2% d'écart entre valeurs mesurées et calculées aussi bien en champ proche qu'en champ lointain.

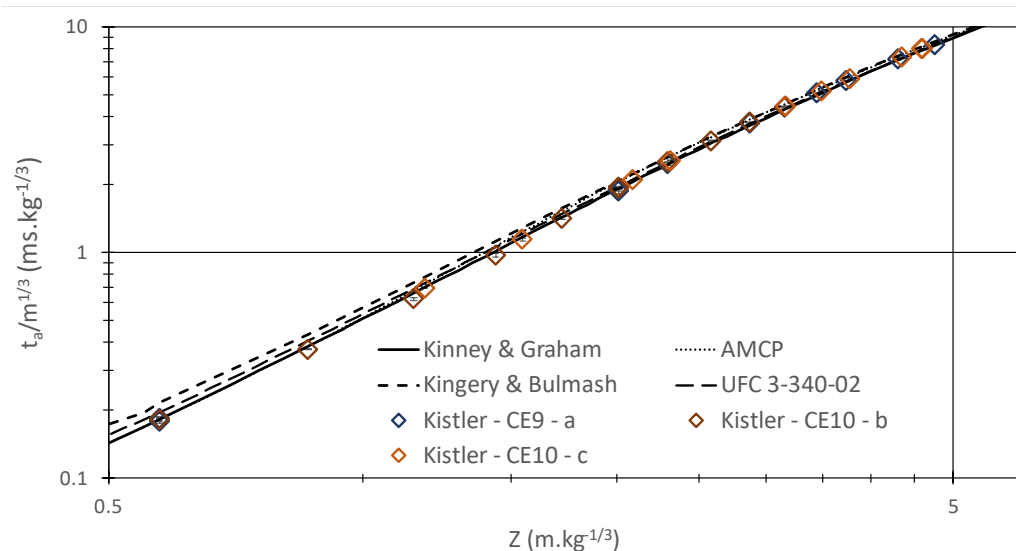


Figure 3-6 : Évolution du temps d'arrivée réduit de l'onde de souffle, $t_a/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].

Les impulsions positives réduites, $I^+_{\text{exp}}/m^{1/3}$, sont reportées sur la Figure 3-7 en fonction de la distance réduite Z ainsi que celles estimées. On peut noter une plus grande dispersion des résultats, aussi bien mesurés que calculés. Concernant les mesures estimées, la méthode de l'UFC donne systématiquement les valeurs les plus élevées tandis que la méthode de Kinney et Graham résulte en les valeurs les plus basses. Les valeurs issues des méthodes de Kingery et Bulmash et de l'AMCP sont comprises entre celles issues des deux autres méthodes. Pour des distances réduites supérieures à $1,5 \text{ m.kg}^{-1/3}$, Kinney et Graham et AMCP donnent des valeurs similaires. Les impulsions positives expérimentales présentent aussi une dispersion importante. Si, pour des distances réduites Z inférieures à $1 \text{ m.kg}^{-1/3}$, les méthode UFC et Kingery et Bulmash semblent plus adéquates, le faible nombre d'essais dans cette gamme ne permet pas de tirer une conclusion définitive. En revanche, pour des distances réduites supérieures à $1,5 \text{ m.kg}^{-1/3}$, les résultats expérimentaux semblent en accord avec les estimations basées sur Kinney et Graham.

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

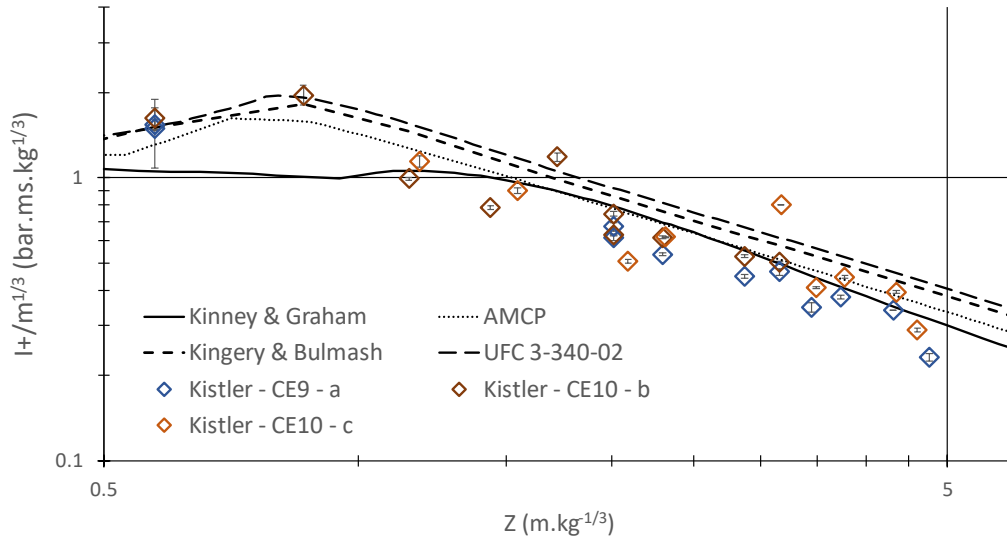


Figure 3-7 : Évolution de l'impulsion positive réduite, $I^+_{exp}/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour une charge de 42 g d'Hexomax®. Symbole : mesures par des capteurs piézo-électriques ; Lignes : estimées[12], [63], [88], [90].

Il est important de noter que la taille de la table de détonation, de dimension finie, peut avoir aussi un impact sur la mesure de l'impulsion positive en raison d'un artéfact expérimental. Cet artéfact est bien illustré lorsque l'on compare deux capteurs de pression, situés à la même distance de la charge, $d_{charge-Capteur} = 0,93$ m : K11 situé en bord de table et K6 situé loin du bord ((Figure 3-1-a et -b). La Figure 3-8 illustre les profils temporels de la pression mesurés par les capteurs K6 et K11 pour 4 essais (Tir 1 à 4). On peut noter que les profils de pression mesurés par le K11 sont systématiquement plus faibles à partir d'environ 1,2 ms que ceux mesurés par le K6, sur toute la phase positive de la surpression. De même, la phase négative, mesurée par le K11, débute systématiquement plus tôt que celle mesurée par le K6. Cette différence de comportement temporel est responsable d'une impulsion positive, mesurée par le capteur de référence K11, inférieure de 15% à celle mesurée par le capteur K6. En effet, lorsque l'onde de souffle atteint le bord de la table, une onde de détente est créée. L'onde de détente sera détectée par le capteur après un délai estimé comme étant l'intervalle de temps séparant le front de choc incident et le temps nécessaire pour que ce dernier atteigne le bord de la table auquel se rajoute le temps nécessaire pour que l'onde de détente parcoure la distance séparant le bord de la table de la position du capteur :

$$t_{parcours} = \frac{d_{capteur-bord}}{V_{onde\ incidente}} + \frac{d_{capteur-bord}}{V_{onde\ sonique}} = \frac{0,067}{565} + \frac{0,067}{340} = 314 \mu s$$

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Cette estimation du temps de parcours correspond bien à l'évolution temporelle de la pression reportée dans la Figure 3-8 : l'onde de souffle est détectée par le capteur à environ 0,9 ms et la divergence des profils de pression entre le K11 (affectée par l'onde de détente) et le K6 (absence de l'onde de détente) se produit vers 1,2 ms. Cet effet de la remontée de l'onde de détente (appelé aussi clearing en anglais) sur le profil temporel de la pression, proche du bord de la table, a aussi été observé dans d'autres études de la littérature [179], [180].

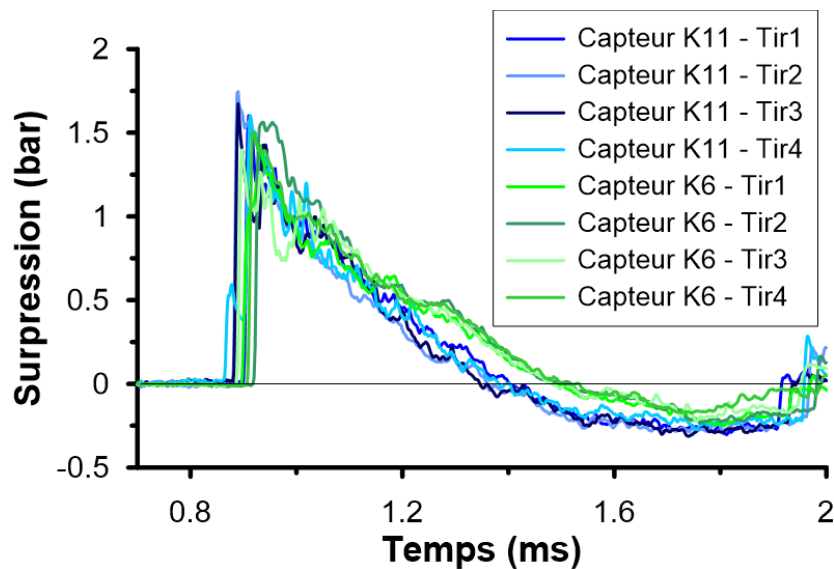


Figure 3-8 : Illustration de l'effet de remontée d'ondes de détente.

Dans un second temps, nous allons nous intéresser aux signaux de pression délivrés par les capteurs piézorésistifs. La Figure 3-9 illustre un exemple des profils temporels de pression enregistrés à différentes positions : P1 est situé à 0,27 m, P2 à 0,4 m, P3 à 0,53 m et P4 à 0,67 m.

Les profils temporels de la pression mesurés par les capteurs exhibent la forme typique de Friedlander : une augmentation brutale de la pression à l'arrivée de l'onde de souffle, puis une décroissance de la pression lente en fonction du temps. Sur la plage d'observation, soit sur un temps total de 1 ms, les capteurs de pression P1 et P2, les plus proches de la charge, enregistrent un second saut de pression due à l'arrivée de l'onde de choc secondaire. Cette onde de choc secondaire prend naissance lors de l'interaction entre l'onde de détente réfléchiée et la surface de contact entre les gaz brûlés en expansion et l'air environnant [181], [182]. Ainsi, la surpression enregistrée par ces deux capteurs est toujours positive sans jamais revenir à une

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

valeur nulle. Les capteurs de pression P3 et P4, respectivement à 0,53 et 0,67 m, n'enregistrent pas de passage de l'onde secondaire qui doit arriver bien au-delà de 1 ms. Après une phase positive, on voit nettement la surpression négative avec le P3 et elle est moins visible sur le P4 (Figure 3-9). Ainsi, si $\Delta P_{\max, \exp}$ et $t_{a, \exp}$ peuvent être déduits de l'ensemble des capteurs, P1 à P4, il n'en est pas de même de $I^+_{\exp}$ qui ne peut être déduite que des capteurs P3 et P4.

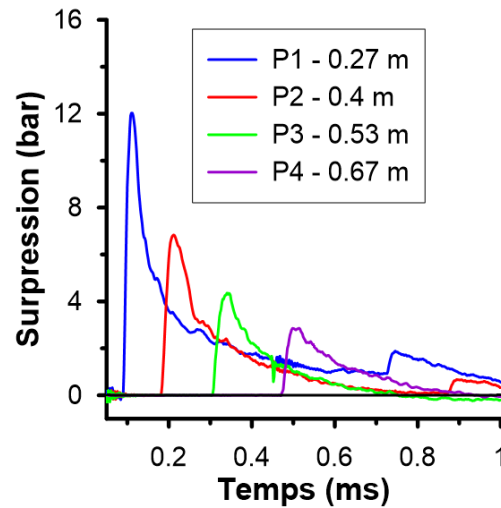


Figure 3-9 : Exemple de signaux de pression mesurés à distance différentes de la charge. $d_{\text{Charge-P1}} = 0,27$ m, $d_{\text{Charge-P2}} = 0,4$ m, $d_{\text{Charge-P3}} = 0,53$ m, $d_{\text{Charge-P4}} = 0,67$ m. Essai N°1 de la CE10.

Les résultats des mesures de $\Delta P_{\exp}$, $I^+_{\exp}$ et $t_{a, \exp}$ sont regroupés dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : Récapitulatifs des caractéristiques de l'onde de souffle générée lors de l'essai N°1 de la campagne d'essais CE10.

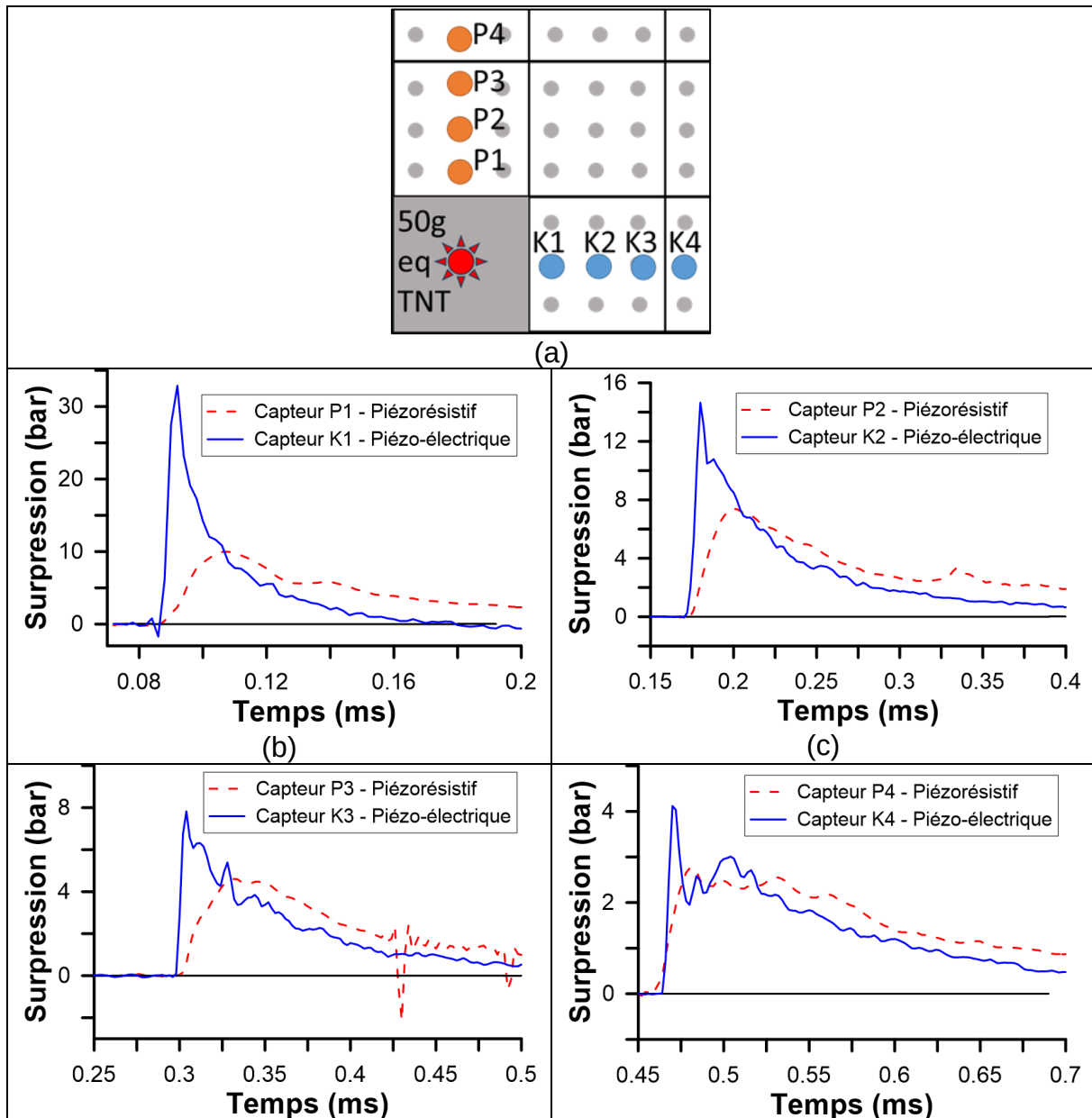
	Position (m)	$\Delta P_{\max, \exp}$ (bar)	$t_{a, \exp}$ (ms)	$I^+_{\exp}$ (bar.ms)
P1	0,27	$12,09 \pm 0,03$	$0,09 \pm 0,002$	/
P2	0,4	$6,84 \pm 0,02$	$0,18 \pm 0,002$	/
P3	0,53	$4,35 \pm 0,01$	$0,303 \pm 0,002$	$0,553 \pm 0,005$
P4	0,67	$2,85 \pm 0,01$	$0,471 \pm 0,002$	$0,453 \pm 0,004$

Pour ces campagnes expérimentales, nous pouvons comparer les caractéristiques des ondes de souffle à partir de la mesure de pression de deux technologies de capteurs de pression : (i) les capteurs piézo-électriques et (ii) piézorésistifs. La disposition des capteurs de pression sur la table de détonation permet de comparer les capteurs piézo-électriques (K1 à K4) aux capteurs

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

piézorésistifs (P1 à P4) situés à des positions identiques comme indiqués sur la Figure 3-10-a : les capteurs K1 et P1 situés à 0,27 m, K2 et P2 à 0,40 m, K3 et P3 à 0,53 m, et K4 et P4 à 0,67 m.

Pour les 4 distances investiguées, on note des différences dans les profils temporels de la pression mesurée par chaque technologie de capteur, notamment sur le profil de la pression suite au passage de l'onde de souffle, mais aussi dans la phase de décroissance du signal (Figure 3-10-(b) à (e)). Cependant, si les temps d'arrivée sont similaires (moins de 5,4% d'écart), ceux mesurés par les capteurs piézorésistifs sont systématiquement plus longs que ceux des piézo-électriques.



3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

(d)	(e)
-----	-----

Figure 3-10 : Comparaison de la réponse des capteurs piézo-électriques et piézorésistifs en champ proche.

Toutefois, ils présentent des temps de montée beaucoup plus longs que les signaux des piézo-électriques (20 à 30 μs contre 6 à 10 μs), et des surpressions maximales très inférieures. Cet écart est très important en champ proche (-66% à 0,27 m) mais diminue quand la distance depuis la charge augmente (-18% à 67 cm). Cette tendance, observée à échelle double à l'ISL [183] avec un conditionneur différent, confirment que les capteurs piézorésistifs ne sont pas capables de mesurer fidèlement les surpressions maximales pour des distances réduites inférieures à $1,46 \text{ m.kg}^{-1/3}$ [184].

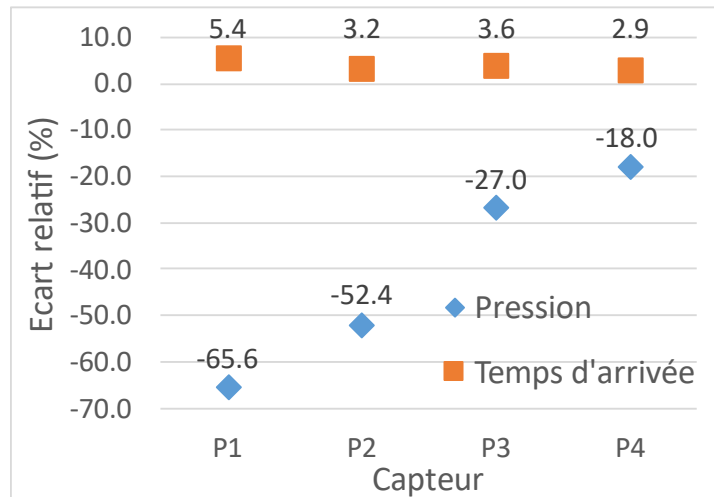


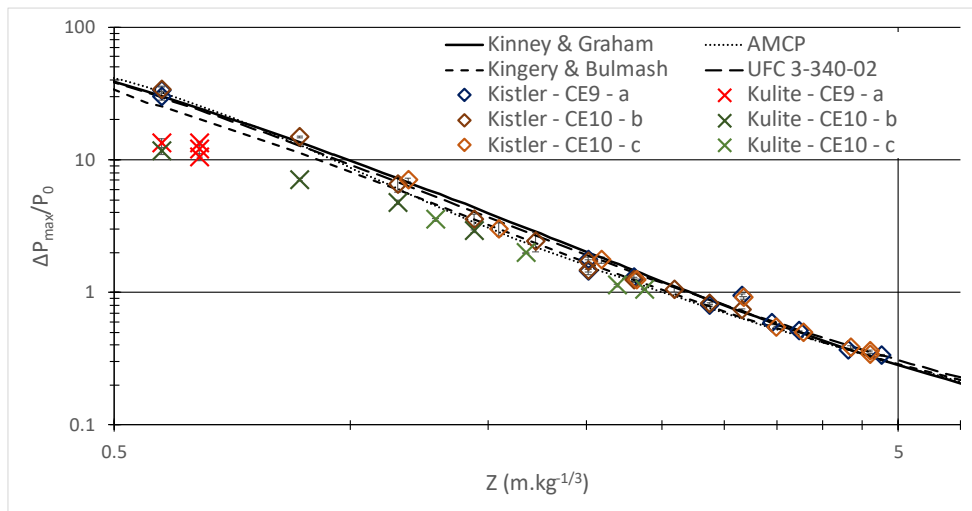
Figure 3-11 : Écart relatif entre les valeurs mesurées par les capteurs piézorésistifs et piézo-électriques.

Afin de mieux comparer les caractéristiques des ondes de souffle déduites des signaux délivrés par les capteurs piézorésistifs, la surpression maximale normalisée par la pression initiale, $\Delta P_{\text{max}}/P_0$, est reportée en fonction de la distance réduite Z sur la Figure 3-12-a. On peut clairement voir que les valeurs déduites des capteurs piézorésistifs sont sensiblement en-dessous des valeurs expérimentales déduites des capteurs piézo-électriques et des valeurs estimées par les 4 méthodes d'évaluation de la littérature. Ce n'est que pour des distances réduites supérieures à $1,46 \text{ m.kg}^{-1/3}$ que l'écart se réduit et que l'on observe un bon accord entre les différentes méthodes de

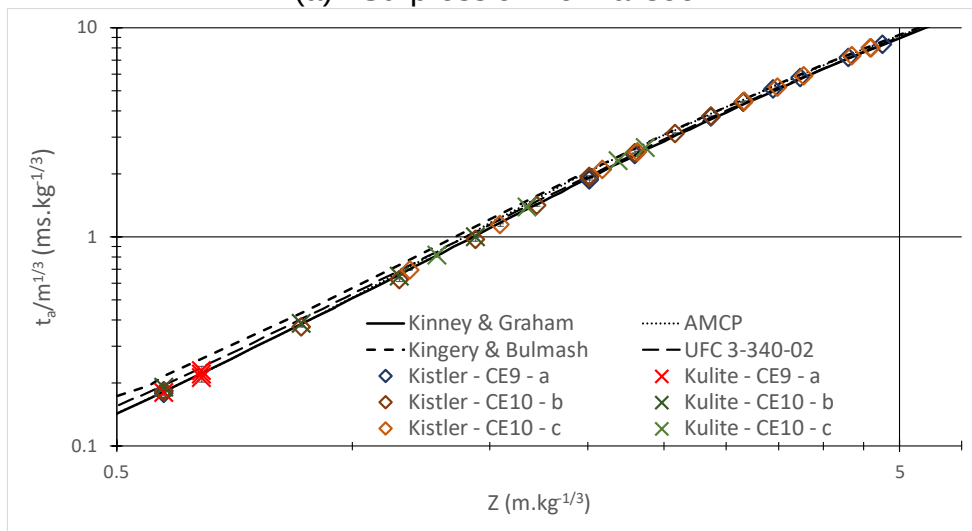
3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

mesures (2 technologies différentes) et d'estimation (4 méthodes de la littérature) de $\Delta P_{\max}/P_0$.

La comparaison des temps d'arrivée réduits en fonction de la distance réduite est reportée sur la Figure 3-12-b. On retrouve une bonne correspondance des temps quelle que soit la technologie ou la méthode d'évaluation et cela sur tout le domaine de distance réduite investigué.

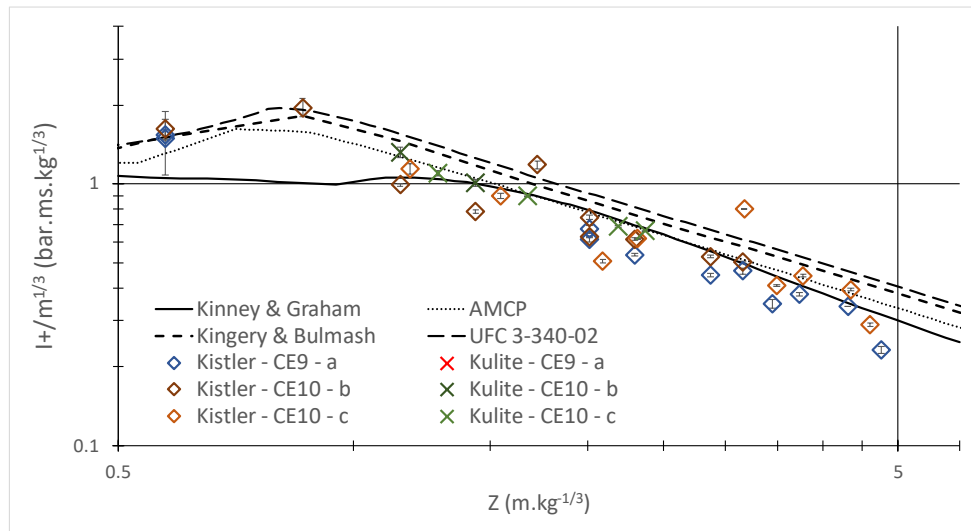


(a) : Surpression normalisée



(b) : temps d'arrivée réduit

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre



(c) : Impulsion positive réduite

Figure 3-12 : Caractéristiques des ondes de souffle déduites des de l'IRSN. Comparaison selon la technologie des capteurs de pression. Comparaison avec les valeurs estimées par la littérature issue de [12], [63], [88], [90].

La Figure 3-12-c illustre la variation de l'impulsion positive réduite en fonction de la distance réduite pour les deux familles de capteurs de pression. Elles sont comparées aux valeurs issues des méthodes d'évaluation de la littérature. Les impulsions positives déduites des capteurs piézorésistifs ont été mesurées sur un domaine plus restreint que pour les capteurs piézo-électriques. Cette dernière est limitée au domaine intermédiaire. Dans ce domaine, nous avons un bon accord entre les différentes valeurs. Ce résultat est cohérent avec les résultats précédents puisque l'écart entre les profils de pression mesurés issus des capteurs piézorésistifs et piézo-électriques se réduit lorsque la distance entre la charge et le capteur de pression augmente.

3.1.2 Résultats en champ libre de l'ISL

Les essais menés à l'ISL, compte-tenu de la disposition de la charge et des différents capteurs de pression (capteurs piézo-électriques au sol et sonde effilée située à l'opposé des obstacles), permettent à la fois de réaliser des mesures en champ libre (sonde effilée) et d'évaluer l'effet de la présence d'un ou deux obstacles

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

sur les caractéristiques des ondes de souffle. Ainsi, il n'a pas été nécessaire de mener des expériences dédiées à la caractérisation de l'explosion en champ libre.

De plus, afin de pouvoir caractériser l'onde de souffle produite suite à l'explosion de la charge, la sonde effilée a été placée à différentes distances de la charge en fonction de la distance qui sépare la charge de l'obstacle hémicylindrique. Ces distances sont reportées sur le Tableau 3-3.

Les essais ont porté sur la détonation de cinq masses de charge correspondant a fortiori à 4 masses d'équivalent TNT, ce qui a permis d'étudier les caractéristiques des ondes de souffle pour 20 distances réduites différentes comprises entre 1,72 et 9,18 m.kg^{-1/3}.

Tableau 3-3 : Résumé des distances entre la charge et l'obstacle hémicylindrique et entre la charge et la sonde effilée. Installation de l'ISL.

Distance charge-hémicylindre, $d_{\text{charge-obstacle}}$, (m)	0,53	0,8	1,2	2	3,2
Distance charge-sonde effilée, $d_{\text{Charge-Sonde effilée}}$, (m)	1,6	1,86	2,12	2,92	4,26

Un exemple des profils temporels de pression mesurés par la sonde effilée est reporté sur la Figure 3-13-a (charge = 333 g d'Hexomax®, $d_{\text{charge-obstacles}} = 0,53$ m, $d_{\text{charge-sonde effilée}} = 1,6$ m). Le profil correspond bien à celui classique de Friedlander suivi de l'arrivée de l'onde de choc secondaire. On peut noter la très faible dispersion et par conséquent la très bonne répétabilité, des profils de pression sur les 4 essais (t_a , ΔP_{max} , et profils de détente). L'arrivée de l'onde de choc secondaire ne permet pas d'observer l'apparition de la phase négative de la surpression au vu de l'intervalle de temps enregistré. Par conséquent, à la distance de 1,6 m, il n'a pas été possible de mesurer l'impulsion positive I_{exp}^+ . Le même cas a été observé pour la détonation de 400 g de TNT. Lorsque la charge explosive est de plus faible masse, dans ce cas 66,5 g d'Hexomax®, l'arrivée de l'onde de choc secondaire est plus tardive (énergie d'explosion plus faible donnant naissance à des ondes de souffle de plus faible intensité), ce qui permet d'observer un début de phase de surpression négative comme on peut le voir sur la Figure 3-13-b. Dans ce type d'essais, l'impulsion positive est mesurable.

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

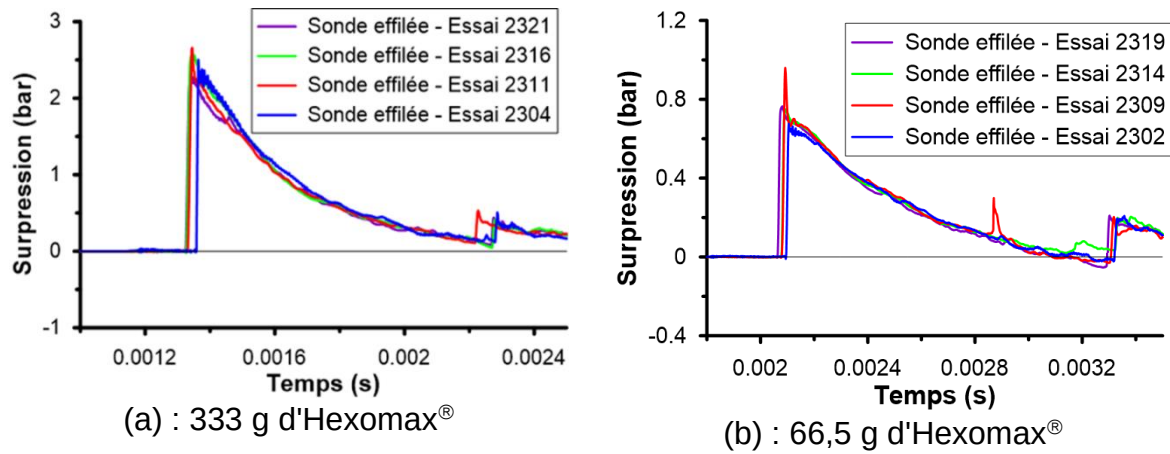


Figure 3-13 : Profils de pression pour les charges de 333 g (a) et 66,5 g (b) d'Hexomax® au niveau de la sonde effilée. $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 1,6 \text{ m}$; $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53 \text{ m}$

Le Tableau 3-4 regroupe l'ensemble des résultats pour les différentes charges étudiées lorsque ces dernières sont situées à 0,53 m de l'hémicylindre et à 1,6 m de la sonde effilée qui permet d'apprécier ainsi la faible dispersion des résultats. Des résultats similaires sont obtenus pour les autres conditions, à savoir des distances $d_{\text{charge-obstacle}}$ comprises entre 0,8 m et 3,2 m correspondant à des distances $d_{\text{Charge-Sonde effilée}}$ comprises entre 1,86 et 4,26 m (Tableau 3-5).

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Tableau 3-4 : Caractéristiques des ondes de souffle, en champ libre, générées par l'explosion de différentes charges dans le cas où la charge est située à 0,53 m de l'obstacle et à 1,6 m de la sonde effilée.

Charge	$\Delta P_{\max}$ (bar)	t_a (ms)	$I^+_{\exp}$ (bar.ms)
50g TNT	0,57+0,02	5,155+0,025	0,463+0,007
66,5g Hexomax®	0,79+0,06	3,829+0,013	0,533+0,010
166,5g Hexomax®	1,53+0,08	2,217+0,016	0,672+0,008
333g Hexomax®	2,50+0,08	1,438+0,008	Non mesurable
400g TNT	2,53+0,03	1,468+0,009	

Tableau 3-5 : Caractéristiques des ondes de souffle, en champ libre, générées par l'explosion de différentes charges situées à différentes distances de l'obstacle hémicylindrique et pour des mesures effectuées par la sonde effilée positionnée à différentes distances de la charge. Installation de l'ISL.

	Charge	$\Delta P_{\max}$ (bar)	t_a (ms)	$I^+_{\exp}$ (bar.ms)
$d_{\text{charge-obstacle}} = 0,8 \text{ m}$ $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 1,86\text{m}$	50g TNT	0,42+0,01	6,373+0,080	0,395+0,015
	66,5g Hexomax	0,55+0,01	4,884+0,012	0,446+0,003
	166,5g Hexomax	1,04+0,01	2,886+0,011	0,586+0,007
	333g Hexomax	1,81+0,02	1,891+0,015	0,723+0,011
	400g TNT	1,74+0,01	1,932+0,004	0,710+0,009
$d_{\text{charge-obstacle}} = 1,2 \text{ m}$ $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 2,12\text{m}$	50g TNT	0,34+0,01	8,422+0,094	0,302+0,007
	66,5g Hexomax	0,50+0,00	6,245+0,014	0,444+0,011
	166,5g Hexomax	0,89+0,02	3,795+0,006	0,569+0,010
	333g Hexomax	1,40+0,04	2,524+0,012	0,703+0,010
	400g TNT	1,47+0,02	2,548+0,004	0,706+0,011
$d_{\text{charge-obstacle}} = 2 \text{ m}$ $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 2,92\text{m}$	50g TNT	0,20+0,00	12,640+0,133	0,239+0,007
	66,5g Hexomax	0,27+0,00	9,769+0,092	0,306+0,007
	166,5g Hexomax	0,46+0,00	6,236+0,042	0,408+0,010
	333g Hexomax	0,71+0,01	4,300+0,039	0,518+0,019
	400g TNT	0,68+0,01	4,320+0,034	0,500+0,017
$d_{\text{charge-obstacle}} = 3,2 \text{ m}$ $d_{\text{Charge-Sonde effilée}} = 4,26\text{m}$	50g TNT	0,11+0,00	20,042+0,069	Non mesurable
	66,5g Hexomax	0,15+0,00	16,193+0,045	0,204+0,001
	166,5g Hexomax	0,23+0,00	10,755+0,030	0,267+0,001
	333g Hexomax	0,35+0,00	7,688+0,014	0,328+0,002
	400g TNT	0,34+0,00	7,692+0,023	0,329+0,006

De même que pour les essais en champ libre de l'IRSN, la dispersion des résultats de surpression du capteur stylo est très satisfaisante ; en effet, la dispersion des résultats de surpression est globalement inférieure à 4,5 % (avec seulement un pic à 6,5 %), et la dispersion des temps d'arrivée est même inférieure à 1 % ; de la même façon, la dispersion des résultats d'impulsions positives est inférieure à 3 %.

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

Ces valeurs de dispersions sont faibles quelle que soit la distance réduite, montrant la fiabilité de la sonde effilée pour les mesures en champ libre.

Les caractéristiques des ondes de souffle obtenues pour les différentes charges étudiées sont reportées en fonction de la distance réduite Z . Sont également rapportées les caractéristiques estimées à partir des différentes méthodes de la littérature à savoir :

- Kinney et Graham [12],
- AMCP [88],
- Kingery et Bulmash [90],
- UFC 3-340-02 [63].

La Figure 3-14 illustre les surpressions normalisées par la pression initiale, $\Delta P_{\max}/P_0$, mesurées à partir des sondes effilées et estimées à partir des 4 méthodes de la littérature précitées. La dispersion des points expérimentaux est très faible pour chaque distance réduite. De plus, l'évolution de $\Delta P_{\max}/P_0$ en fonction de la distance réduite Z , suit les courbes issues de la littérature. Les valeurs expérimentales se situent dans le domaine des valeurs estimées. Les écarts moyens entre $\Delta P_{\max}/P_0$ expérimentaux et théoriques/empiriques sont inférieurs à 5%.

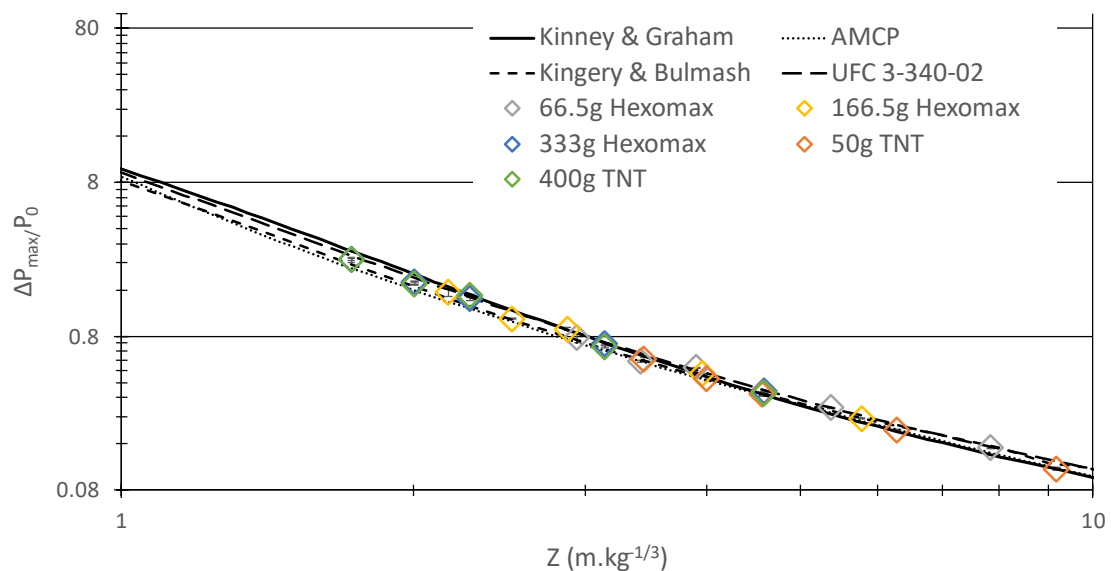


Figure 3-14 : Evolution de la surpression normalisée, $\Delta P_{\max}/P_0$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Les temps d'arrivée réduits, $t_a/m^{1/3}$, mesurés et estimés sont représentés en fonction de la distance réduite sur la Figure 3-15. Comme précédemment, la dispersion des valeurs expérimentales est très faible lorsque l'on compare les essais pour chaque distance réduite, mais aussi sur tout le domaine investigué. Les valeurs mesurées sont en bon accord avec les valeurs déduites des modèles théoriques et des valeurs empiriques. Par exemple, l'écart moyen entre valeurs expérimentales et celles de Kinney et Graham est inférieur à 5% à la seule exception des temps correspondant à la charge de 50 g de TNT à 1,2 m pour lequel on note un écart moyen de 8,4 %. Ces essais ont été réalisés durant le mois de mars 2021, les conditions météorologiques (température ambiante et humidité) pourraient expliquer ces résultats notamment par la modification de la masse molaire de l'air ambiant et la température initiale, ces deux grandeurs ayant un impact sur le nombre de Mach et sur les conditions choquées [185].

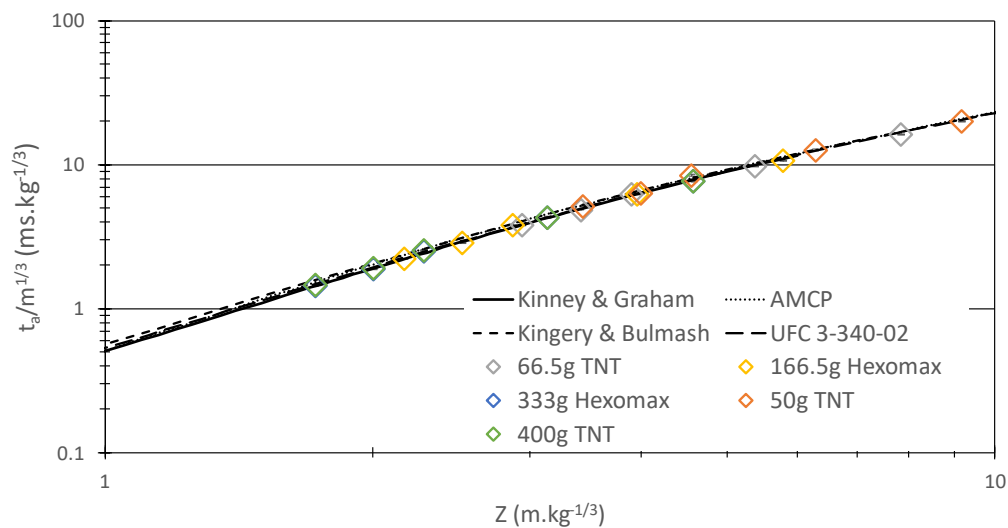


Figure 3-15 : Evolution du temps d'arrivée réduit de l'onde de souffle, $t_a/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.

Les valeurs de l'impulsion normalisée, $I^+/m^{1/3}$, mesurées au cours de ces travaux et déduites des différents modèles de la littérature sont reportées sur la Figure 3-16.

3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

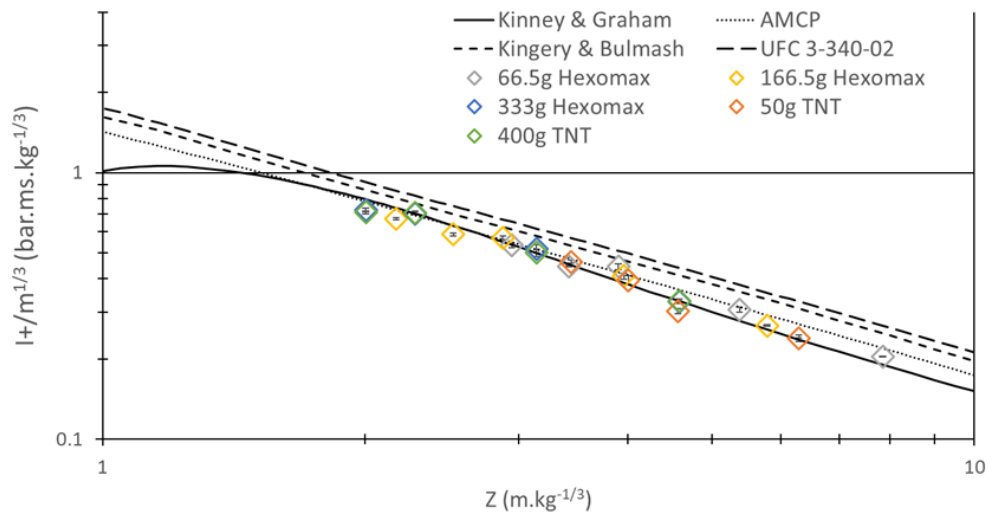


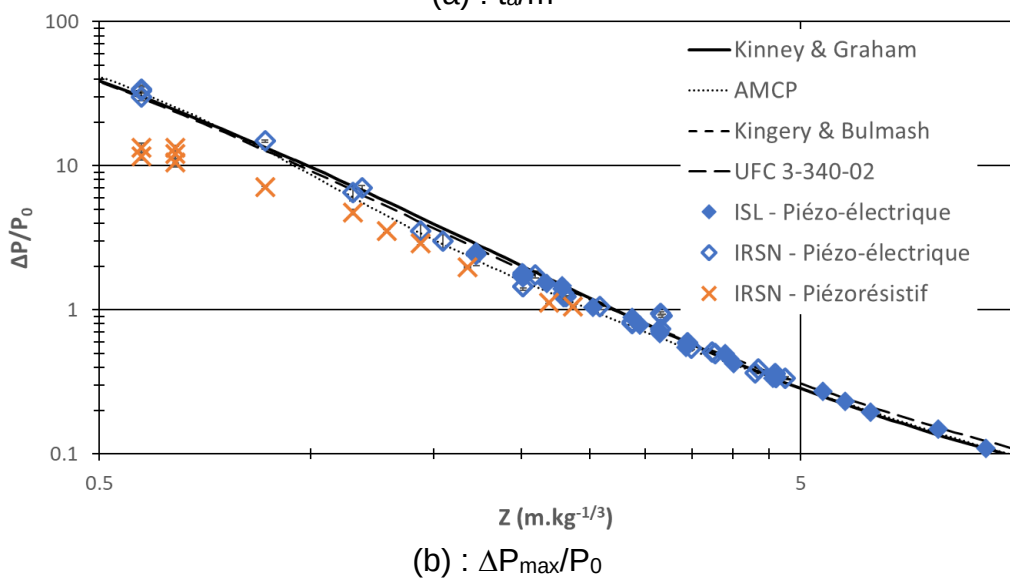
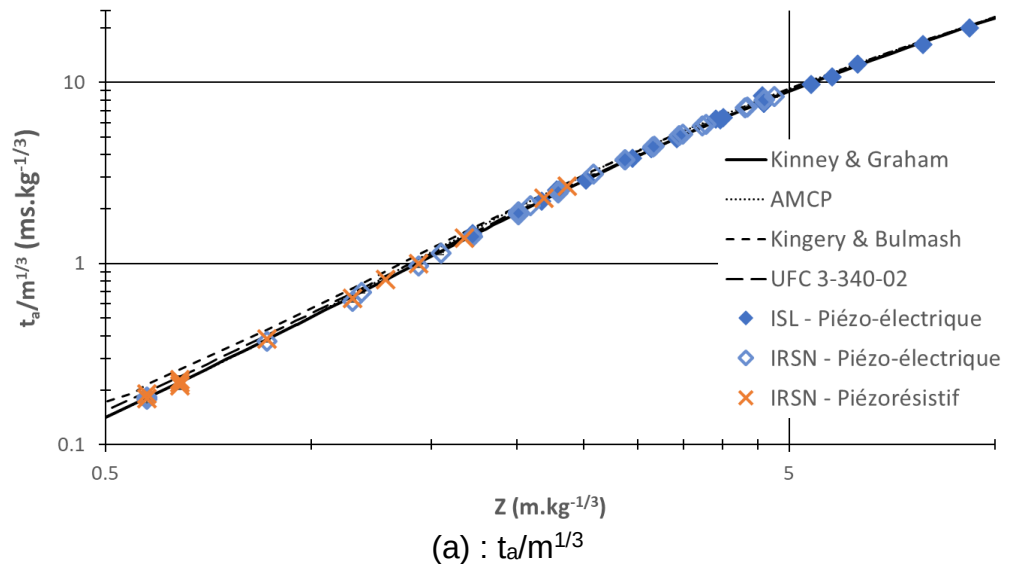
Figure 3-16 : Evolution de l'impulsion positive réduite, $I^+/m^{1/3}$, en champ libre, en fonction de la distance réduite pour différentes charges. Symbole : mesurées ; Lignes : estimées. Installation de l'ISL.

Ainsi, les valeurs issues du modèle Kinney et Graham [12] sont les plus basses sur tout le domaine, tandis que celles issues de UFC 3-340-02 [63] sont les plus élevées. Sur le domaine de distance réduite compris entre environ 0,8 et 3 m.kg^{-1/3}, on note un très bon accord entre les valeurs de Kinney et Graham et celles de l'AMCP [88]. Les valeurs expérimentales présentent une plus faible dispersion que celles mesurées dans le cadre des essais de l'IRSN et une meilleure reproductibilité. Il faut rappeler ici que les impulsions positives pour les essais avec 333 g d'Hexomax® et 400 g de TNT n'ont pu être déterminées en raison de l'absence d'apparition de la phase négative de la surpression.

En conclusion, les données relevées en champ libre par la sonde effilée permettent de confirmer que les charges explosives utilisées durant les essais étaient bien reproductibles. En effet, les trois paramètres physiques caractéristiques de l'onde de souffle mesurables avec ce capteur présentent une dispersion faible inférieure à 6,5 %. Par ailleurs, les valeurs relevées sont très proches des valeurs prédites par le modèle de Kinney et Graham, ce qui rend ce modèle applicable à la gamme des essais de l'ISL.

3.1.3 Impact de l'échelle sur les caractéristiques des ondes de souffle en champ libre

Les expériences menées à l'IRSN (échelle réduite 1) et celles menées à l'ISL (échelle double) peuvent être analysées en comparant, en fonction de la distance réduite Z , le temps d'arrivée réduit, $t_a/m^{1/3}$, la surpression normalisée, $\Delta P_{\max}/P_0$, et l'impulsion positive réduite $I^+/m^{1/3}$. L'ensemble des résultats est reporté sur la Figure 3-17. Tout d'abord, nous pouvons noter l'excellent accord entre les mesures réalisées sur chacune des deux installations lorsque les distances réduites sont les mêmes. De plus, la dispersion des temps d'arrivée réduits est comparable quelle que soit l'échelle à laquelle les essais ont été réalisés (Figure 3-17-a).



3.1 Propagation d'une onde de souffle en champ libre

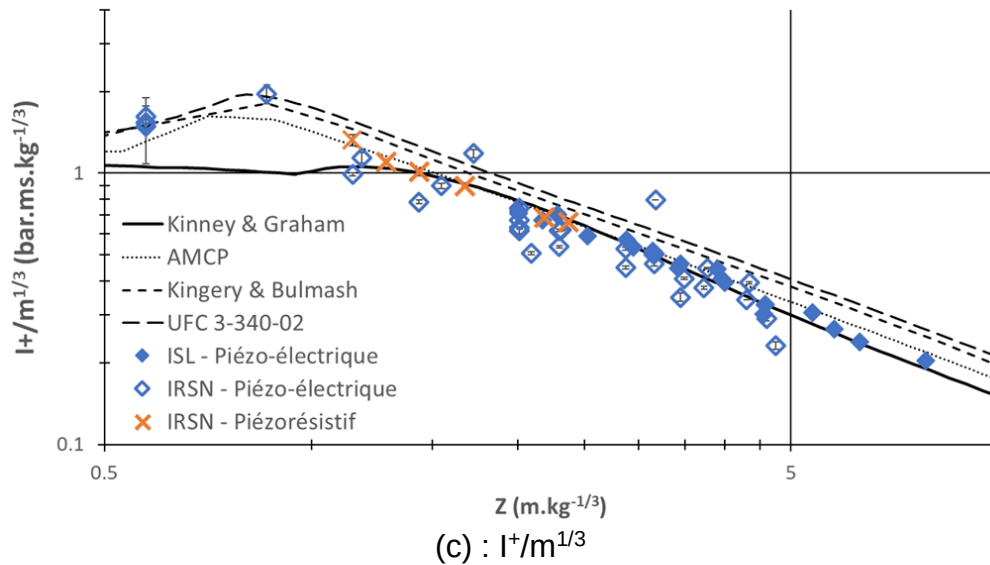


Figure 3-17 : : Caractéristiques des ondes de souffle obtenues dans les deux installations expérimentales de l'IRSN et de l'ISL. Comparaison avec les valeurs estimées par la littérature à [12], [63], [88], [90].

Concernant les surpressions maximales enregistrées (Figure 3-17-b), nous observons un excellent accord entre les deux échelles lorsque les capteurs utilisés sont des piézo-électriques et des valeurs systématiquement plus faibles lorsque des piézorésistifs sont utilisés en champ proche. Pour rappel, les deux technologies de capteurs ne donnent des surpressions comparables que pour des distances réduites supérieures à $1,46 \text{ m.kg}^{-1/3}$.

La comparaison, entre les deux échelles, des impulsions positives montre que les valeurs sont comparables sur l'ensemble du domaine étudié (sauf pour les distances sans phase négative) avec cependant une distribution nettement plus resserrée dans le cas des essais ISL, à plus grande échelle. L'utilisation d'une sonde effilée semble être plus indiquée pour la mesure des propriétés des ondes de souffle en champ libre.

3.1.4 Conclusion sur les essais en champ libre

En conclusion, sur l'ensemble des essais réalisés, les caractéristiques des ondes de souffle en champ libre ont pu être déterminées pour des charges explosives de 66,5, 166,5 et 333 g d'Hexomax® et 50 et 400 g de TNT, soit pour des distances

réduites comprises entre 1,72 et 9,18 m.kg^{-1/3}, en déduisant des profils temporels de pression :

- Les temps d'arrivée de l'onde de souffle, t_a ,
- Les surpressions maximales, $\Delta P_{\max}$,
- Les impulsions positives, I^+ .

Ces mesures ont permis d'établir que la dispersion des résultats est faible avec une bonne reproductibilité des essais et cela aux deux échelles. Nous avons pu mettre en évidence la différence de comportement entre deux technologies de capteurs différentes, notamment l'impact sur les surpressions et les impulsions positives.

Ces essais ont permis aussi de comparer les valeurs expérimentales aux valeurs déduites de différentes méthodes de la littérature notamment : (i) Kinney et Graham [12], (ii) AMCP [88], (iii) Kingery et Bulmash [90] et (iv) UFC 3-340-02 [63]. Dans l'ensemble, on peut noter un bon accord notamment avec les valeurs prédites par Kinney et Graham [12].

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Les résultats obtenus en champ libre ont permis de confirmer la répétabilité des charges explosives utilisées et de vérifier que les valeurs des caractéristiques du souffle généré étaient cohérentes avec celles décrites par la littérature. L'onde de souffle en champ libre ayant été caractérisée, il est possible de s'intéresser à son interaction avec un obstacle hémicylindrique long, à savoir celui de 1,6 m pour l'IRSN et celui de 3,2 m à l'ISL.

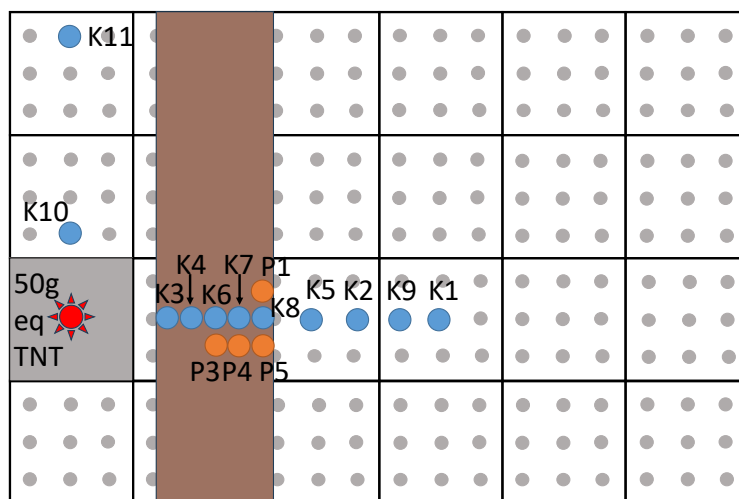
3.2.1 Répétabilité des résultats sur les obstacles hémicylindriques

Les essais avec l'hémicylindre long de l'IRSN ont eu lieu lors de la campagne expérimentale CE9, durant laquelle trois distances charge-obstacle ont été étudiées : 0,27 m (Figure 3-18 - a), 1 m (Figure 3-18 - b) et 1,60 m (Figure 3-18 - c). Comme en

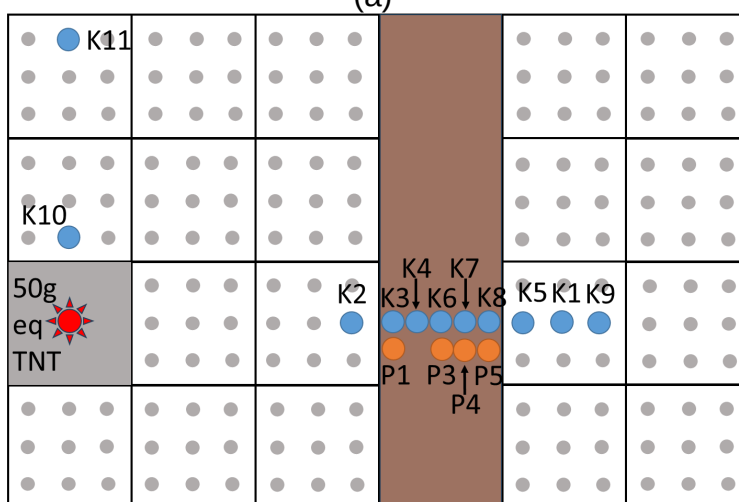
3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

champ libre, il est important d'étudier la répétabilité de ces essais, en comparant par exemple les signaux de capteurs situés sur la surface et en aval de l'obstacle. La Figure 3-20 présente ainsi les résultats de trois capteurs situés sur la surface de l'hémicylindre (K3, K6 et K8) et un capteur placé sur la table directement derrière l'hémicylindre (K5 dans les configurations où l'hémicylindre est à 0,27 m ou 1 m de la charge explosive, K9 quand l'hémicylindre est à 1,6 m).

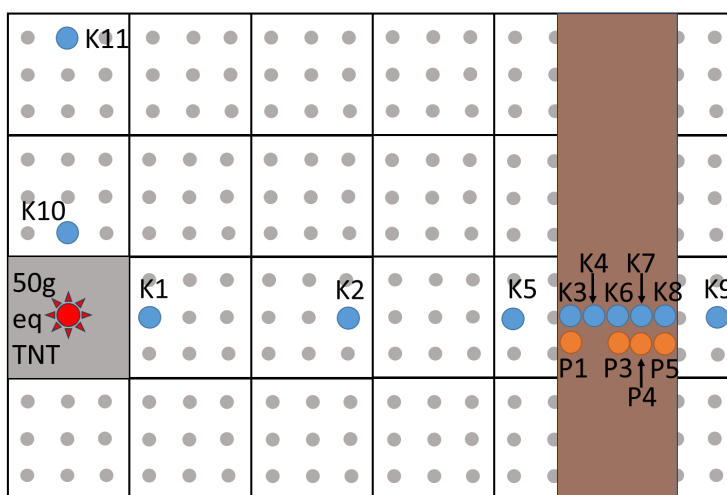
3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique



(a)



(b)



(c)

Figure 3-18 : Configuration de la table à détonation pour les essais avec l'hémicylindre à 0,27 m (a), 1 m (b) et 1,6 m (c) lors de la campagne expérimentale 9 de l'IRSN.

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Un exemple d'enregistrement des capteurs de pression piézo-électriques est donné sur la Figure 3-19 pour 3 essais consécutifs de la campagne CE9. Les profils temporels de la surpression mesurée exhibent une excellente reproductibilité aussi bien en termes de temps d'arrivée qu'en termes de surpression. De même, les profils de pression, dans la zone de décroissance, sont répétables. La phase de la surpression négative est bien identifiable sur les capteurs K3 et K6. Par contre, elle est difficilement identifiable pour le capteur K8 situé en arrière de l'obstacle.

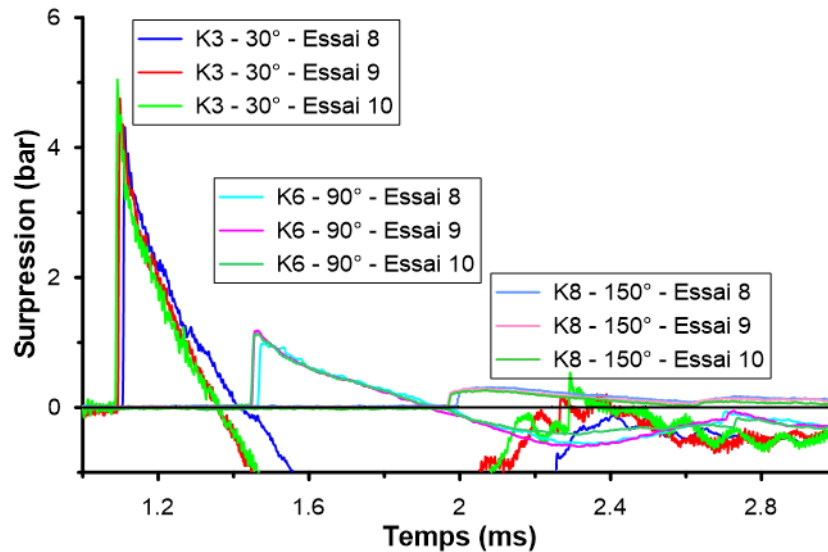


Figure 3-19 : Profils de pression à la surface de l'hémicylindre de l'IRSN pour une charge de 42g d'Hexomax®. $d_{\text{charge-obstacle}} = 1$ m. Essais 8 à 10, campagne CE9.

La dispersion expérimentale est inférieure à 3 % (Figure 3-20-a) ce qui illustre la très bonne reproductibilité des résultats.

La surpression mesurée sur la face avant de l'obstacle (K3 à 30°) correspond à la surpression réfléchi, qui diminue lorsque $d_{\text{charge-obstacle}}$ augmente (Figure 3-20-b). Comme l'angle limite, μ_{limite} , varie entre 65 et 84° selon $d_{\text{charge-obstacle}}$ (Tableau 3-7). Elle est donc supérieure à $\Delta P_{\text{max, champ libre}}$ qui est respectivement de 22,74 bar, 1,63 et 0,59 bar pour les distances équivalentes (en absence d'obstacle).

À 90°, $\Delta P_{\text{max, obstacle}}$ (6,7 bar à 0,27 m) est plus faible que $\Delta P_{\text{max, champ libre}}$ qui est de 8,2 bar (à la distance équivalente), ce qui indique l'occurrence de la diffraction de l'onde sur la surface de l'obstacle et de la détente qui en découle. En effet, l'angle limite de vue est inférieur à l'angle du capteur. Le même comportement est observé aux 2 autres distances, bien que moins marqué.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Sur la face arrière de l'obstacle, à 150°, les surpressions mesurées à toutes les distances sont beaucoup plus faibles que celles attendues en champ libre aux distances équivalentes (Tableau 3-7). Cet écart diminue toutefois quand $d_{\text{charge-obstacle}}$ augmente.

La dispersion des caractéristiques mesurées (ΔP_{max} , t_a et I^+) est très bonne, inférieure à 10%.

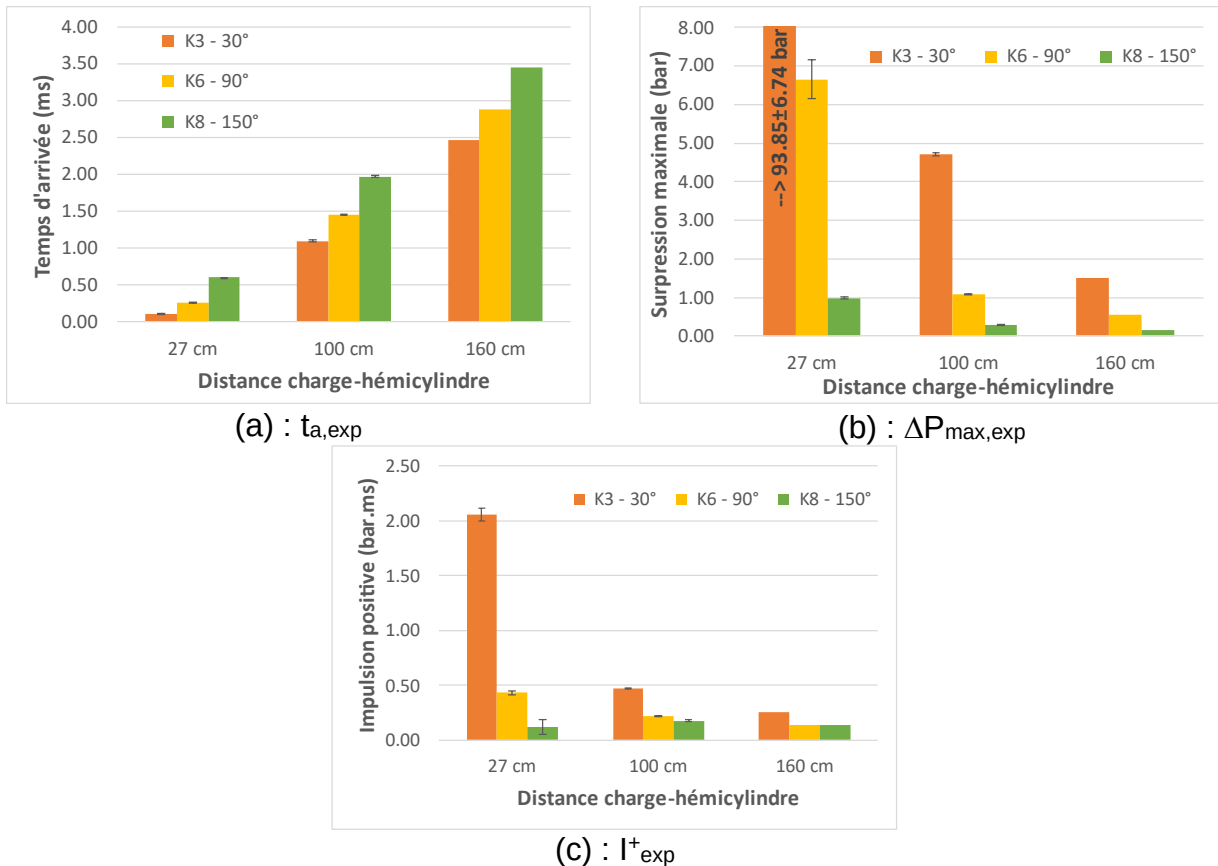


Figure 3-20 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 42 g d'Hexomax®. Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre de l'IRSN ou immédiatement derrière dans les configurations présentées dans la Figure 3-18.

Tableau 3-6 : Angle limite de vue en fonction de la distance séparant la charge de l'hémicylindre. Installation de l'IRSN.

$d_{\text{charge-obstacle}}$ (m)	
0,27	30°
1	65
1,6	80
	85

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Tableau 3-7 : Valeurs de surpression attendues en champ libre à des distances à la charge équivalentes à celle des capteurs K3, K6 et K8. Installation de l'IRSN.

$d_{\text{charge-obstacle}}$ (m)	$\Delta P_{\text{max, champ libre, } 30^\circ}$ (bar)	$\Delta P_{\text{max, champ libre, } 90^\circ}$ (bar)	$\Delta P_{\text{max, champ libre, } 150^\circ}$ (bar)
0,27	22,74	8,18	4,74
1	1,63	1,11	0,84
1,6	0,59	0,47	0,40

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Nous allons à présent détailler les résultats issus des campagnes menées à l'ISL. Durant ces campagnes, cinq distances charge-hémicylindre ont été étudiées : 0,53 m, 0,8 m, 1,2 m, 2 m et 3,2 m, dont les configurations sont rappelées dans la Figure 3-21.

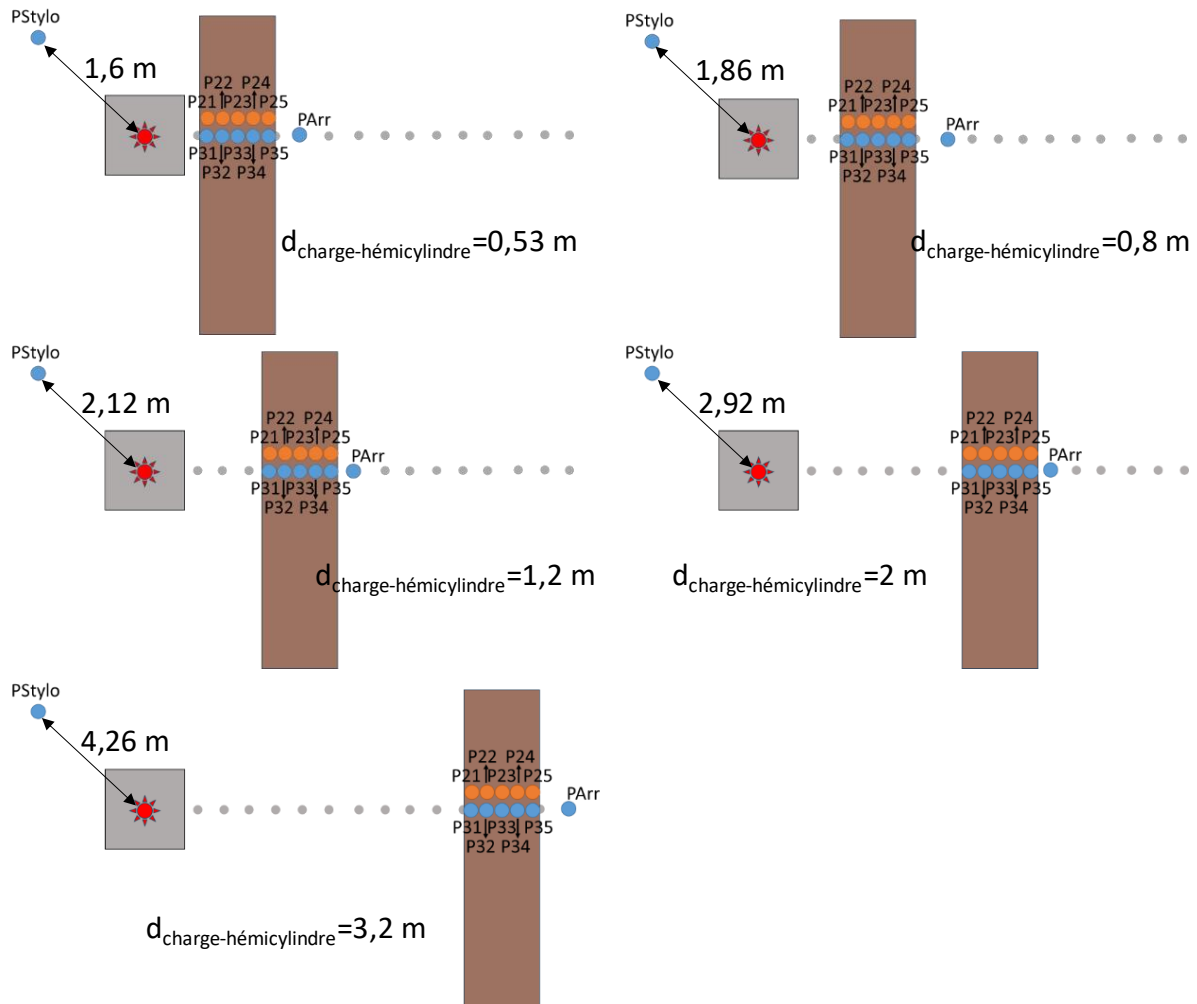


Figure 3-21 : Configurations étudiées à l'ISL.

Afin d'illustrer la répétabilité des mesures dans le cas avec obstacle, les profils temporels de pression délivrés par 3 capteurs de pressions différents pour 4 essais portant sur la détonation d'une charge de 333 g d'Hexomax® sont reportés sur la Figure 3-22. Les pressions mesurées par le capteur P31 présentent des profils très similaires avec des temps de montée quasi-identiques à l'exception de l'essai 2415 pour lequel l'onde de souffle arrive plus tardivement. Il en est de même pour le capteur P33, on observe une légère différence dans le temps d'arrivée de l'onde de souffle au niveau de ce capteur. Cependant, le maximum de surpression et la phase de

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

décroissance sont reproductibles sur l'ensemble des 4 essais réalisés et pour les deux capteurs de pression. Pour ces 2 capteurs, l'apparition de la phase négative de la surpression est identifiable, mais elle est plus difficile sur le capteur P35. La pression mesurée par ce capteur est faible, les signaux sont dominés par un bruit important rendant la mesure moins aisée. De cette illustration, on peut considérer que l'on a une bonne répétabilité des essais effectués en présence d'un obstacle.

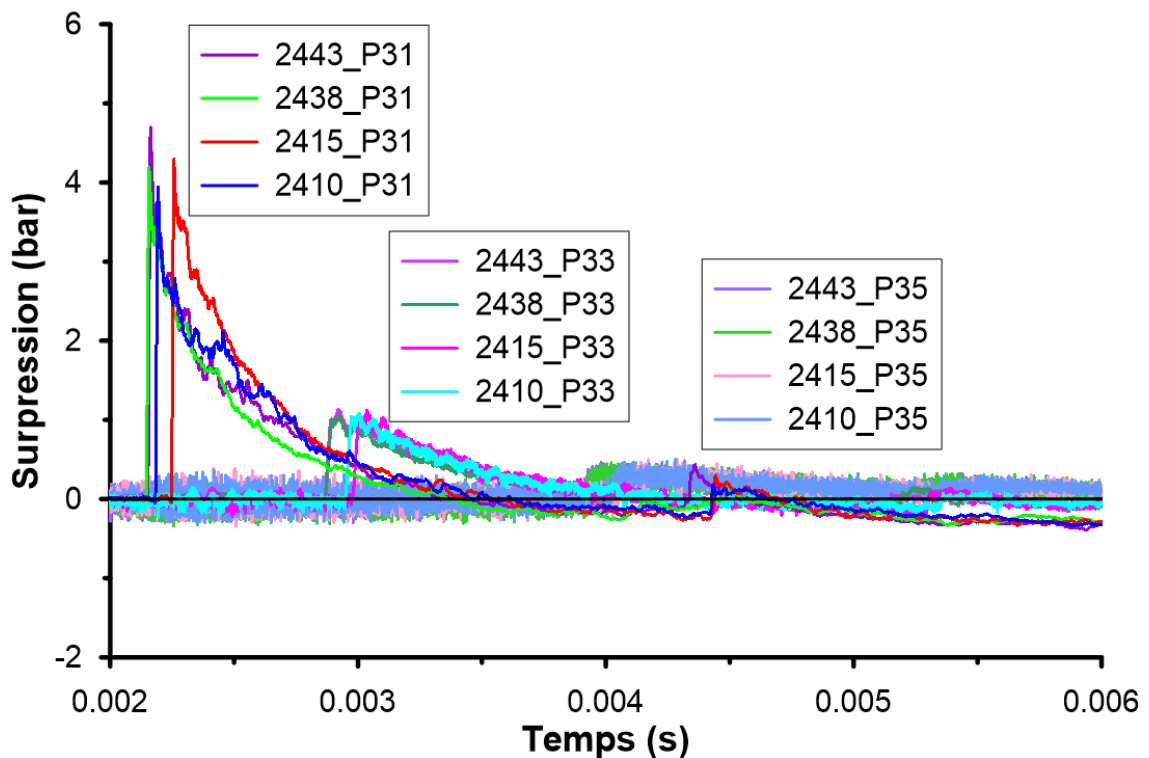
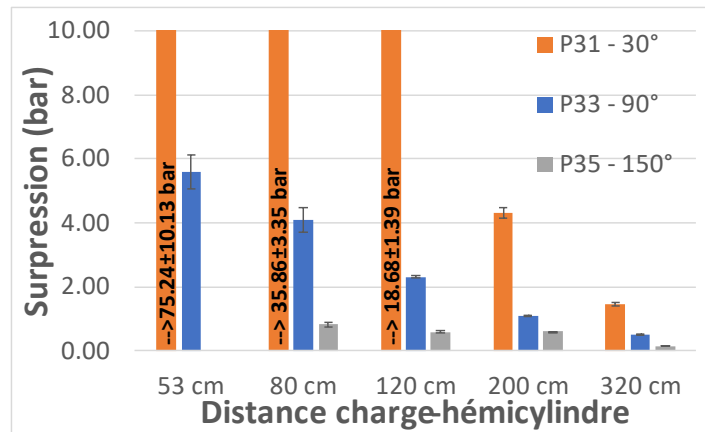


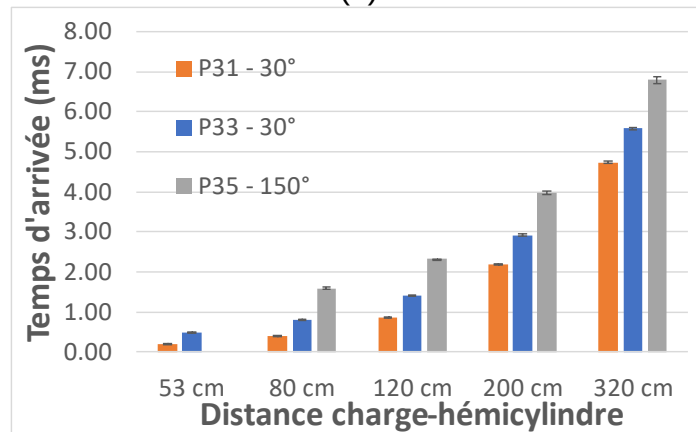
Figure 3-22 : Profils de pression à la surface de l'hémicylindre de l'ISL pour une charge de 333 g d'Hexomax[®]. $d_{\text{charge-obstacle}} = 2$ m. Essais 2410, 2415, 2438 et 2443.

Les caractéristiques des ondes de souffle générées par 333 g d'Hexomax[®], pour différentes $d_{\text{charge-obstacle}}$ sont regroupées dans la Figure 3-23. La surpression à la surface de l'hémicylindre suit la même évolution qu'à l'IRSN, avec une détente importante sur la face arrière de l'obstacle. Les temps d'arrivée de l'onde de souffle augmentent avec la distance $d_{\text{charge-capteur}}$ comme on peut le voir sur la Figure 3-23-b.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique



(a)



(b)

Figure 3-23 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 333 g d'Hexomax®. Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre de l'ISL ou immédiatement derrière dans les configurations présentées dans la Figure 3-21

La dispersion maximale observée sur les temps d'arrivée pour les charges de 333 g d'Hexomax® n'est que de 6 %, valeur atteinte seulement dans le cas où $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53$ m. Dans les autres cas la dispersion est inférieure à 2,5 %, et même à 1 % pour les essais réalisés avec $d_{\text{charge-obstacle}} = 1,2$ m ou plus (Figure 3-24-a). En revanche, la dispersion des résultats de surpression est ici aussi plus élevée, avec des pics à 14 % de dispersion pour les capteurs des positions 1 et 2 à 0,53 m (Figure 3-24-b) ; cette dispersion diminue avec l'augmentation de $d_{\text{charge-obstacle}}$, et celle des capteurs piézorésistifs est inférieure à celle des capteurs piézo-électriques. Enfin, à cause des perturbations présentes sur les signaux de pression, il n'est pas possible de calculer leur impulsion positive de manière fiable.

Pour le cas de 400 g de TNT, on note une dispersion des temps d'arrivée de l'onde de souffle environ deux fois plus faible que dans le cas de 333 g d'Hexomax® (Figure 3-24-c). Il en est de même pour la dispersion des résultats concernant la

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

suppression maximale (Figure 3-24-d), où à l'exception de la distance de 0,53 m, elle est environ deux fois plus faible. Ces différences de comportement entre TNT et Hexomax® pourraient être liées à la différence d'état physique (densité apparente, homogénéité, forme, etc.) résultant de leur production : le TNT est coulé et usiné, tandis que l'Hexomax® est un explosif plastique moulé à la main.

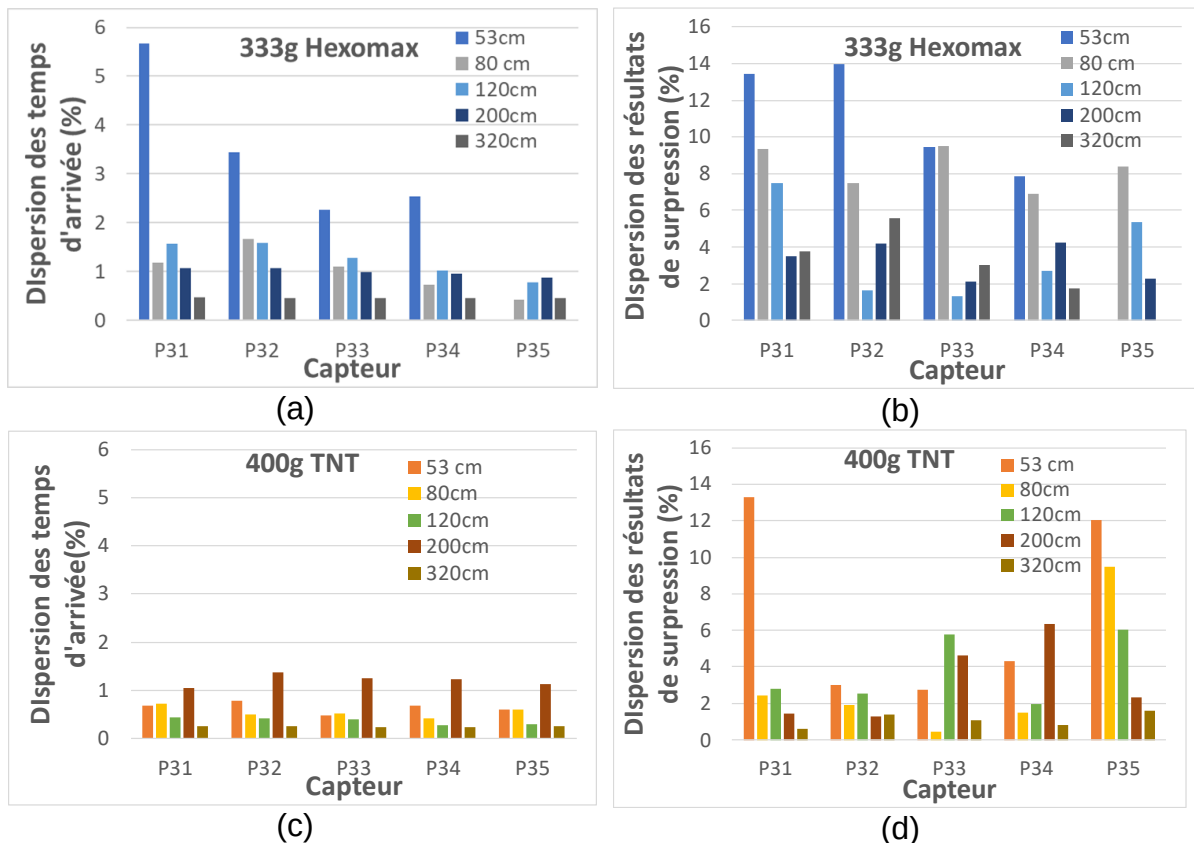


Figure 3-24 : Dispersion des résultats de temps d'arrivée et de suppression mesurés pour des charges de 333g d'Hexomax® et 400g de TNT à la surface de l'hémicylindre de l'ISL.

Pour les autres types de charges, le constat est similaire (Figure 3-25). Toutes distances confondues, la dispersion pour les temps d'arrivée a deux maximums à 6,7 % (66,5 g d'Hexomax® à 0,53 m, capteur P31) et 4,6 % (66,5 g d'Hexomax® à 0,53 m, capteur P32), et reste inférieure à 2,5 % pour tous les autres cas. On remarque également que la dispersion des résultats des charges de TNT est en moyenne deux à trois fois plus faible que celle des charges d'explosif plastique⁶, ce qui confirme la

⁶ Comparaison réalisée entre les résultats des charges de 400 g de TNT et 333 g d'Hexomax®

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

meilleure répétabilité des charges de TNT. Comme pour les charges de 333 g d'Hexomax®, la dispersion des résultats de surpression est maximale en champ proche et pour les capteurs de la position 1. Cette dispersion ne semble pas être particulièrement liée à la taille des charges considérées. En revanche, comme pour les valeurs de temps d'arrivée, on constate que les charges de TNT présentent une dispersion plus faible que les charges d'Hexomax® (jusqu'à deux fois plus faible).

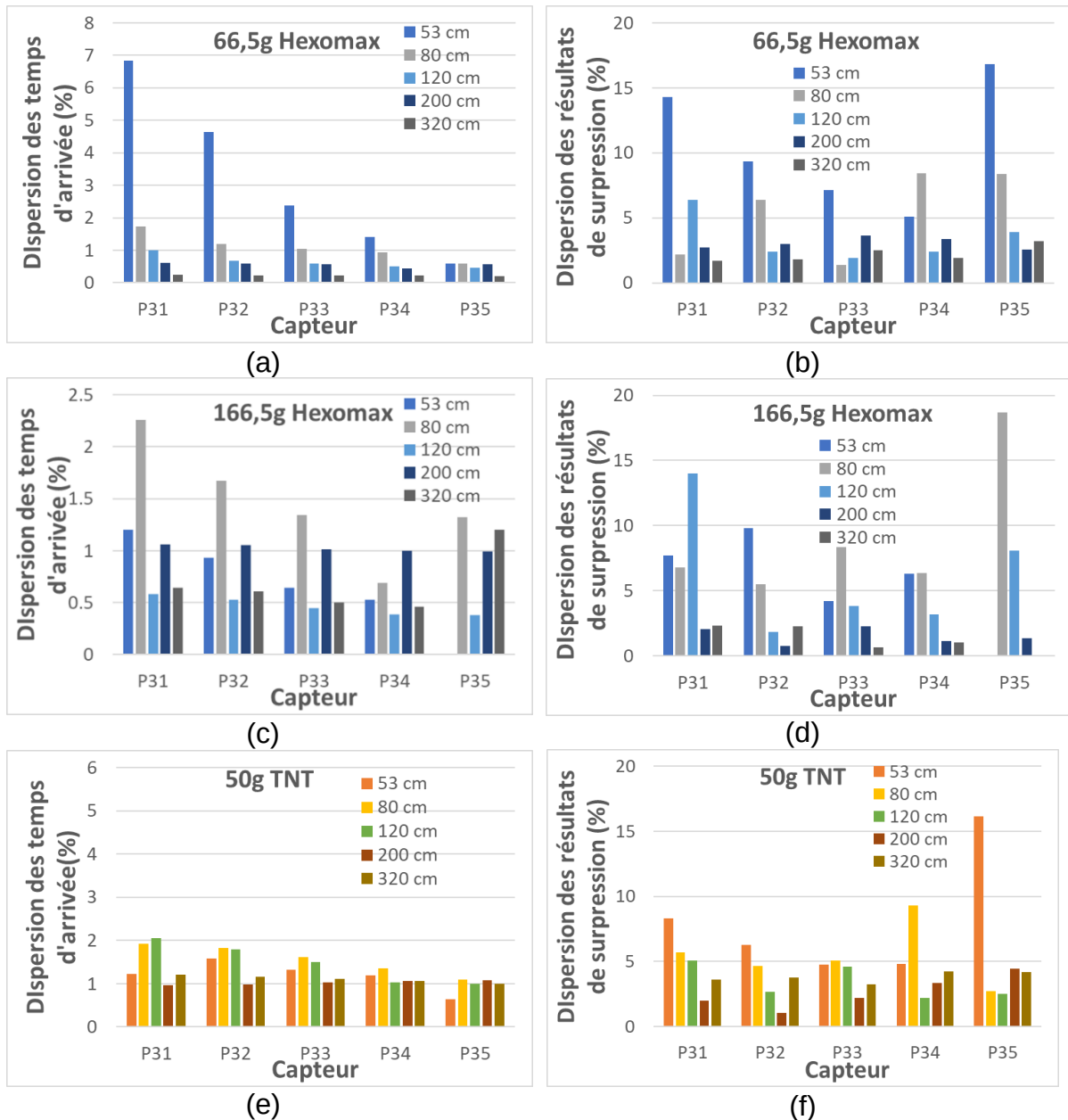


Figure 3-25 : Dispersion des résultats de temps d'arrivée et de surpression mesurés pour des charges de 66,5 et 166,5 g d'Hexomax® et 50 g de TNT à la surface de l'hémicylindre de l'ISL.

3.2.2 Comparaison des capteurs piézo-électriques et piézorésistifs

Lors des essais à l'IRSN, deux technologies de capteurs ont été installées à la surface de l'hémicylindre ce qui permet également de comparer leur réponse aux ondes de souffle. Ainsi, la Figure 3-26 présente une comparaison entre les signaux de pression enregistrés par trois doublets de capteurs (P1-K3, P3-K6 et P5-K8) à la surface de l'hémicylindre de l'IRSN dans les configurations où l'obstacle se trouve à 1 m (Figure 3-18-b) et 1,6 m (Figure 3-18-c), ainsi que le doublet P3-K6 et un triplet P1-P5-K8 dans la configuration à 0,27 m (Figure 3-18-a). Comme en champ libre, les capteurs piézorésistifs présentent une surpression maximale inférieure à celle mesurée par les capteurs piézo-électriques, particulièrement pour le capteur situé à 30° quand l'hémicylindre est à 1 m (-36 %) et la position à 90° avec l'hémicylindre à 0,27 m (-32 %). Toutefois, cet écart se réduit quand $d_{\text{charge-obstacle}}$ augmente ou que les capteurs observés sont situés plus vers l'arrière de l'hémicylindre ; les signaux finissent par se superposer comme pour les capteurs P5 (piézorésistifs) et K8 (piézo-électrique) du graphique en bas à droite de la Figure 3-26.

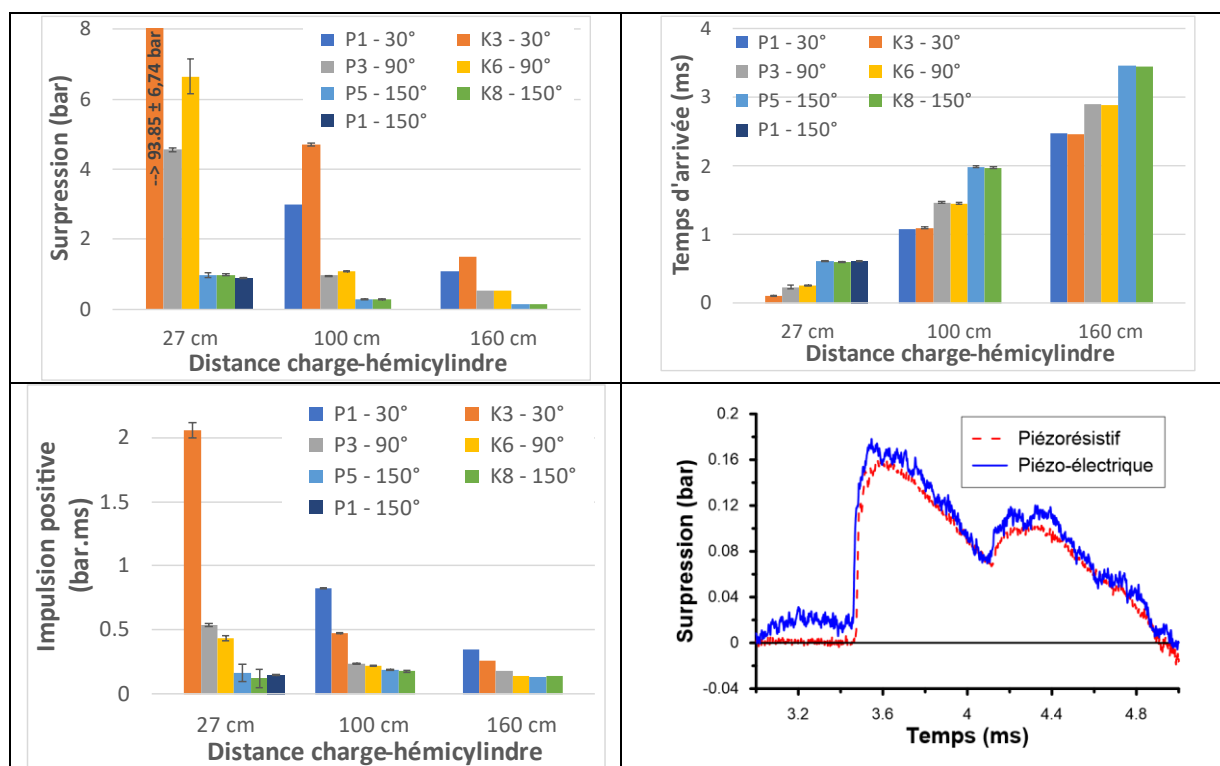


Figure 3-26 : Caractéristiques des ondes de souffle générées par une charge de 42 g d'Hexomax® Résultats de capteurs situés à la surface de l'hémicylindre selon les configurations décrites dans la Figure 3-18- comparaison piézo-électrique – piézorésistifs.

De la même façon, la Figure 3-27 montre que la même tendance a été observée à l'ISL, avec des capteurs piézorésistifs mesurant des surpressions maximales plus faibles que les piézo-électriques et présentant un front montant moins marqué (20 à 30 μ s pour les premiers et 6 à 10 μ s pour les seconds). Toutefois, ici aussi, ces différences s'estompent quand $d_{\text{charge-obstacle}}$ augmente et quand les capteurs considérés sont disposés plus en arrière de l'hémicylindre. De plus, les signaux se superposent quand l'hémicylindre est à 3,2 m de la charge explosive. La résonance de l'hémicylindre qui se transmet aux capteurs est également bien visible ici. Il est à noter que les capteurs piézorésistifs, de par leur fréquence propre plus faible, ne sont pas capables de mesurer des variations de pression à haute fréquence, ou du moins supérieure à leur fréquence maximale (§ 3.1.1).

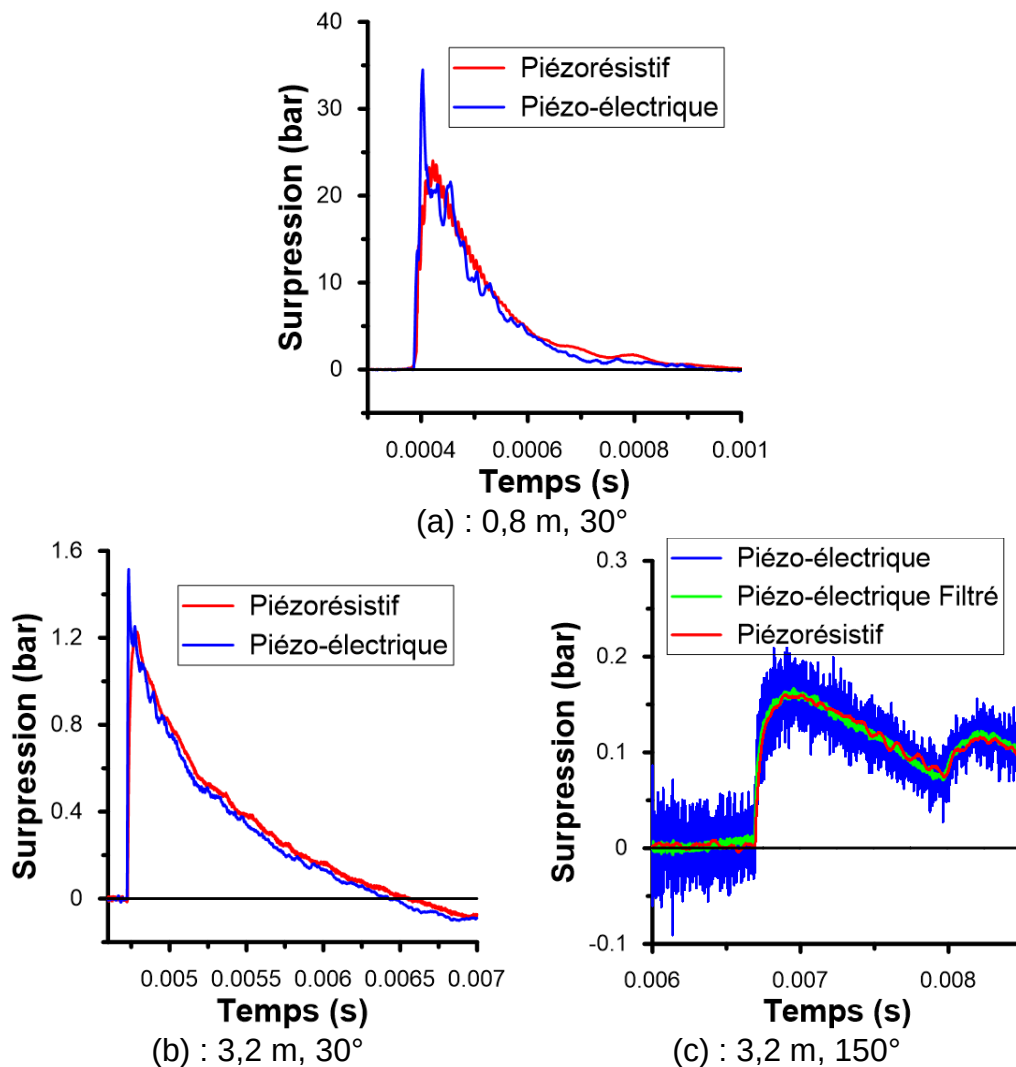


Figure 3-27 : Évolution de la pression à la surface de l'obstacle - comparaison inter-capteurs.

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Cette grande similitude des résultats des deux types de capteurs quand les phénomènes observés sont plus lents pourrait donc permettre de n'utiliser que des capteurs piézorésistifs à la place des piézo-électriques en face arrière de l'hémicylindre, et ainsi d'avoir des signaux fiables et moins perturbés pour la position à 150° (voire 120°).

3.2.3 Résultats et comparaison inter-échelles – Modèle S

L'interaction entre l'onde de souffle générée par la charge explosive et l'obstacle hémicylindrique se développe suivant différents régimes de réflexion successifs, tel que décrit par Ben Dor [97]. Lorsque la charge est proche de l'hémicylindre, toutefois, la forme de l'onde est encore très affectée par la présence de la boule de feu, ainsi qu'illustré dans la Figure 3-28-a, et il n'est pas possible d'identifier visuellement d'éventuelles réflexions régulières ou de Mach. Le front de choc n'est tout d'abord pas uniforme, et semble composé de multiples fronts et réflexions d'ondes ; mais il se détache et devient plus convexe à mesure que le choc se propage autour de l'obstacle (Figure 3-28-b).

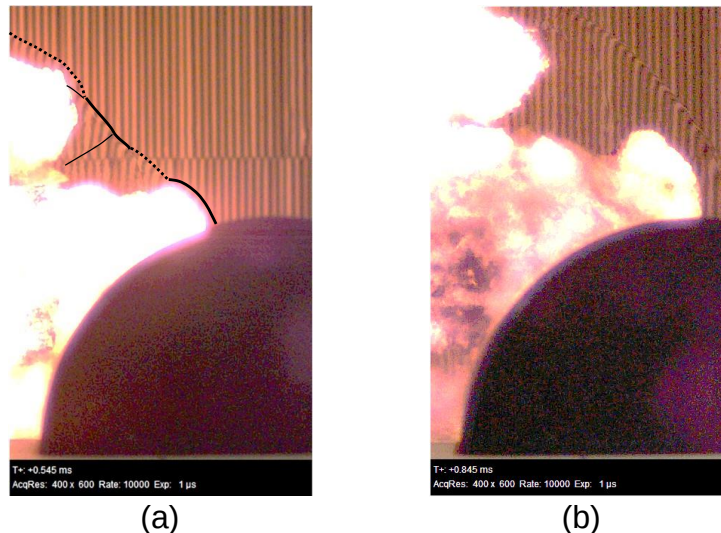


Figure 3-28 : Propagation de l'onde de souffle à la surface de l'hémicylindre – 166,5 g Hexomax®, $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53$ m.

De la même manière, la courbure du choc diminue au fur et à mesure qu'il progresse, et l'onde impactant l'obstacle se rapproche ainsi progressivement d'une onde plane. Il est alors possible d'observer des réflexions régulières puis de Mach

(Figure 3-29), d'autant plus incurvées que l'obstacle est proche de la charge. Par ailleurs, le pied de Mach se recourbe fortement à mesure qu'il progresse à la surface de l'hémicylindre et présente un front convexe sur la face arrière de celui-ci (Figure 3-29-c), en plus de s'élever continuellement au-dessus de l'obstacle (Figure 3-31). Il est difficile de déterminer précisément à partir de quel angle la transition en réflexion de Mach a lieu, bien que cela semble se produire pour des angles d'observation proches de 40° quelle que soit la distance de l'obstacle à la charge explosive. Par ailleurs, il apparaît que l'angle formé par l'onde incidente et l'onde réfléchie à leur point de rencontre est obtus dans le cadre de la réflexion régulière (Figure 3-30-a), puis aigu une fois la réflexion de Mach apparue (Figure 3-30-b). Cette observation semble rejoindre la théorie développée par Geva *et al.* [118], qui indique que la transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach a lieu quand les ondes incidente et réfléchie deviennent perpendiculaires pour un nombre de Mach de 1,3 et 1,5. Ainsi, le critère géométrique développé [118] serait également applicable pour d'autres nombres de Mach et des configurations impliquant un choc incident convexe. Une cadence d'images plus élevée associée à une meilleure résolution permettrait une étude plus précise de cette transition. Enfin, la variation de l'indice de réfraction derrière le choc est trop faible par rapport à la limite de détection des niveaux de gris de la caméra pour observer les phénomènes de vortex décrits par Glasstone [30].

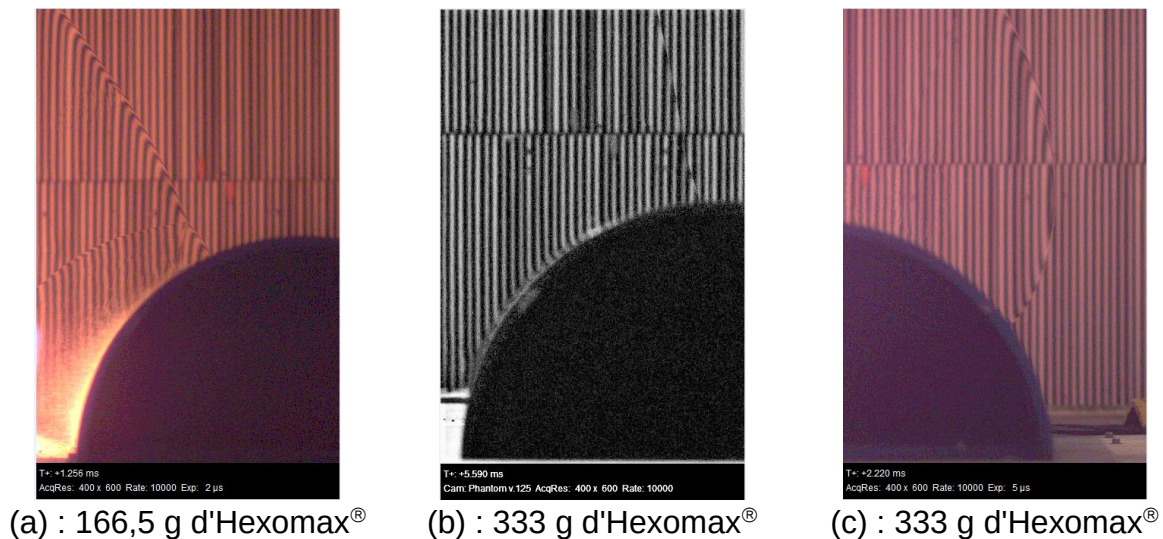


Figure 3-29 : Phénomènes de réflexion sur la face avant d'un obstacle situé à 1,2 m (a) ou 3,2 m (b) de la charge, et sur la face arrière à 1,2 m (c).

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

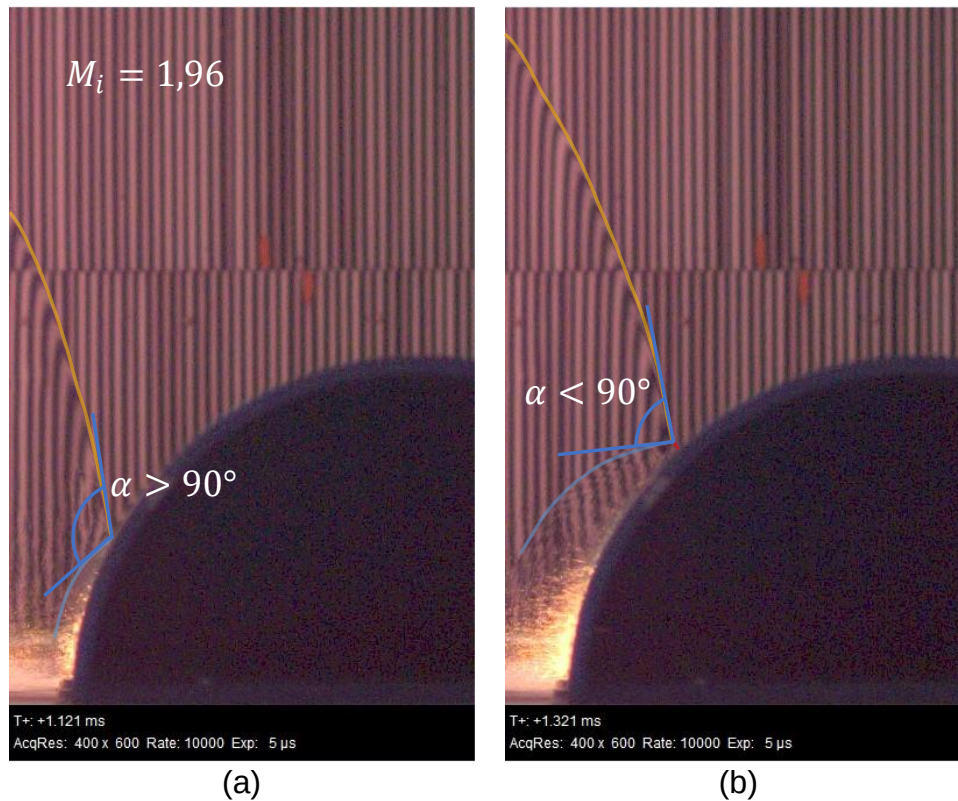


Figure 3-30 : Transition de la réflexion régulière à la réflexion de Mach pour 166,5g d'Hexomax® à 1,2 m de l'obstacle.

Par ailleurs, les régimes de réflexions de Mach double ou de Mach transitoire, décrits par Bazhenova [105] ou Ben Dor [97], n'ont pas été observés. Toutefois, Krassovskaya [117] indique que pour des nombres de Mach inférieurs à 2,5, ces régimes de réflexions n'ont pas lieu. Or, les configurations étudiées pour lesquelles le nombre de Mach est supérieur ou égal à 2,5 correspondent à celles où les distances charge-hémicylindre sont les plus faibles (0,53 m ou 0,8 m). Dans ces cas, le choc incident est encore perturbé par la boule de feu ce qui rend l'observation de ces phénomènes impossible.

En revanche, il est possible de suivre précisément la trajectoire du point triple au-dessus de l'hémicylindre dans un certain nombre des configurations étudiées :

- Pour les cinq masses de charge dans le cas de l'obstacle à 1,2 m, correspondant à des nombres de Mach incidents compris entre 1,41 et 2,41,
- pour les charges équivalentes à 400 g de TNT dans les configurations avec l'hémicylindre à 2 m et 3,2 m, correspondant à des nombres de Mach incidents de 1,58 et 1,23.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Comme observé par Kaca [108], Zóltak et Drikakis [186], la trajectoire du point triple au-dessus de l'hémicylindre est rectiligne. Toutefois, alors que dans ces travaux, le nombre de Mach n'a pas d'influence sur l'angle formé par la trajectoire du point triple avec le sol, évalué à 33° par Kaca [108] pour des obstacles d'un diamètre de 1,5 à 5 cm, les trajectoires obtenues lors de nos essais présentent une pente plus élevée et qui diminue avec le nombre de Mach de l'onde incidente (i.e. lorsque la masse de la charge diminue pour une même distance charge-hémicylindre, ou lorsque cette distance augmente pour une même charge), comme illustré dans la Figure 3-31. Par ailleurs, dans nos travaux, lorsque le nombre de Mach diminue, la valeur de cet angle semble approcher celle déterminée par Kaca (Tableau 3-8), qui pourrait ainsi peut-être correspondre à une valeur limite.

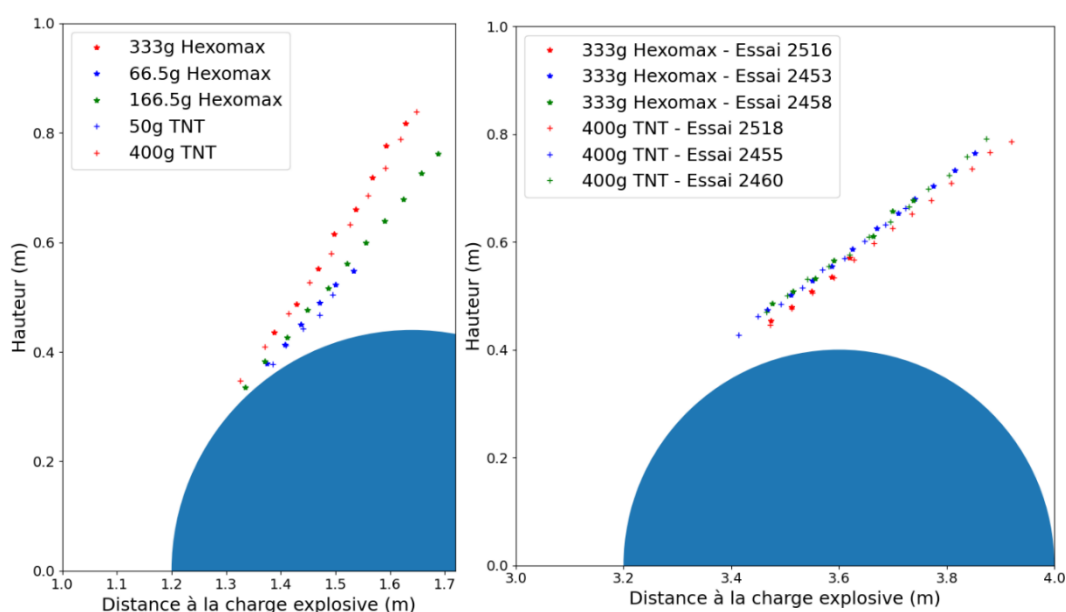


Figure 3-31 : Trajectoires du point triple au-dessus de l'obstacle à 1,2 m (gauche) et à 3,2 m (droite).

Tableau 3-8 : Angle formé par la trajectoire du point triple avec le sol pour différents nombres de Mach incidents.

Mach incident	Charge utilisée (g)	Masse de la charge (g éq. TNT)	d _{charge-hémicylindre} (m)	Angle
2,41	333 g Hexomax®	400	1,2	57°
	400 g TNT			
1,96	166,5 g Hexomax®	200		50°
1,58	333 g Hexomax®	400	2	44°
	400 g TNT			
1,55	66,5 g Hexomax®	80	1,2	47°
1,41	50 g TNT	50		
1,23	333 g Hexomax®	400	3,2	37°
	400 g TNT			

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Dans le cas où la distance charge-hémicylindre est de 1,2 m, la position du point triple a pu être déterminée pour les cinq masses de charge utilisées (Figure 3-32-a). La normalisation de la hauteur du point triple par rapport à la surface de l'hémicylindre par la racine cubique de la masse de l'équivalent TNT de la charge explosive permet d'obtenir une corrélation unique des trajectoires obtenues pour les différentes masses d'explosif.

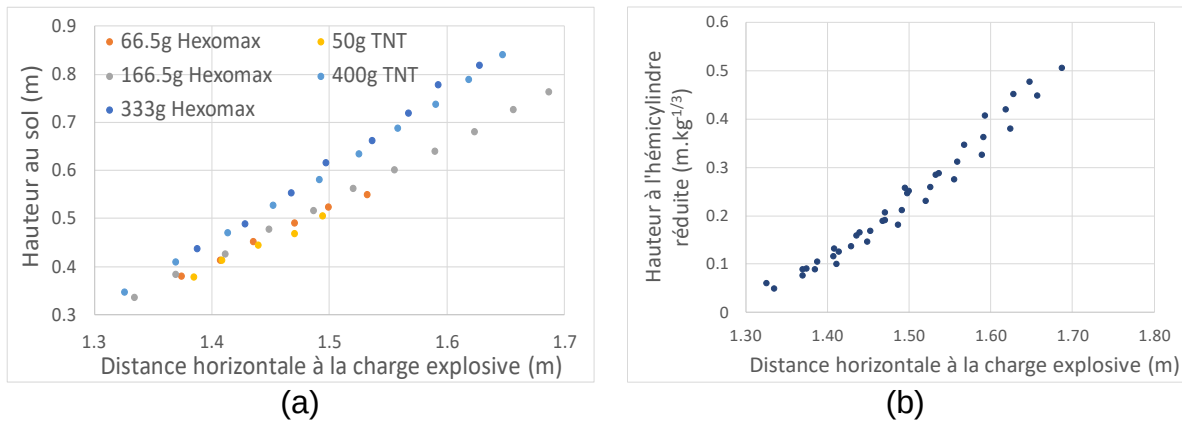


Figure 3-32 : Hauteur du point triple au sol (a) et hauteur du point triple à l'hémicylindre réduite (b) en fonction de la distance à la charge pour une distance charge-obstacle de 1,2 m.

Ainsi, pour les distances charge-hémicylindre de 1,2, 2 et 3,2 m, une équation décrivant cette hauteur réduite h_M en fonction de la distance horizontale d du point triple à la charge est proposée sous la forme :

$$\frac{h_M}{m_{TNT}^{1/3}} = A_m d^2 + B_m d + C_m \quad (43)$$

Avec les coefficients donnés dans le Tableau 3-9.

Tableau 3-9 : Coefficients de l'équation (43) pour les différentes distances charge-hémicylindre

Distance charge-hémicylindre (m)	A_m	B_m	C_m	R^2
1,2	1,3589	-2,7678	1,3232	0,98
2	1,0406	-3,9861	3,7784	0,99
3,2	1,5973	-10,686	17,942	0,99

En ce qui concerne les profils de pression, les signaux enregistrés sur les deux installations sont similaires, comme illustré dans la Figure 3-33, avec des temps d'arrivée identiques et des profils temporels qui se superposent. Cette bonne correspondance s'illustre au travers des valeurs de temps d'arrivée (Figure 3-34), avec

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

notamment moins de 4 % d'écart, et de surpressions maximales (Figure 3-35) mesurées aux deux échelles à l'exception de distance, $d_{\text{charge-obstacle}}$ la plus faible. En effet, à $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,27$ m pour l'IRSN et $d_{\text{charge-obstacle}} = 0,53$ m pour l'ISL, on note un écart important atteignant 25 %. Une autre différence importante apparaît dans le cas où l'hémicylindre de l'IRSN se situe à 1,6 m de la charge, avec encore une fois une détente plus prononcée à l'IRSN (Figure 3-33 – a) ; dans cette configuration, le capteur placé immédiatement derrière l'obstacle se trouve à seulement 7 cm du bord de la table, et un effet de remontée d'ondes de détente [179], [180] perturbe alors l'onde de souffle, comme identifié en champ libre (section 3.1.1).

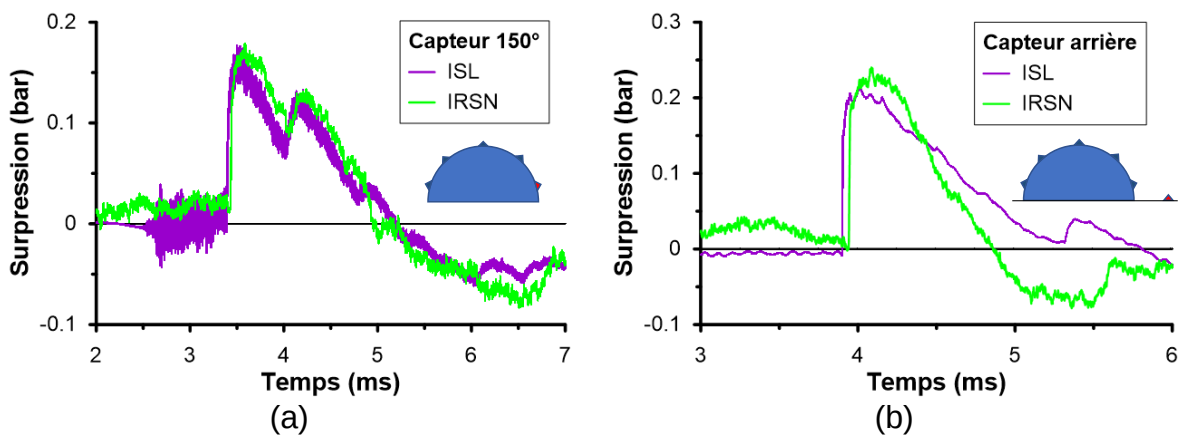
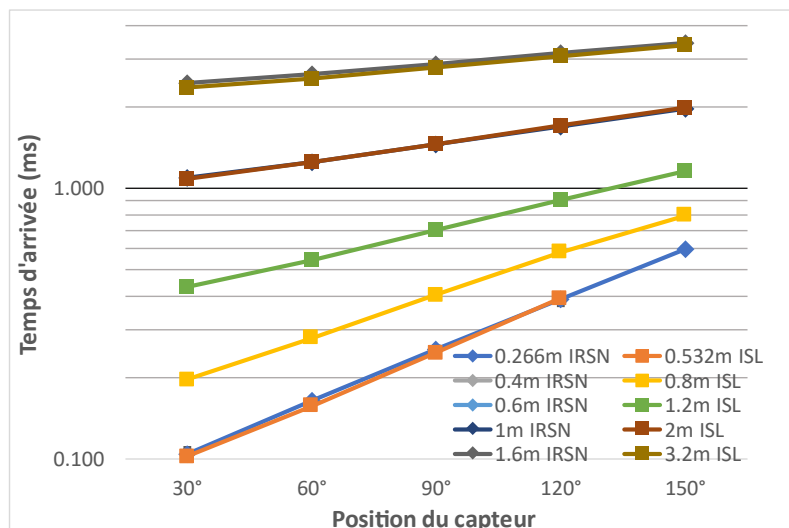


Figure 3-33 : Comparaison de signaux enregistrés aux deux échelles, $d_{\text{charge-hémicylindre}}=1,60$ m/3,20 m.



3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

Figure 3-34 : Temps d'arrivée de l'onde autour de l'obstacle aux deux échelles⁷ pour des charges de 333 g (ISL) et 42 g (IRSN) d'Hexomax®.

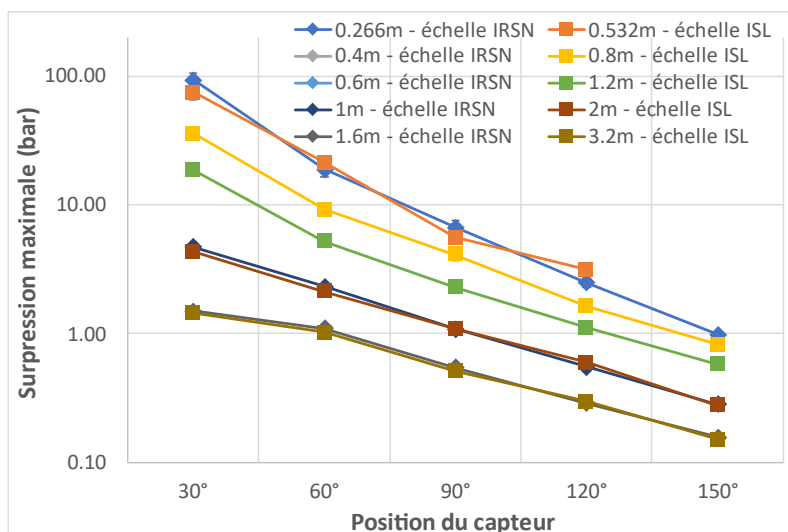


Figure 3-35 : Suppressions relevées à la surface des obstacles aux deux échelles pour des charges de 333 g (ISL) et 42 g (IRSN) d'Hexomax®.

L'étude de l'évolution du temps d'arrivée de l'onde à la surface de l'hémicylindre pour les différentes masses de charge montre une croissance similaire, avec des courbes parallèles (Figure 3-36-a), mais l'adimensionnement des valeurs relevées par le temps d'arrivée de l'onde au pied de l'hémicylindre (calculé avec les équations de Kinney & Graham [12] et noté t_0) permet de comparer directement les masses d'explosif (Figure 3-36-b) en fonction de l'angle d'observation sur l'obstacle.

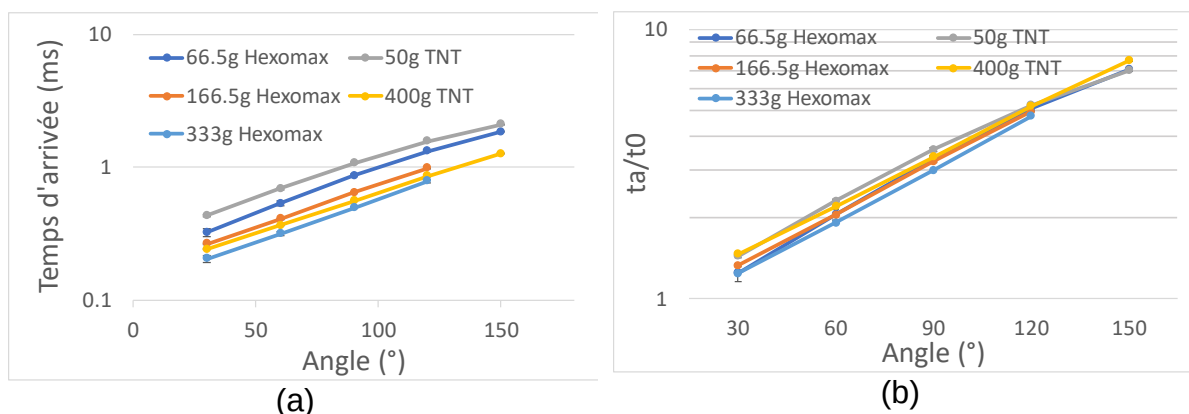


Figure 3-36 : Évolution du temps d'arrivée à la surface de l'hémicylindre à 0,53 m de la charge explosive (a) et normalisée par le temps d'arrivée de l'onde au pied de l'obstacle (b) pour différentes masses d'explosif.

⁷ Les temps d'arrivée relevés à l'ISL ont été divisés par deux pour la comparaison

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

L'analyse des temps d'arrivée adimensionnés obtenus pour différentes distances charge-hémicylindre (Figure 3-37) présente des tendances d'évolution similaires pour lesquelles il est possible de déterminer une corrélation dépendant de deux paramètres adimensionnés A_t et B_t de la forme :

$$\frac{t_a}{t_0} = A_t e^{B_t \theta}, \theta \in [30, 150] \quad (44)$$

Le Tableau 3-10 présente les valeurs de ces coefficients pour les distances charge-obstacle étudiées dans cette thèse et pour des angles d'observation θ compris entre 30 et 150°. Le paramètre A vaut $0,91 \pm 0,007$ (soit 0,008% de dispersion), tandis que la valeur de B diminue quand la distance charge-hémicylindre augmente. Ainsi, il est possible d'établir une corrélation entre la valeur de ce coefficient B_t et le rapport

$\frac{R}{d} = \frac{\text{rayon de l'hémicylindre}}{\text{distance charge-obstacle}}$ sous la forme d'un polynôme du deuxième degré :

$$B_t = -0,0134 \left(\frac{R}{d} \right)^2 + 0,0303 \frac{R}{d} - 0,0009 \quad (45)$$

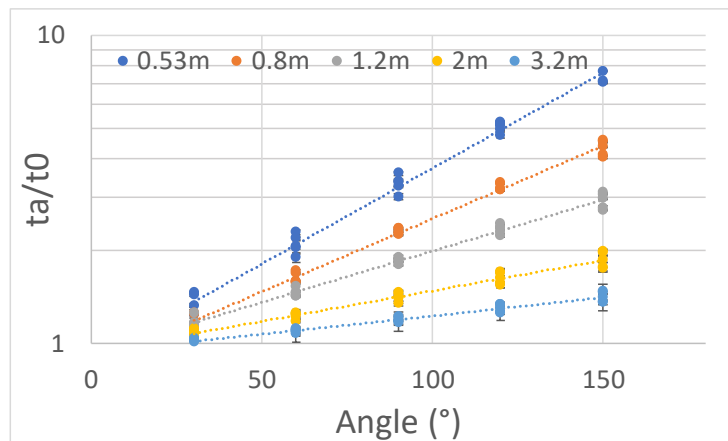


Figure 3-37 : Évolution du temps d'arrivée adimensionné en fonction de l'angle d'observation sur l'hémicylindre pour différentes distances charge-hémicylindre.

Tableau 3-10 : Valeur des coefficients A_t et B_t de l'équation (44) pour les distances charge-hémicylindre étudiées

d	A_t	B_t	R^2
0,53 m	0,89	0,0143	0,99
0,8 m	0,85	0,0109	0,99
1,2 m	0,93	0,0077	0,98
2 m	0,94	0,0046	0,96

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

3,2 m	0,94	0,0027	0,96
-------	------	--------	------

La même méthode peut être appliquée aux valeurs de surpression mesurées, mais en les normalisant par la surpression derrière l'onde incidente au pied de l'hémicylindre (notée ΔP_i), comme illustré dans la Figure 3-38.

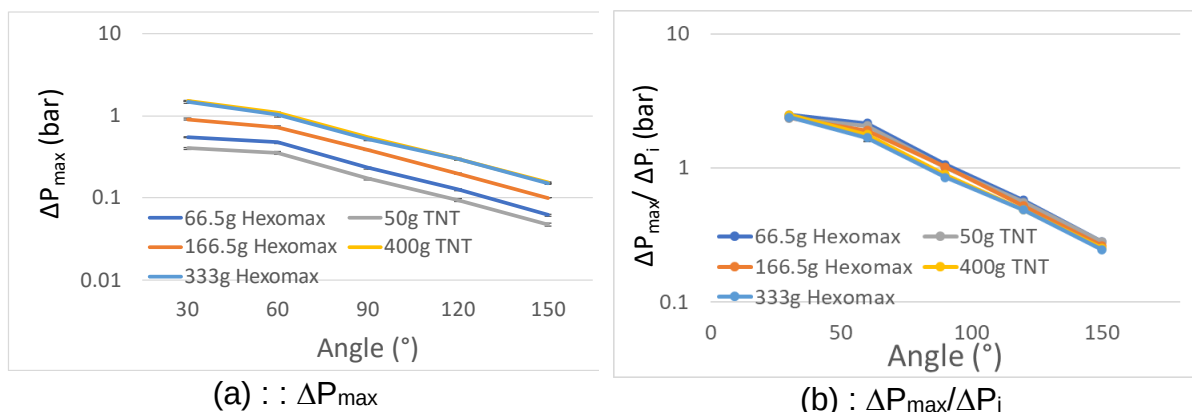


Figure 3-38 : Évolution de la surpression à la surface de l'hémicylindre à 3,2 m de la charge explosive (gauche) et normalisée par la surpression incidente de l'onde au pied de l'obstacle (droite) pour différentes masses d'explosif.

Il est alors possible de déterminer une corrélation de la même forme que (44) pour chaque distance d étudiée, soit :

$$\frac{\Delta P_{max}}{\Delta P_i} = A_P e^{B_P \theta}, \theta \in [30, 150] \quad (46)$$

Le Tableau 3-11 rassemble les valeurs des coefficients A_P et B_P pour les valeurs de d étudiées ici et un angle d'observation θ compris entre 30 et 150°. Le paramètre A_P vaut $4,93 \pm 0,29$ (soit 5,9 % de dispersion). Dans ce cas, le coefficient B_P diminue quand le rapport $\frac{R}{d}$ augmente, il peut encore être déterminé par un polynôme de degré 2 :

$$B_P = -0,0282 \left(\frac{R}{d} \right)^2 - 0,0489 \frac{R}{d} - 0,0133 \quad (47)$$

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

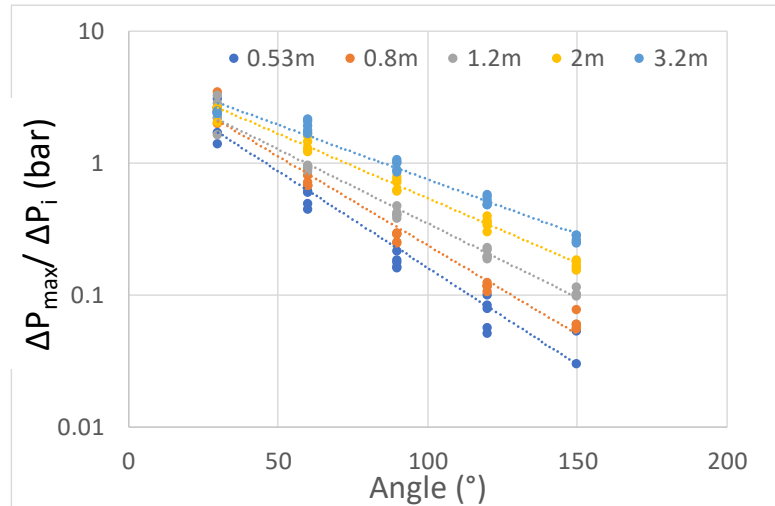


Figure 3-39 : Évolution de la surpression normalisée par la surpression incidente au pied de l'hémicylindre, $\Delta P_{\max}/\Delta P_i$, pour plusieurs distances charge-hémicylindre.

Tableau 3-11 : Coefficients de l'équation (44) pour les différentes distances charge-hémicylindre étudiées.

d	A_P	B_P	R^2
0,53 m	4,65	-0,034	0,89
0,8 m	5,27	-0,031	0,94
1,2 m	4,61	-0,026	0,91
2 m	5,11	-0,022	0,97
3,2 m	5,03	-0,019	0,93

On note toutefois que les coefficients de détermination associés aux régressions présentées ici sont moins bons pour les surpressions que pour les temps d'arrivée, ce qui est dû à la plus grande dispersion des valeurs de $\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_i}$, notamment pour la position à 30° (jusqu'à 30% de dispersion à 0,53 m).

Le modèle de Glasstone [30] étant limité à des surpressions inférieures à 3,5 bar, les comparaisons avec ce dernier n'ont été possibles que pour les essais où la $d_{\text{charge-obstacle}} = 1,6$ m à l'IRSN (et à 3,2 m à l'ISL) puisque les surpressions mesurées ne dépassent pas 3,45 bar. La Figure 3-40 montre que les pressions mesurées sur la face avant sont sous-estimées par Glasstone, dont les prédictions sont jusqu'à 45 % inférieures à l'expérience. Par ailleurs, ce modèle prévoit une remontée des niveaux de pression sur la face arrière de l'hémicylindre (à partir de 105°), tandis que les pressions mesurées à la surface de l'obstacle sont strictement décroissantes. Cet écart pourrait s'expliquer par le fait que le modèle de Glasstone est valable dans la

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

région de réflexion de Mach, c'est-à-dire avec un choc incident droit, contrairement à notre configuration qui implique un choc sphérique. Cela illustre la nécessité de développer de nouveaux modèles prédictifs permettant d'évaluer l'effet de la diffraction de l'obstacle sur l'onde de souffle.

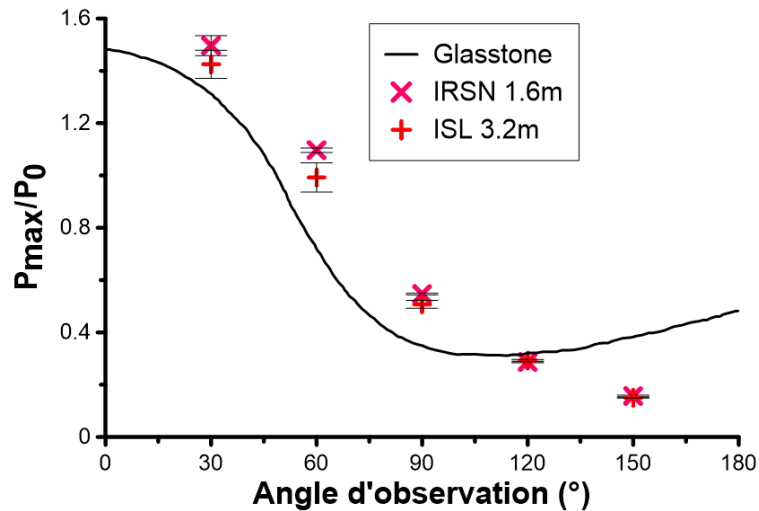


Figure 3-40 : Comparaison des résultats au modèle de Glasstone.

Ainsi, les données obtenues durant cette campagne expérimentale ont également été comparées au modèle S [123] présenté dans la section bibliographique §1.4.3.2. La Figure 3-41 met en parallèle les valeurs de coefficients de transmission obtenues expérimentalement avec les capteurs piézo-électriques et celles prédites par le modèle S, en fonction de la Distance Directe Réduite Adimensionnée. Chaque point représente la moyenne des valeurs des essais et les barres d'erreur correspondent à l'incertitude expérimentale définie plus haut. Les essais menés à l'IRSNI ont permis de compléter le modèle, développé à cette échelle, en ajoutant des points obtenus à différentes distances et à 120° pour la configuration à 1,60 m. Ceux réalisés à l'ISL ont permis de vérifier la validité du modèle à l'échelle double et pour différentes tailles de charges explosives.

Pour les capteurs situés à 120 et 150°, on observe une excellente correspondance entre les nouvelles données obtenues à l'ISL et à l'IRSNI avec le modèle S. Pour les capteurs situés à 90°, les essais réalisés au cours de cette thèse sont en excellent accord avec les essais de Trélat et al. [187] pour les mêmes conditions illustrant une nouvelle fois l'excellente reproductibilité des essais avec l'installation de l'IRSNI. Concernant les capteurs de l'ISL, à 90°, nous notons des

coefficients de transmission légèrement plus faibles que le modèle S, moins de 15 % d'écart, cependant, il faudrait prendre en compte l'incertitude liée au modèle qui n'est pas explicitement fournie.

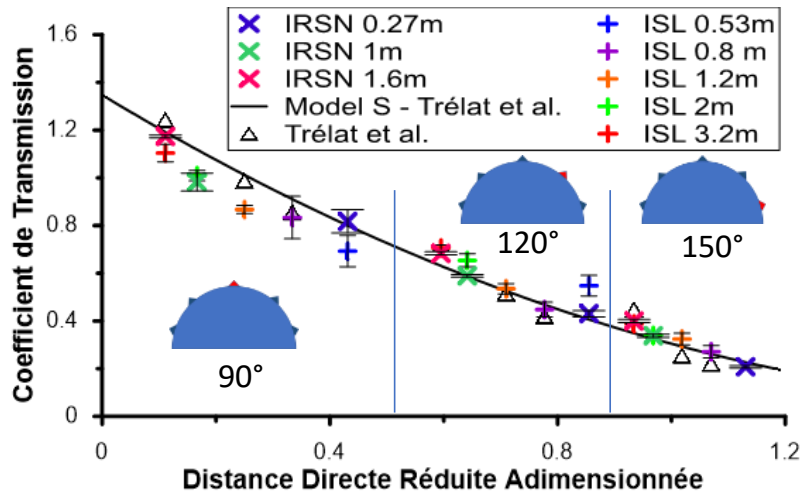


Figure 3-41 : Comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle phénoménologique développé dans [123].

Ce modèle a initialement été développé pour des charges explosives équivalentes à 50 g de TNT (400 g à échelle double), et les essais menés à l'ISL avec différentes tailles de charges (donc différents équivalents TNT) permettent de vérifier son domaine de validité. La comparaison des différentes tailles de charges au modèle S est présentée dans la Figure 3-42. Il est à noter que les écarts extrêmes relevés à 0,53 m et 0,8 m pour les capteurs situés à 120° et 150° peuvent être dus aux perturbations mentionnées dans la section 3.2.2 à ces positions. Pour les charges explosives de 400 g de TNT, les valeurs expérimentales suivent la tendance des charges de 333 g d'Hexomax®. Des écarts similaires sont observés pour les charges de taille intermédiaire. Enfin, les résultats pour 66,5 g d'Hexomax® et pour 50 g de TNT, sont en moyenne en accord avec le modèle. Il est important de noter que le modèle S présente aussi des incertitudes liées d'une part aux incertitudes expérimentales des essais mais aussi liées à la méthode de régression de la corrélation proposée.

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

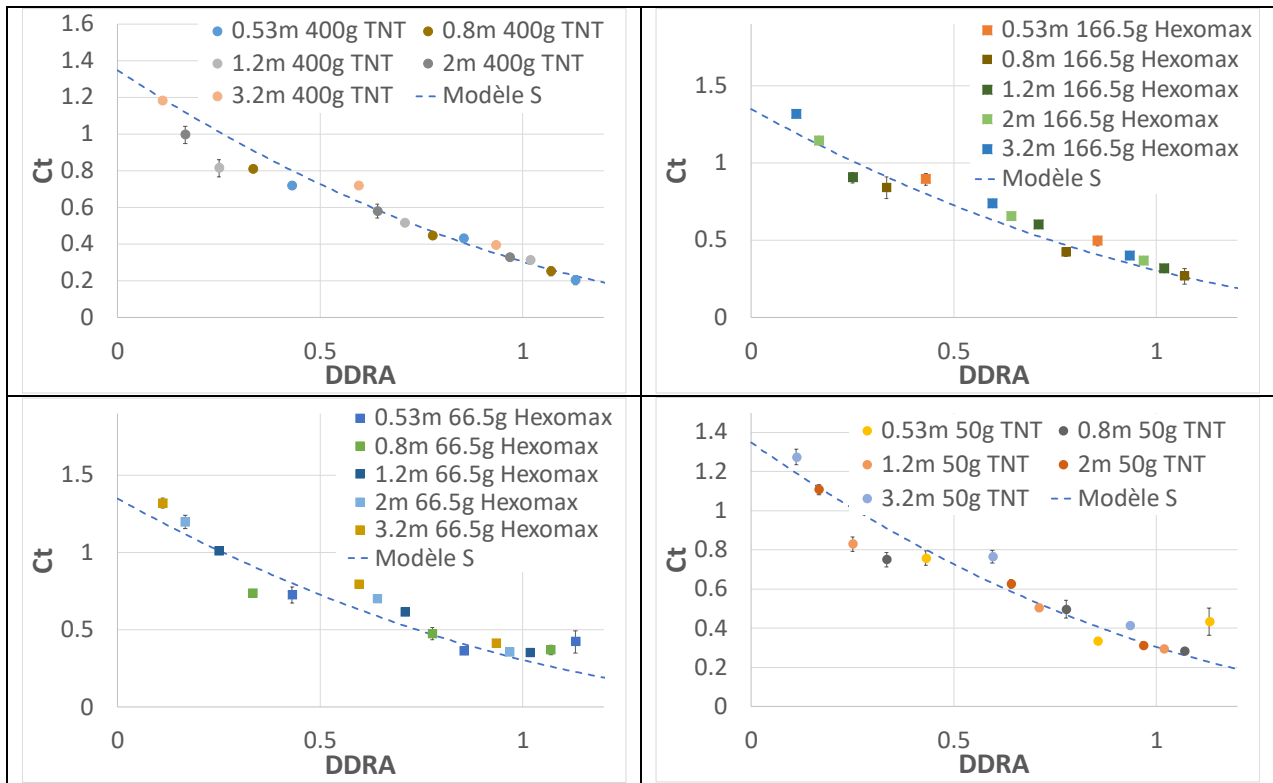


Figure 3-42 : Comparaison des résultats expérimentaux de l'ISL avec le modèle phénoménologique développé dans [123].

3.2.4 Effet atténuateur

Au-delà des capteurs présents à la surface de l'hémicylindre, les capteurs placés en aval de celui-ci dans chaque configuration à l'IRSN permettent d'étudier l'effet écran de l'hémicylindre. En effet, deux capteurs peuvent être comparés à ceux placés en champ libre dans le cas où l'hémicylindre se trouve à 0,27 m de la charge explosive, situés à des distances $\frac{4R}{3}$ et $2R$ (R étant le rayon de l'hémicylindre) derrière l'obstacle, et trois quand il est à 1 m, situés à des distances $\frac{R}{3}$, R et $\frac{5R}{3}$. Dans la configuration à 1,6 m, le capteur aval (capteur K9, placé à une distance $\frac{2R}{3}$) n'a pas d'équivalent en champ libre, et est donc comparé à deux capteurs en champ libre qui encadrent sa distance à la charge (capteurs K8 et K9).

Dans le cas de l'ISL, le capteur Parr est toujours installé dans le premier emplacement de capteur disponible derrière l'hémicylindre (soit une distance $\frac{2R}{3}$ pour

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

l'obstacle à 0,53, 0,80 ou 3,2 m de la charge, et $\frac{R}{3}$ dans les configurations à 1,2 et 2 m) et peut être comparé directement au capteur P_{Stylo} placé en champ libre à la même distance de la charge explosive.

La Figure 3-43 présente les signaux de pression enregistrés par le capteur placé à une distance donnée, avec et sans obstacle, à l'IRSN (charge équivalente à 50 g de TNT) et l'ISL (charges équivalentes à 400 g de TNT) ; on observe que le profil de l'onde de souffle derrière l'hémicylindre évolue avec la distance de l'obstacle à la charge : alors qu'il est encore très proche du profil d'une onde de souffle en champ proche, le signal de pression derrière l'hémicylindre s'arrondit quand la distance augmente (à partir de 1 m à l'IRSN et 2 m à l'ISL). La Figure 3-44 présente la variation de pression (a), de temps d'arrivée (b) et d'impulsion (c) en fonction de la distance derrière l'hémicylindre.

Ainsi, l'atténuation de pression due à la présence de l'hémicylindre est la plus importante (environ 50%) immédiatement derrière l'obstacle et diminue avec la distance derrière lui (Tableau 3-12). Cet effet atténuateur semble pouvoir être observé sur une distance au moins égale au diamètre de l'hémicylindre.

La présence de l'hémicylindre retarde également l'arrivée de l'onde de souffle, car elle doit parcourir une plus grande distance (~63 cm pour passer au-dessus de l'hémicylindre, contre 40 cm en champ libre) ; ce retard ne semble pas dépendre de la distance derrière l'hémicylindre, mais plutôt de la distance de l'hémicylindre à la charge, et est ainsi plus faible quand l'hémicylindre est plus loin de la charge (50% de retard à 0,27/0,53 m contre moins de 10% à 1,6/3,2 m).

Finalement, l'impulsion positive est également réduite en présence de l'obstacle hémicylindrique (jusqu'à 21% à 0,27 m) mais il est difficile d'en dégager une tendance d'évolution.

L'atténuation de l'onde de souffle derrière l'obstacle de l'ISL pour différentes distances charge-hémicylindre est illustrée dans la Figure 3-45.

En termes de surpression (Tableau 3-12), ce sont les charges explosives les plus faibles (66,5 g d'Hexomax® et 50 g de TNT) qui présentent la plus forte atténuation, quelle que soit la distance à la charge explosive ; cette atténuation atteint par exemple -47 % à 0,53 m contre seulement -36 % pour les charges les plus importantes. Enfin, comme décrit plus haut, l'atténuation de pression est la plus forte, pour toutes les

3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long

masses de charges, dans les configurations où le capteur se trouve le plus proche de l'hémicylindre (1,2 et 2 m).

En ce qui concerne les temps d'arrivée, les plus petites charges explosives (50 g de TNT et 66,5 g d'Hexomax®) exhibent un retard plus faible que les plus grandes charges, avec seulement 30 et 35 % de retard à 0,53 m contre 46 à 50 % pour les charges équivalentes à 400 g de TNT. Ainsi, en plus de la diminution du retard dû à la distance, un effet d'échelle lié à la masse d'explosif utilisée semble s'ajouter. Les petites charges créent une onde de souffle plus faible, et donc plus lente, ce qui pourrait expliquer la baisse de l'effet atténuateur de l'hémicylindre lors de leur utilisation.

Tableau 3-12 : Résumé des atténuations de surpression observées expérimentalement.

	d _{charge-obstacle} (m)	Atténuation de la pression % (distance derrière l'obstacle en m)
IRSN	0,27 m	0% ($\frac{4R}{3}$), -11% (2R)
	1 m	-52% ($\frac{R}{3}$), -25% (R), +3,7% ($\frac{5R}{3}$)
	1,6 m	-35 à -40% à $\frac{2R}{3}$
ISL	0,53 m	-35% ($\frac{2R}{3}$)
	0,80 m	-39% ($\frac{2R}{3}$)
	1,2 m	-45% ($\frac{R}{3}$)
	2 m	-47% ($\frac{R}{3}$)
	3,2 m	-33% ($\frac{2R}{3}$)

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

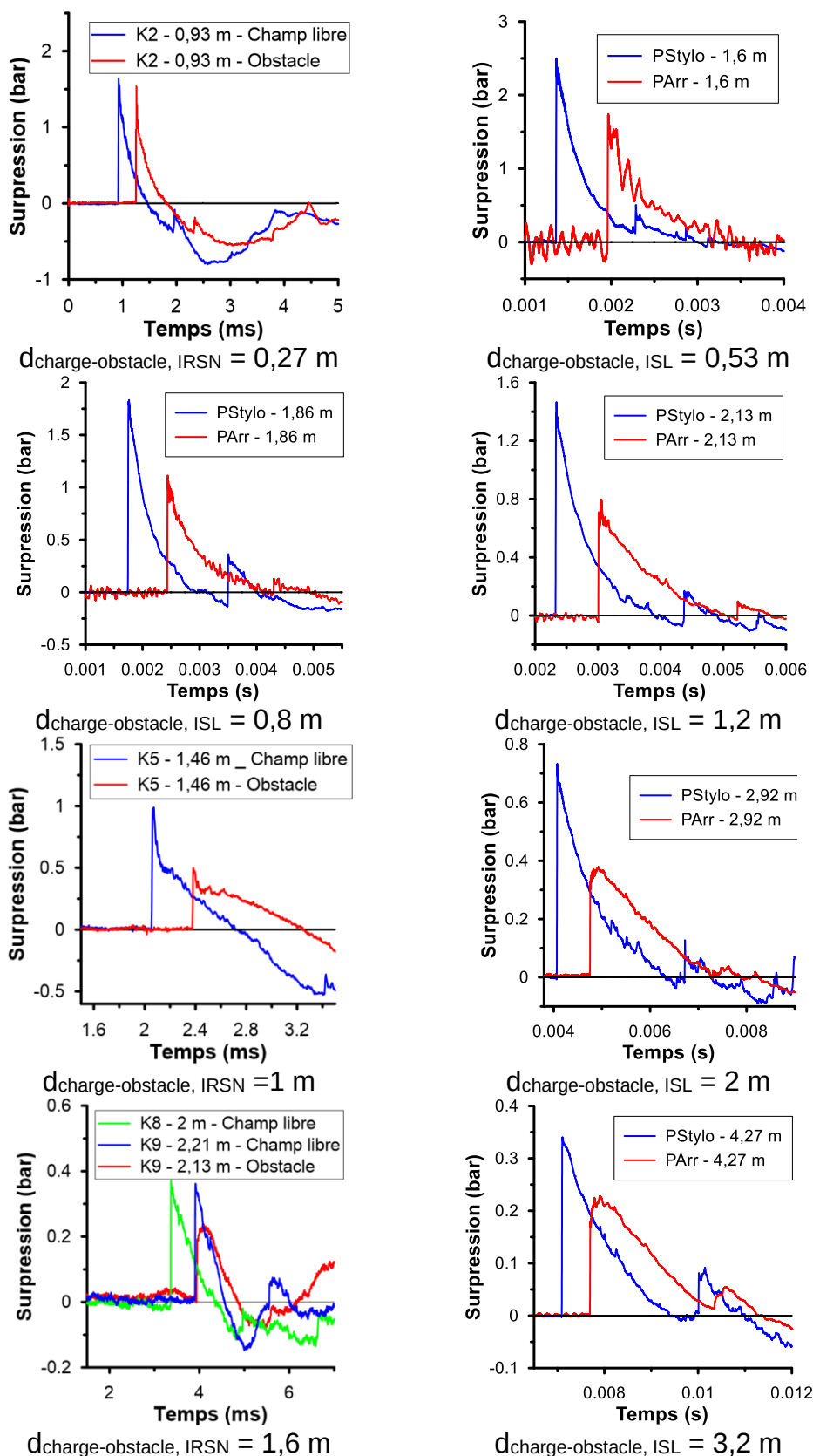
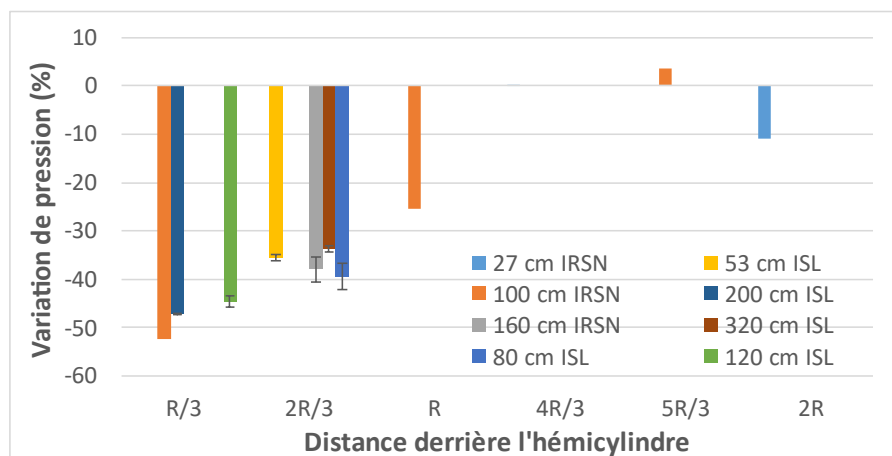
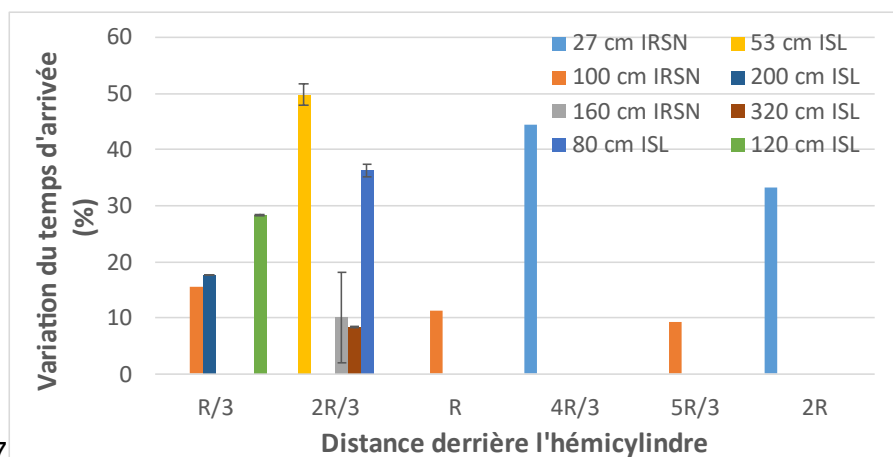


Figure 3-43 : Effet écran de l'obstacle long à différentes distances de la charge explosive à l'IRSN (gauche) et l'ISL (droite).

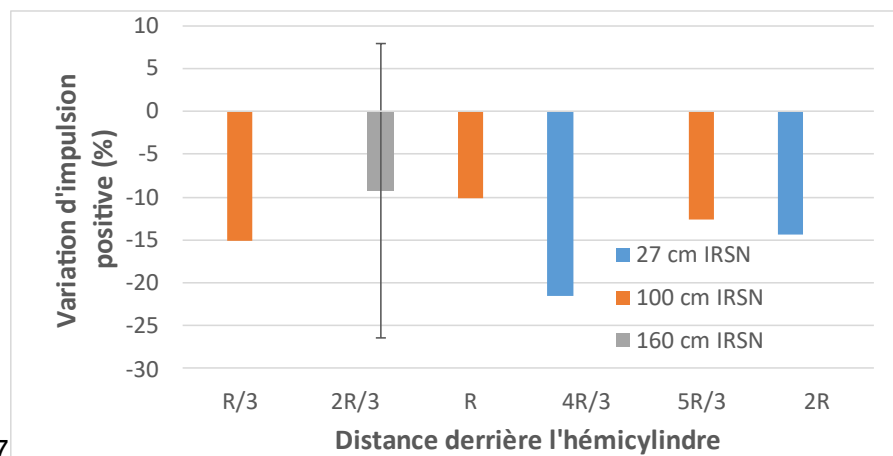
3.2 Interaction avec un obstacle hémicylindrique long



(a)



(b)



(c)

Figure 3-44 : Évolution des grandeurs caractéristiques de l'onde de souffle derrière l'obstacle long pour des charges équivalentes à 50 g (IRSN) et 400 g (ISL) de TNT en fonction de la distance derrière l'obstacle (exprimée en fonction de son rayon).

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

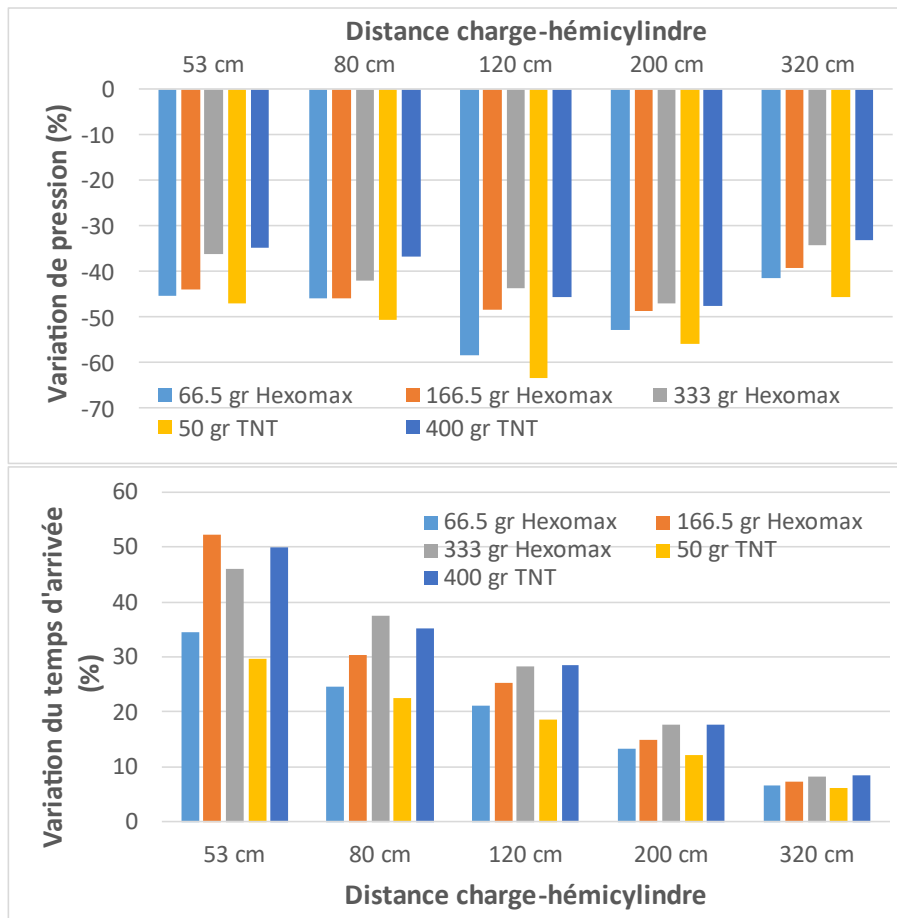


Figure 3-45 : Évolution de la surpression et du temps d'arrivée de l'onde de souffle derrière l'hémicylindre de l'ISL en fonction de sa distance à la charge explosive.

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

Afin de mieux appréhender l'effet de la présence d'un obstacle sur la propagation d'une onde de souffle, nous avons fait varier la configuration en étudiant l'interaction avec un hémicylindre court, ou deux consécutifs. En particulier, l'effet atténuateur de l'obstacle a été analysé, ainsi que son contournement par les ondes de choc.

Les signaux de pression relevés sur la face avant de l'hémicylindre court sont très proches de ceux obtenus avec l'obstacle long, comme illustré sur la Figure 3-46-a pour un angle de 30°. La légère différence de décroissance pourrait être due à la

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

différence de conditions atmosphériques lors des essais et n'entraîne pas de différence d'impulsion positive significative (moins de 5% d'écart). Comme illustré dans la Figure 3-47, les résultats de surpression relevés sur les obstacles court et long aux deux échelles sont très proches. Ainsi, la longueur de l'obstacle n'a pas d'impact sur la surpression exercée sur sa surface par l'onde de souffle dans le cas où il se situe à 0,6/1,2 m de la charge explosive ; toutefois, dans le cas où la charge se trouve à 1,6/3,2 m de l'obstacle, une différence apparaît au niveau du capteur situé à 150°, avec une surpression maximale plus élevée dans le cas de l'obstacle court. En effet, cette position est sujette au passage d'une onde de souffle provoquée par la réflexion de l'onde de souffle sur le sol derrière l'obstacle, qui se traduit par un second pic de pression sur les signaux (Figure 3-46-b) ; dans le cas de l'obstacle long, la pression diminue entre le passage de l'onde incidente et celui de celle réfléchie, mais pas dans le cas où l'obstacle est court : on observe, aux deux échelles, un plateau de pression entre les deux pics (Figure 3-46-b), ce qui conduit à une surpression maximale plus élevée d'environ 30% aux deux échelles (Figure 3-47), et une impulsion positive environ 10% supérieure. Ce phénomène n'étant observé qu'à 1,6/3,2 m de la charge, il existe probablement une distance critique charge-obstacle à partir de laquelle un tel effet est susceptible de se produire.

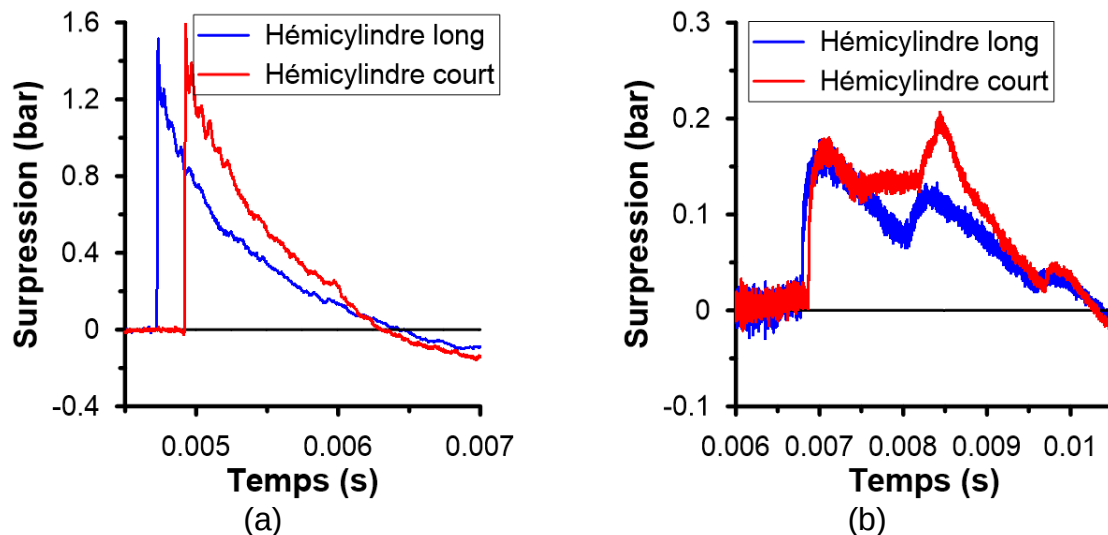


Figure 3-46 : Comparaison des signaux de pression à la surface d'un hémicylindre long (bleu) ou court (rouge) à 3,2 m de la charge explosive à l'ISL pour des angles de a) 30° et b) 150°.

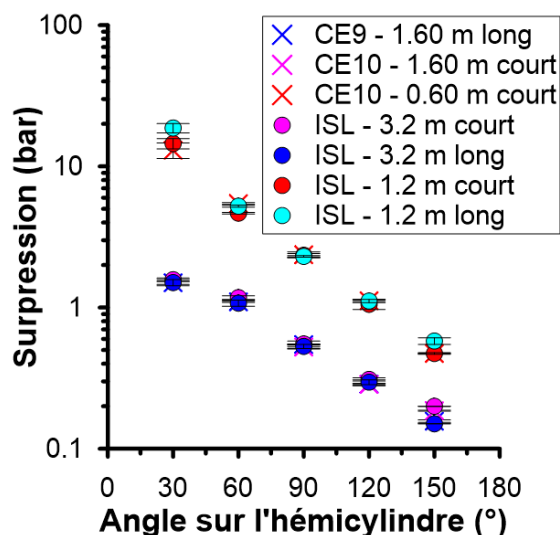


Figure 3-47 : Surpressions relevées à la surface d'un hémicylindre long ou court.

3.4.1 Effet atténuateur de l'obstacle court

Si les signaux de pression relevés à la surface de l'obstacle sont fort similaires peu importe sa longueur, une différence notable est observée derrière l'obstacle court (Figure 3-48), avec parfois de multiples pics de pression (signal violet).

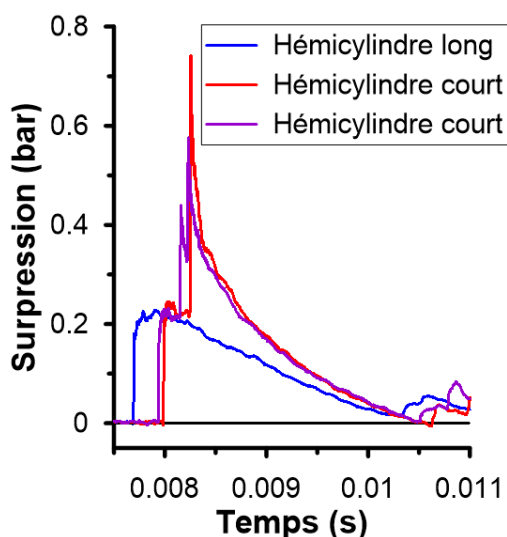


Figure 3-48 : Comparaison de signaux de pression obtenus derrière un obstacle hémicylindrique court ou long à 3,20 m de la charge explosive à l'ISL.

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

Afin d'examiner ce phénomène, dans la configuration où un hémicylindre court se trouve à 0,60 m (resp. 1,2 m) de la charge explosive, 4 capteurs se trouvent en aval dans l'axe de la charge, à des distances comprises entre 1,07 (resp. 2,13 m) et 1,47 m (resp. 2,94 m). Ces capteurs se situent aux mêmes positions en champ libre, ainsi que dans les configurations à deux tronçons d'hémicylindre (et se trouvent donc entre eux). La Figure 3-49 présente des signaux obtenus par les capteurs de l'IRSN dans les trois configurations mentionnées : en champ libre (bleu), en présence de deux tronçons d'hémicylindre (rouge), et avec un seul tronçon d'hémicylindre situé à 0,6 m de la charge explosive (vert). On voit clairement deux pics de surpression sur les signaux rouges et verts au niveau des capteurs K7 à K9 ; ces signaux sont décalés d'environ 200 μ s en moyenne au niveau du capteur K7. Le premier choc correspond au passage de l'onde qui passe au-dessus de l'hémicylindre, le premier temps d'arrivée étant le même qu'en présence de l'hémicylindre long (~1,5 ms). Le second choc arrive en moyenne 200 μ s environ après le premier, et pourrait être dû au passage d'une onde contournant l'hémicylindre ; l'onde passant au-dessus de l'hémicylindre parcourt 1,161 m de la charge au capteur K7, tandis qu'une onde le contournant devrait parcourir 1,243 m. Cette différence de distance de 8,2 cm serait parcourue en 200 μ s par une onde de souffle se déplaçant à 410 m.s⁻¹, ce qui semble cohérent avec la vitesse d'une onde de souffle derrière l'hémicylindre et confirme donc l'hypothèse de l'onde de contournement. L'écart de temps diminue au fur et à mesure de la progression des ondes de choc entre les deux tronçons d'hémicylindre : il est d'environ 108 μ s au niveau du capteur K8, puis de seulement 30 μ s au niveau du capteur K9 ; enfin, un seul choc est détecté par le capteur K10, l'onde de contournement ayant sûrement rattrapé l'onde se propageant dans l'axe des obstacles.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

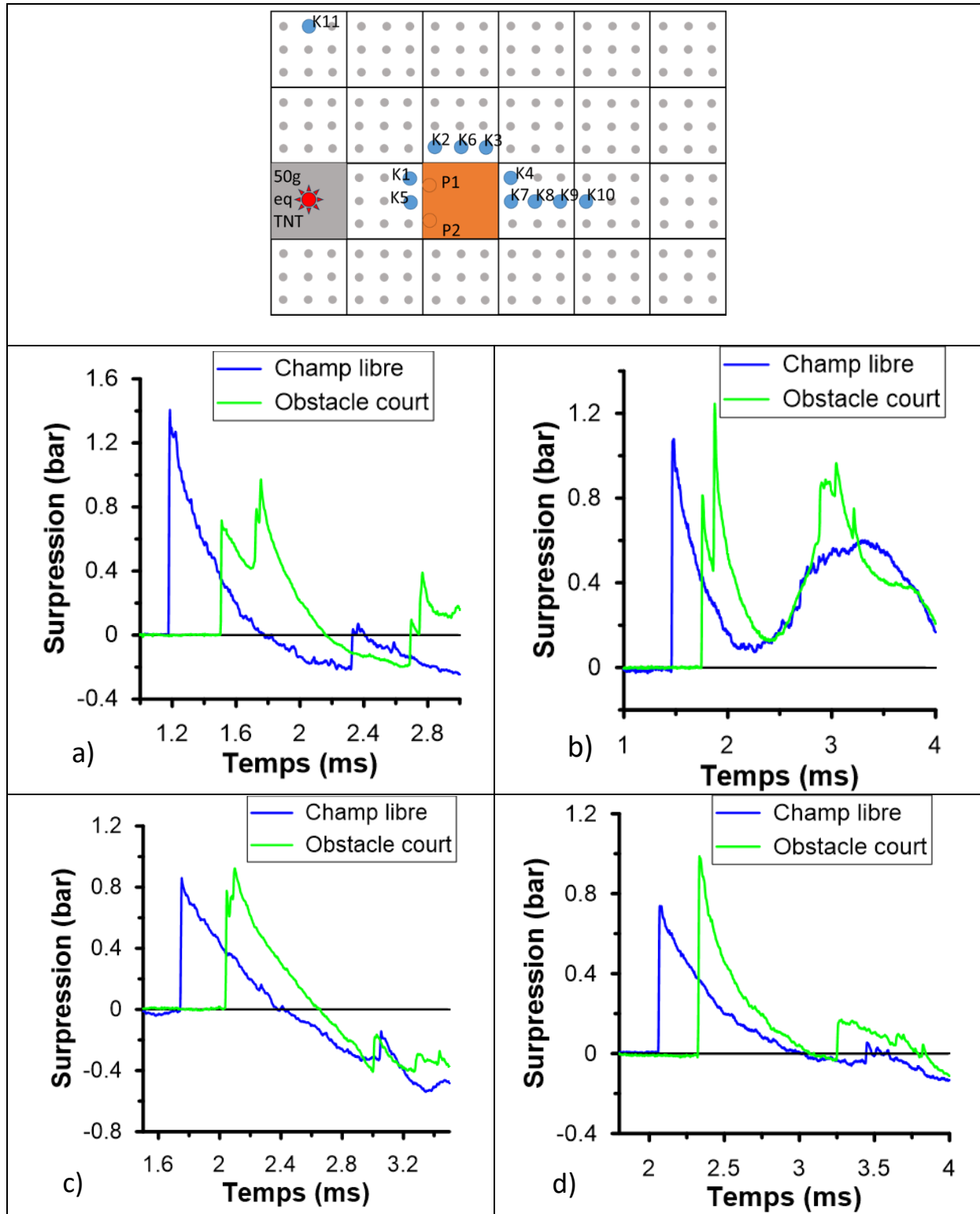


Figure 3-49 : Effet écran de l'obstacle court de l'IRSN à 0,6 m de la charge explosive – capteur situé à a) 1,07 m (K7) b) 1,19 m (K8) c) 1,32 m (K9) d) 1,45 m (K10) de la charge.

Ce phénomène est similaire à celui observé par Gautier *et al.* [188] avec un obstacle plan, derrière lequel les ondes de contournement engendraient aussi des pics

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

de surpression additionnels, dans le cas où l'obstacle n'était pas au moins trois fois plus large que haut (configuration semblable à celle étudiée ici, l'obstacle court l'étant 4 fois plus que le long).

En termes de surpression, on note que le premier pic présent sur les signaux de la Figure 3-49 (correspondant au passage de l'onde passée au-dessus de l'hémicylindre) présente une forte atténuation par rapport à la surpression mesurée en champ libre à la même distance (-44% au niveau du capteur K7), mais qui diminue avec la distance derrière l'hémicylindre (-21% en K8, et -9% en K9). Toutefois, l'arrivée du second choc (provenant de l'onde contournant l'obstacle) réduit cet effet, avec seulement 18% d'atténuation au niveau du capteur K7, voire l'annule pour les capteurs situés plus loin (+4% de surpression en K8, +14% en K9), comme illustré dans la Figure 3-50. On observe même un fort effet amplificateur en K10, avec une surpression supérieure de 40% à celle mesurée en champ libre, comparable à celui relevé par Gautier *et al.* [188]. Enfin, l'impulsion positive mesurée derrière l'obstacle est inférieure de moins de 2,5% aux valeurs relevées en champ libre, et est même relativement stable (-2,4% en K7, -2% en K9 et -2% en K10).

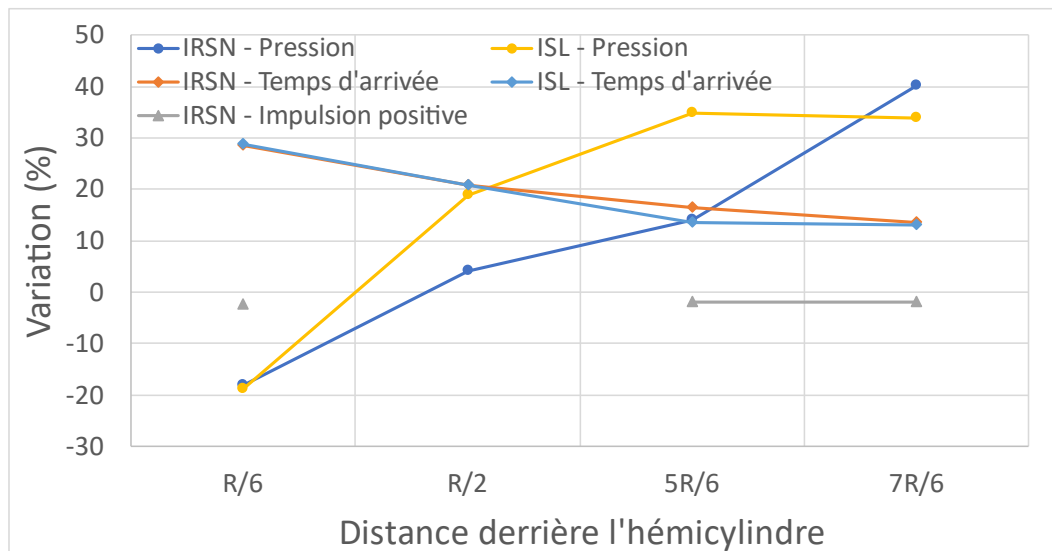


Figure 3-50 : Effet écran de l'obstacle à 0,6/1,2 m - variation des grandeurs d'intérêt par rapport au champ libre.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

Dans la configuration où l'hémicylindre court se trouve à 1,6 m (resp. 3,2) de la charge explosive, deux capteurs (resp. un capteur) se trouvent derrière lui, un dans l'axe de la charge (le capteur K9), à 2,133 (resp. 4,27) m de la charge, et un second à côté (K7), situé à 2,137 m. Ces capteurs se situent aux mêmes positions que les capteurs K10 et K9 en champ libre.

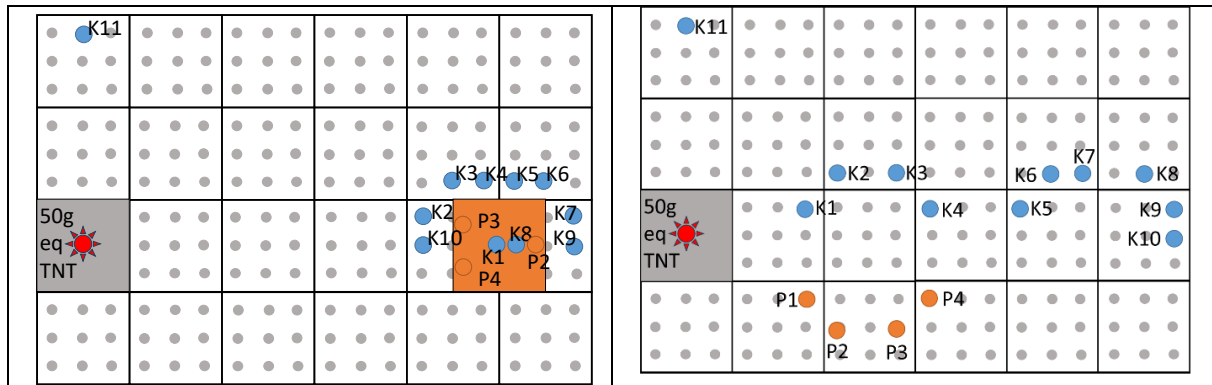


Figure 3-51 : Configurations utilisées pour étudier l'effet atténuateur de l'obstacle court à 1,60 m.

En ce qui concerne les capteurs K7-K9, non alignés avec l'axe de l'hémicylindre, l'atténuation du premier pic de pression est de 69%, et seulement 17% pour le second. Le retard de l'onde est de 3,8%, et l'impulsion de l'onde derrière l'obstacle est inférieure à l'impulsion en champ libre de seulement 0,19%.

Dans l'axe de l'hémicylindre (capteurs K10/K9), on observe un comportement similaire à celui positionné derrière le tronçon situé à 0,60 m, avec plusieurs pics de surpression. On peut noter, dans la Figure 3-52, que le premier pic de surpression mesuré derrière l'hémicylindre court présente le même temps d'arrivée que derrière l'hémicylindre long, ce qui démontre que ce premier choc est bien celui qui passe au-dessus de l'obstacle. Il présente par ailleurs la même amplitude de pression : 0,22 bar pour l'obstacle long (signal violet), 0,21 derrière l'hémicylindre court (signal vert) ; cette valeur correspond à un déficit de pression de 44% par rapport au champ libre. Toutefois, comme dans la configuration à 0,60 m, le second choc engendre une surpression maximale plus élevée qu'en champ libre (+23% ici).

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

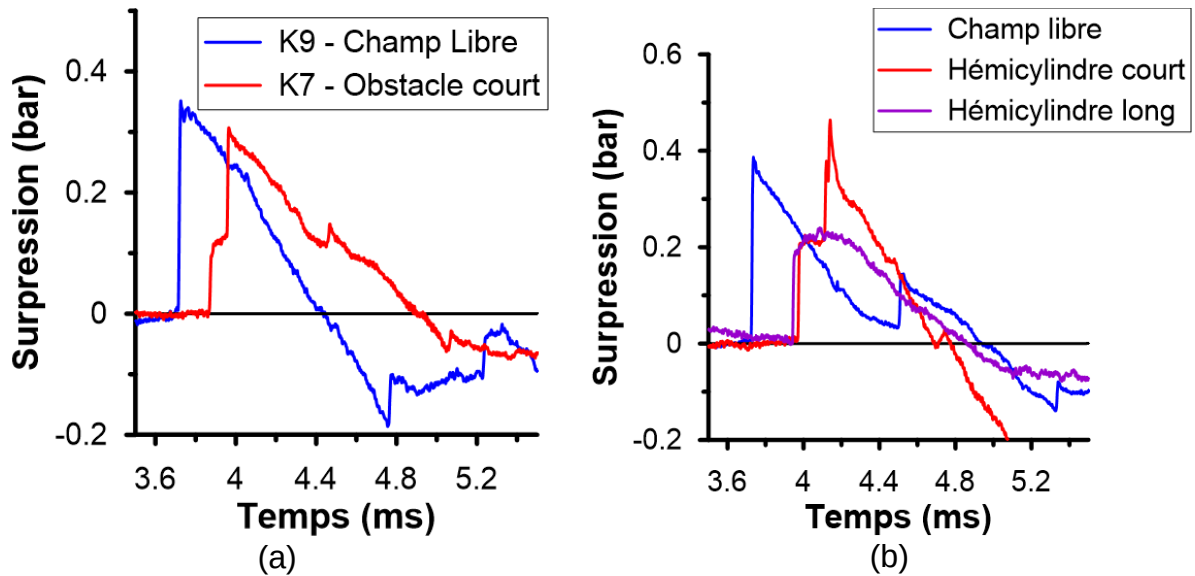


Figure 3-52 : Effet écran de l'obstacle court à 1,60 m.

3.4.2 Présence de deux tronçons successifs

Dans le cas où un second tronçon court d'hémicylindre est placé en aval du premier, les phénomènes observés derrière le premier obstacle sont identiques à ceux décrits dans la section 3.4.1 (Figure 3-53) : deux pics de surpression ont observés derrière l'obstacle, avec une surpression maximale inférieure à celle relevée en champ libre, puis ceux-ci finissent par fusionner et le signal de pression présente un simple pic, avec une valeur maximale supérieure au champ libre. Une différence peut toutefois être observée entre les deux configurations au niveau du capteur K10 (Figure 3-53-d), où la réflexion provenant de l'interaction du choc avec le second tronçon est visible vers 3 ms.

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

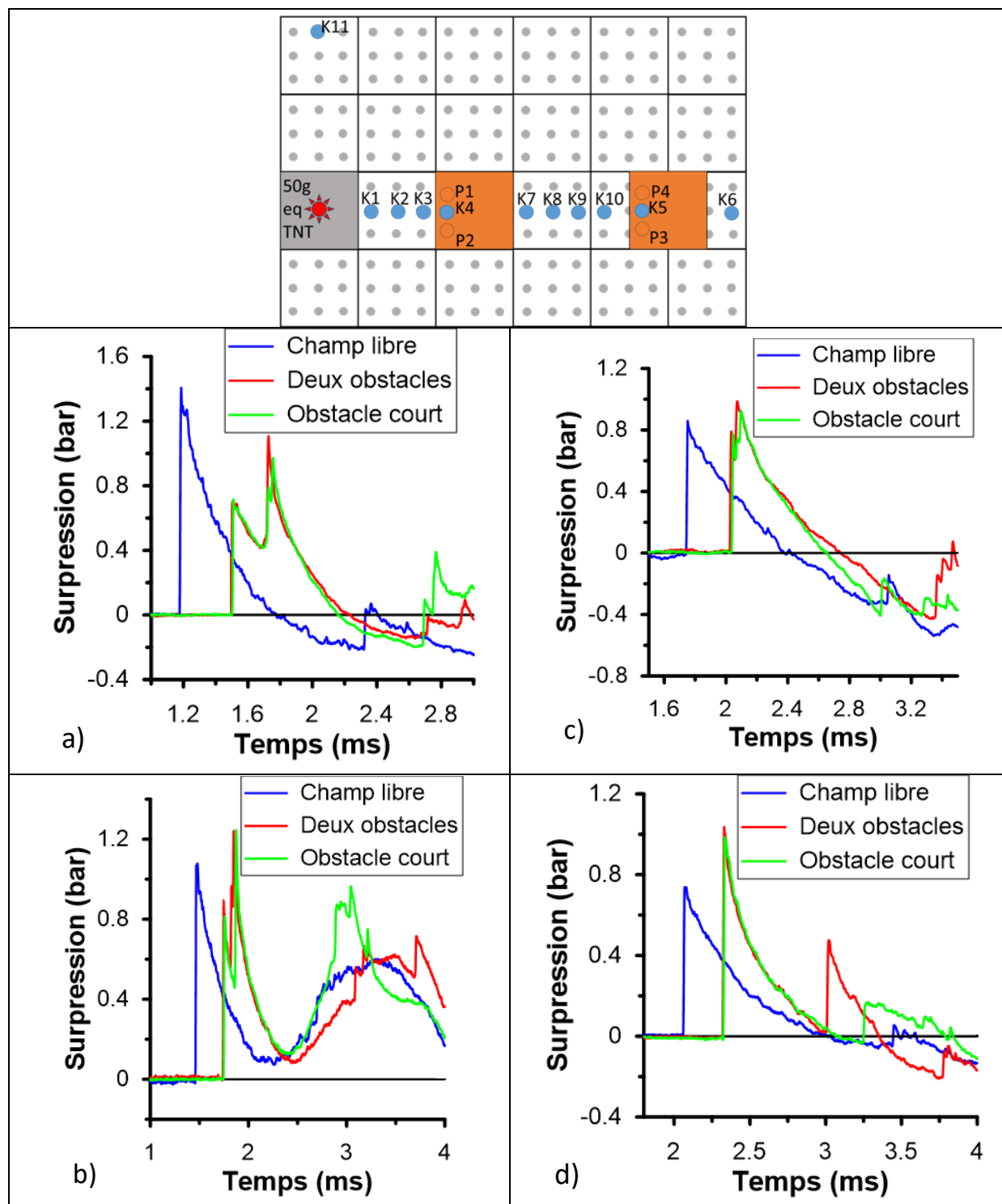


Figure 3-53 : Effet écran entre deux tronçons d'hémicylindre placés à 0,6 m et 1,6 m de la charge explosive à l'IRSN – capteur situé à a) 1,07 m (K7) b) 1,19 m (K8) c) 1,32 m (K9) d) 1,45 m (K10) de la charge.

Par ailleurs, les images de l'ISL ont permis d'observer la formation d'un pied de Mach derrière le tronçon d'hémicylindre, signalé en rouge sur la Figure 3-54. On observe également une seconde onde de souffle à l'arrière-plan (pointillés orange),

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

qui correspond probablement à l'onde ayant contourné l'hémicylindre. Ce pied de Mach apparaît vraisemblablement entre les capteurs K9 et K10 à l'IRSN, soit entre 1,33 et 1,47 m, ce qui est corroboré par les images de l'ISL, sur lesquelles il apparaît à partir de 2,76 m environ (Figure 3-55), soit 1,38 m à l'échelle réduite. La hauteur du pied de Mach évolue ensuite linéairement et celui-ci mesure entre 15 et 20 cm de haut au moment d'impacter le second tronçon d'hémicylindre. Cette trajectoire rectiligne correspond aux phénomènes observés par Kaca [108], et l'inclinaison de la trajectoire mesurée ici est de 16° , ce qui est proche de la valeur de 13° indiquée par Kaca ; par ailleurs, ce pied de Mach apparaît derrière l'hémicylindre à une distance environ égale à son diamètre, ce qui est également en adéquation avec les observations de l'auteur.

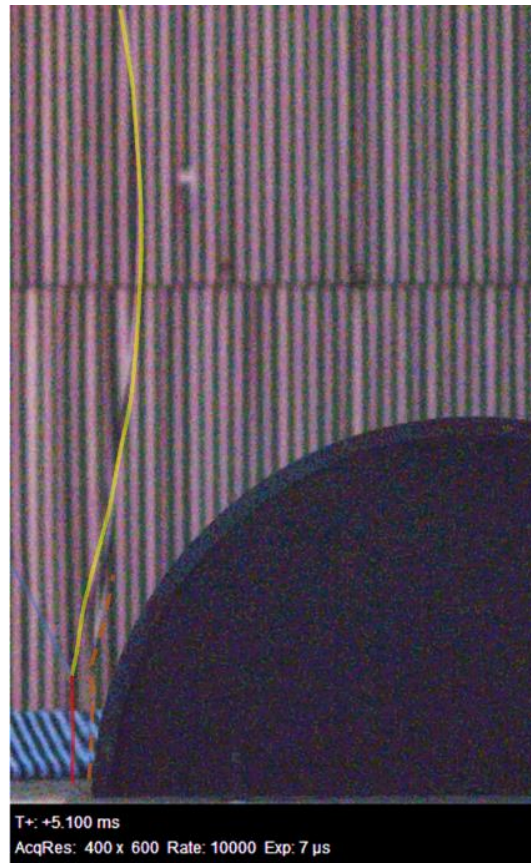


Figure 3-54 : Structure de l'onde de souffle impactant le second tronçon d'hémicylindre dans la configuration à deux tronçons successifs

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

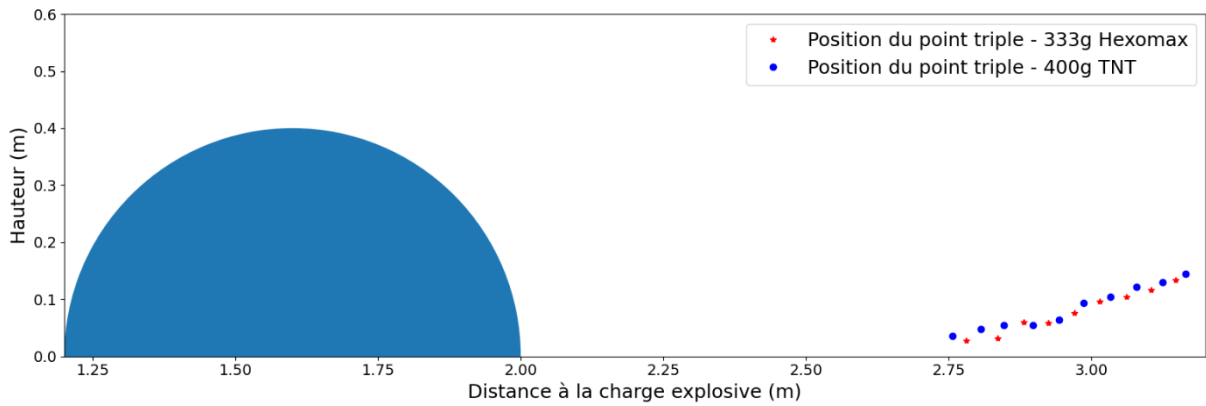
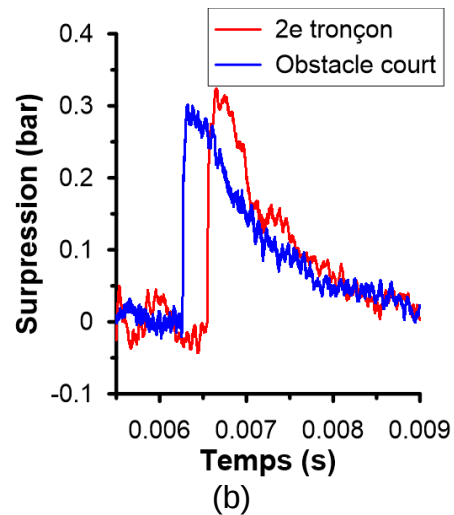
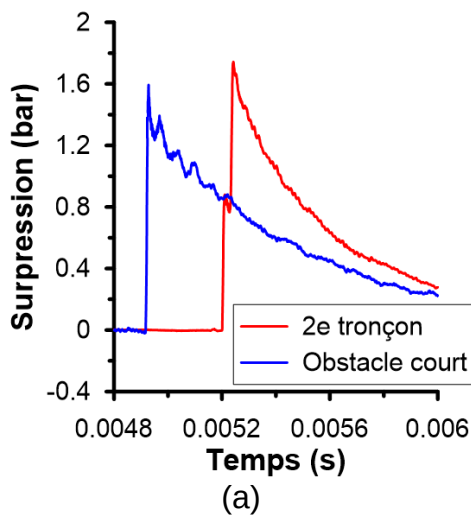


Figure 3-55 : Trajectoire du point triple naissant entre les deux tronçons d'hémicylindre.

Ce pied de Mach impacte le second tronçon d'hémicylindre, ce qui entraîne des profils de surpression présentant plusieurs pics sur la face avant de l'obstacle (Figure 3-56-a). Là aussi, si le premier pic de pression est inférieur à celui relevé sur un obstacle seul à la même distance, le second pic observé est 20 à 30% plus élevé que celui sans tronçon devant pour le capteur à 30°. Toutefois, pour la position à 60°, la pression maximale est inférieure à celle sur un obstacle seul. Le phénomène s'estompe au fil de la progression de l'onde et les profils observés sur la face arrière sont très proches de ceux obtenus avec un seul obstacle (Figure 3-56-b), avec notamment des surpressions identiques à celles relevées avec un obstacle unique (Figure 3-56-c).



3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

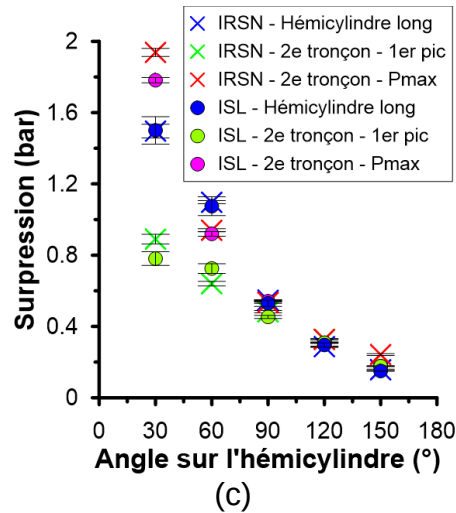


Figure 3-56 : Profils de surpression et valeurs de surpression mesurées à la surface du second tronçon d'hémicylindre.

On remarque également, dans la Figure 3-57, que les profils de pression obtenus derrière les deux tronçons successifs (Figure 3-53 - capteur K6) sont similaires à ceux obtenus avec un seul obstacle court, leur seule différence majeure étant un temps d'arrivée différent (le choc arrivant logiquement plus tard dans la configuration à deux tronçons). Ainsi, malgré l'effet engendré sur le choc par la présence du premier tronçon, avec notamment une surpression plus élevée qu'en champ libre au niveau du capteur K10, il semblerait que ce qui se passe derrière le second tronçon soit indépendant de la présence du premier obstacle (en termes de surpressions).

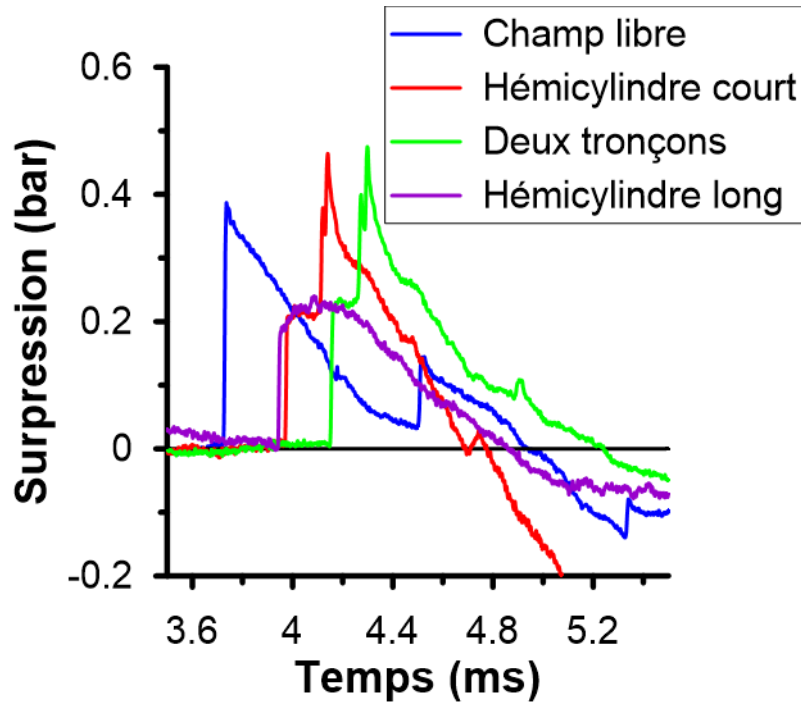


Figure 3-57 : Effet écran de deux tronçons court placés à 0,60 et 1,60 m

3.4.3 Contournement de l'obstacle

Durant les essais de l'IRSN, des capteurs ont également été placés de manière à étudier le contournement de l'obstacle par l'onde de souffle générée par la charge explosive. Dans la configuration avec un seul tronçon d'hémicylindre à 0,60 m, sept capteurs (capteurs K1 à K7) ont été placés autour de l'obstacle afin d'étudier le passage des différentes ondes ; dans celle avec l'obstacle à 1,60 m, huit capteurs se trouvent autour de l'hémicylindre (capteurs K2 à K7, K9 et K10). Enfin, dans la seconde configuration en champ libre, les capteurs étaient placés à des positions similaires à celles susmentionnées afin de comparer le comportement des ondes en champ libre et en présence de l'obstacle, comme illustré dans la Figure 3-58.

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

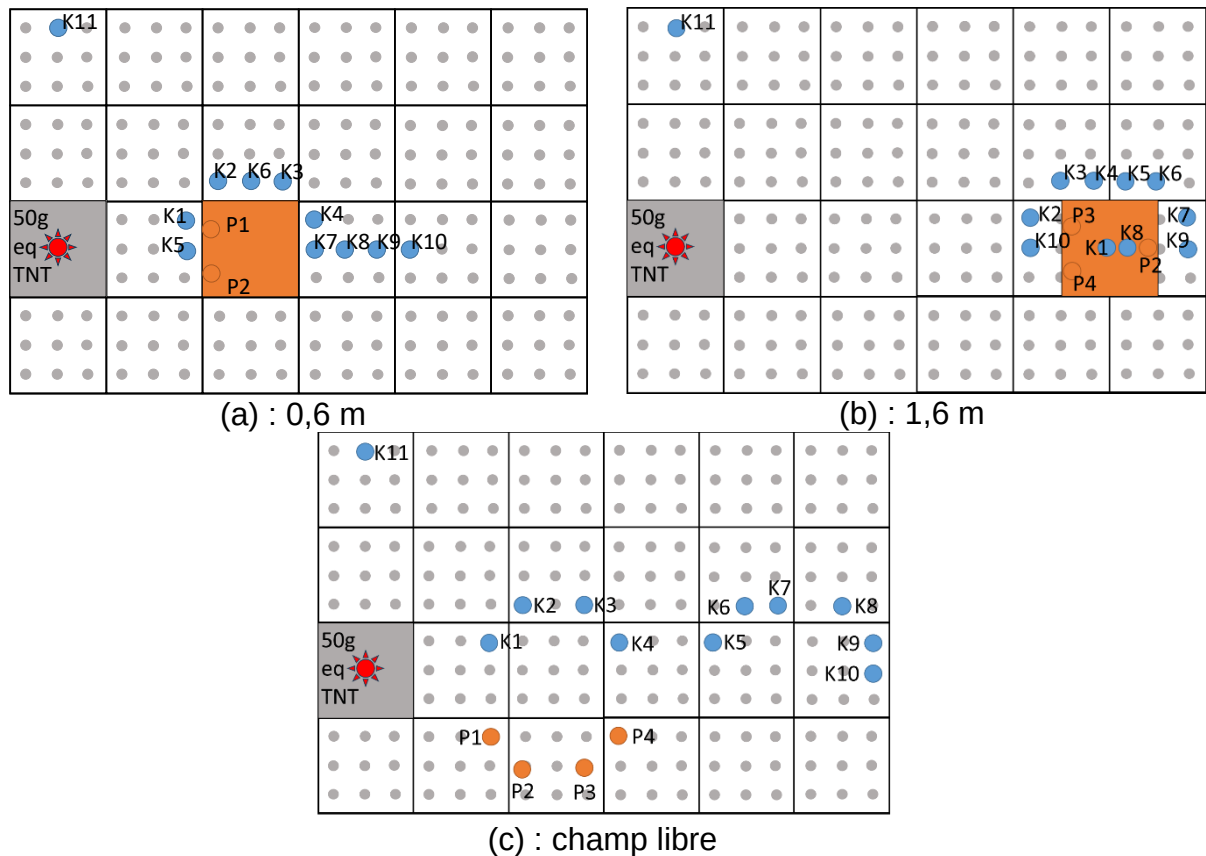


Figure 3-58 : Configurations expérimentales permettant d'étudier le contournement de l'obstacle - 0,60 m (a) - 1,60 m (b) - Champ libre (c).

Comme on peut le voir sur la Figure 3-59-a, le capteur K2 mesure des profils de pression comparables avec ou sans obstacle, en effet, il n'est pas masqué par la présence de ce dernier. Les écarts selon que l'obstacle soit présent ou pas ne sont que de 3,8% pour les surpressions mesurées, et 2,6% pour les temps d'arrivée ; ces valeurs sont même inférieures aux dispersions des séries de mesures étudiées. La différence principale vient des impulsions positives mesurées : l'impulsion en champ libre est en moyenne 11% supérieure à celle relevée autour de l'obstacle, malgré des profils de surpression qui paraissent similaires. Au niveau du capteur K4 (Figure 3-59-b), on note la présence de deux pics de surpression, comme observé plus haut sur le capteur K7. L'écart de temps d'arrivée entre le champ libre et cette configuration est de 22%, et l'écart en surpression est de -15% pour le maximum de surpression (ou -71% pour le premier pic). Toutefois, la différence d'impulsion est de seulement -4,6%.

On note donc que la surpression mesurée autour de l'hémicylindre est en tout point inférieure (ou égale) à celle relevée en champ libre pour les mêmes positions, confirmant un effet atténuateur (plus ou moins marqué) à proximité de l'obstacle. Il

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

convient cependant de noter que les marges d'erreur pour ces résultats sont relativement larges. La pression autour de l'hémicylindre semble par ailleurs suivre deux tendances suivant la position des capteurs : une première pour les capteurs K5 à K6, puis une seconde de K6 à K7, comme illustré sur la Figure 3-59-c et -d.

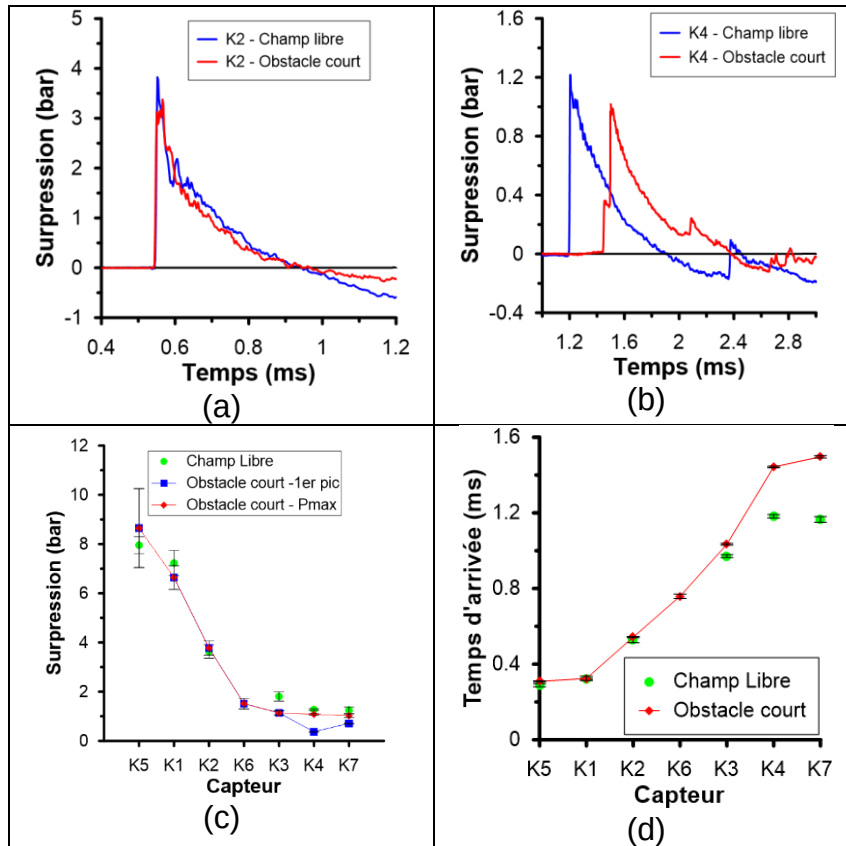


Figure 3-59 : Évolution de la pression autour de l'hémicylindre à 0,60 m.

Dans la configuration avec l'hémicylindre à 1,60 m, la même observation peut être faite pour les capteurs situés en aval de l'hémicylindre, avec une surpression similaire à celle en champ libre (Figure 3-60 – bas gauche). La surpression plus élevée relevée par le capteur K5 (champ libre) par rapport à K2 (avec obstacle) est probablement due à un problème d'*overshoot* du capteur ; en dehors de ce premier pic, les profils de décroissance sont similaires jusqu'à l'arrivée du choc réfléchi sur le capteur K2. Le capteur K3 présente les mêmes problèmes de mesure que dans la configuration à 0,60 m, rendant uniquement possible l'analyse du premier pic de surpression en cette position. Encore une fois, les mesures de pression réalisées sur le côté et à l'avant de l'hémicylindre présentent des résultats similaires à ceux relevés en champ libre (capteurs K10 et K2 à K5). On note toutefois un déficit d'impulsion

3.4 Interaction avec un ou plusieurs obstacles hémicylindriques courts

positive au niveau du capteur K4 (-29%) en présence de l'hémicylindre. La première différence majeure est observée au niveau du capteur K6, où on observe deux pics de surpression au lieu d'un simple, avec un déficit de surpression de 27%, malgré des temps d'arrivée identiques dans les deux configurations ; cela se traduit également par une impulsion positive inférieure de 19% à celle mesurée en champ libre.

On retrouve donc ici le même comportement qu'à 0,60 m, avec une surpression autour de l'hémicylindre court probablement inférieure ou égale à celle relevée en champ libre (les erreurs de mesure des capteurs K5 et K3 pourraient changer ce diagnostic localement). Les temps d'arrivée de l'onde de souffle sont par ailleurs identiques à ceux en champ libre pour tous les capteurs placés en amont et sur le côté de l'hémicylindre (Figure 3-60 – bas droit). La première différence observée, au niveau du capteur K7-K4, est une perte d'impulsion positive, malgré une surpression et un temps d'arrivée équivalents. Puis, au niveau du capteur K8-K6, les signaux de pression enregistrés présentent deux pics de surpression d'amplitude égale mais inférieure à celle relevée en champ libre, leur origine restant encore à déterminer.

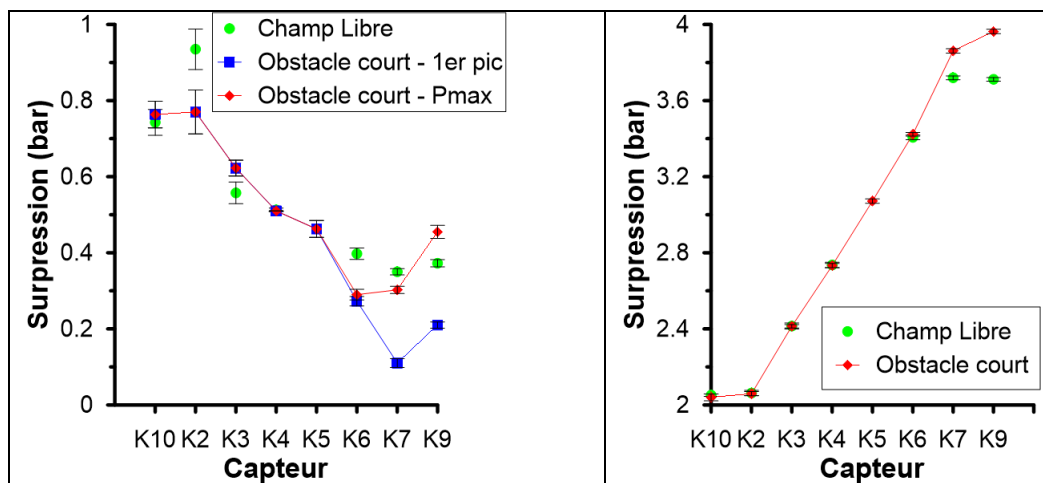


Figure 3-60 : Évolution de la pression autour de l'hémicylindre à 1,60 m.

En conclusion, il apparaît que la longueur de l'obstacle n'a que peu d'influence sur le chargement qu'il subit lors du passage d'une onde de souffle. La seule différence notable est relevée en aval, où la surpression peut dépasser celle rencontrée en champ libre à cause de la recombinaison des ondes contournant l'hémicylindre et de celle le surpassant. Par ailleurs, un obstacle court n'a que peu d'influence sur les ondes le contournant. Un deuxième obstacle placé derrière observe une augmentation

3 Interaction d'une onde de souffle avec une structure hémicylindrique

de la pression sur la partie basse de sa face avant par rapport au cas où il est seul, mais la surpression à sa surface est partout ailleurs inférieure ou égale à celle rencontrée dans cette situation.

Conclusion

Au cours des trois années de cette thèse, Beyrouth a été dévastée par l'explosion de son port, le pont de Crimée a été détruit par l'explosion d'un camion piégé, et une série d'explosions a eu lieu à la poudrerie de Bergerac. Ces événements, à l'origine d'important dommages aux personnes et aux structures, rappellent l'importance de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors d'une explosion et de développer des moyens d'évaluation de leurs effets afin de s'en prémunir. C'est cet objectif qui a été le moteur des travaux de cette thèse, dont le but était d'étudier l'interaction entre l'onde de souffle générée par un explosif plastique et un obstacle hémicylindrique.

Dans un premier temps, l'étude bibliographique a rappelé les lois physiques décrivant la propagation d'une onde de choc et les propriétés des ondes de souffle. Les moyens de métrologie applicables afin de mesurer les caractéristiques de ces ondes ont également été présentés, ainsi que le principe de similitude suivi pour concevoir les dispositifs expérimentaux, à deux échelles, déployés dans le cadre des essais de cette thèse. Par la suite, l'interaction entre une onde de choc et une structure a été développée, d'abord dans le cas d'une surface plane puis d'une structure convexe. Si les phénomènes gouvernant le premier cas (coefficients de réflexion, critères de transition entre régimes de réflexion...) sont connus et bien décrits par la littérature, il n'en est pas de même pour les surfaces convexes. Ainsi, des études menées en tube à choc ont permis de mettre en lumière les différents régimes de réflexion d'ondes planes ayant lieu à la surface d'obstacles convexes et de proposer des critères de transition d'un régime à un autre, mais peu d'approches permettent de déterminer l'évolution d'une onde tridimensionnelle autour d'un tel obstacle. Un modèle a toutefois été proposé par Trélat *et al.* [123], qui permet de déterminer la surpression sur la face arrière d'un obstacle hémicylindrique soumis à une onde de souffle générée par un explosif plastique.

La deuxième partie de ce mémoire décrit les installations expérimentales, à deux échelles, utilisées à l'IRSN et l'ISL. L'IRSN possède ainsi d'une table à détonation conçue dans les années 2000 afin de réaliser des essais de détonation d'explosifs en champ libre ou en présence d'obstacles, tandis que l'ISL dispose d'une dalle en béton dédiée aux essais de souffle sur son pas de tir. Cette dalle a été adaptée suivant le

principe de similitude décrit dans la partie bibliographique afin de réaliser des expériences de détonation à une échelle double de celle de l'IRSN. Dans les deux installations, des charges d'explosif plastique (Hexomax®) ont été utilisées, et les caractéristiques des ondes de souffle générées ont été mesurées à l'aide de capteurs piézo-électriques et piézorésistifs, leur propagation ayant aussi pu être suivie à l'ISL grâce à une caméra rapide. Des configurations mettant en œuvre un obstacle hémicylindrique long, court ou deux tronçons courts consécutifs ont été étudiées. La méthodologie de calcul des incertitudes expérimentales utilisée pour traiter les résultats de mesures obtenus lors de ces essais est également exposée, et un algorithme Python développé pour traiter les images issues de la caméra, développé au cours de ce travail, est présenté.

Enfin, la troisième et dernière partie présente les résultats des essais réalisés tout au long de ces travaux de thèse. Dans un premier temps, ceux obtenus en champ libre sont analysés : ils permettent de caractériser la répétabilité et la reproductibilité des essais, et de comparer les valeurs mesurées à des valeurs issues de la littérature afin de déterminer l'applicabilité de ces derniers à nos conditions expérimentales. Cette analyse a permis de montrer que les dispersions de nos mesures étaient très faibles, de vérifier que les méthodes de la littérature estiment des propriétés très proches de celle mesurées. Par ailleurs, ces essais ont confirmé la difficulté des capteurs piézorésistifs à mesurer les surpressions maximales en champ proche : bien que les temps d'arrivée relevés soient similaires à ceux des capteurs piézo-électriques, les surpressions maximales sont très inférieures, jusqu'à -60%, et ce pour des distances réduites inférieures à $1,46 \text{ m.kg}^{-1/3}$. Cependant, cette différence diminue avec la distance. Cet écart entre les deux technologies se retrouve également à la surface des obstacles hémicylindriques, et diminue quand l'angle d'observation à la surface de l'hémicylindre augmente. Les signaux enregistrés par les deux types de capteurs sont par ailleurs similaires sur la face arrière des obstacles. L'intérêt des capteurs piézorésistifs réside dans leur moindre sensibilité aux éventuelles vibrations de la structure en raison de leur plus faible fréquence naturelle.

Les images de la propagation d'ondes de souffle autour d'un hémicylindre obtenues grâce à l'imagerie rapide ont permis d'établir que le point triple apparu suite à la transition en réflexion de Mach singulier suit une trajectoire rectiligne au-dessus de l'obstacle, et ce indépendamment du nombre de Mach de l'onde de souffle incidente

et de son rayon de courbure. Des modèles prédisant cette trajectoire en fonction de la distance de l'obstacle à la charge explosive ont pu être établis. Nous avons pu montrer que l'angle formé par cette trajectoire avec le sol diminue avec la diminution du nombre de Mach, et tend vers la valeur mesurée par Kaca [108]. Par ailleurs, les images obtenues n'ont pas permis d'observer les phénomènes de réflexion de Mach transitoire ou double décrits par Ben Dor [97], probablement à cause des nombres de Mach trop faibles obtenus [117] ou d'une cadence d'images trop lente pour les percevoir.

Les signaux enregistrés par les capteurs placés à la surface des obstacles ont permis d'établir des modèles décrivant l'évolution du temps d'arrivée et de la surpression maximale derrière l'onde de souffle en fonction de l'angle autour de l'hémicylindre. Ces résultats ont également été comparés au modèle S développé par Trélat *et al.* [123] ce qui a permis de vérifier son applicabilité d'une part pour des distances réduites équivalentes et d'autre part pour une échelle double.

En plus de l'étude de l'atténuation d'un hémicylindre long, l'influence de la longueur de l'hémicylindre sur cette dernière a aussi été investiguée pour un hémicylindre plus court. Ces essais ont montré que la zone de réduction de pression derrière un tel obstacle était très réduite, inférieure à la moitié de son rayon, la surpression maximale en aval dépassant largement celle relevée en champ libre (jusqu'à +40%). Par ailleurs, un pied de Mach apparaît derrière l'hémicylindre à partir d'une distance environ égale à son diamètre, dont le point triple suit ici aussi une trajectoire rectiligne similaire à celle observée par Kaca [108]. Ce travail montre que l'obstacle court n'a que peu d'influence sur l'onde de souffle le contournant.

Ainsi, ces trois années de thèse ont permis d'enrichir les bases de données avec de nouvelles expériences, documentées incluant les analyses des incertitudes. L'applicabilité du modèle S [123] a pu être vérifiée avec ces nouvelles données.

À l'issue de ces travaux, de nouvelles pistes sont identifiées afin d'améliorer d'une part les diagnostics associés aux installations et d'autre part étendre le domaine ciblé à des géométries et des conditions de génération d'ondes de souffle différentes. Deux axes sont identifiés : (i) perspectives générales indépendantes de l'installation et (ii) perspectives d'amélioration des installations expérimentales.

Pour le premier axe, afin d'enrichir les bases de données de nouvelles caractéristiques, des expériences pourront être réalisées avec des obstacles de forme différente, en faisant varier le diamètre et la longueur. Ces nouvelles configurations permettront d'étudier notamment l'influence de ces paramètres sur la trajectoire du point triple et l'évolution des caractéristiques de l'onde de souffle à la surface de l'obstacle. Ces nouvelles données serviront à vérifier la possibilité d'étendre le domaine de validité des modèles établis dans la thèse ici présentée. Dans la continuité de ces études d'obstacles indéformables, on pourrait s'intéresser aux obstacles déformables afin d'évaluer l'impact des interactions fluides-structures sur les chargements en pression et disposer ainsi d'une méthode d'analyse des moyens de mitigation.

L'applicabilité du modèle S développé par Trélat *et al.* [123], et son éventuelle extrapolation en dehors du domaine de validation actuel, pourraient être vérifiés avec les données de la littérature si ces dernières sont suffisamment documentées, mais aussi avec des essais impliquant une charge explosive hémisphérique dans un premier temps, puis un hémicylindre de diamètre inférieur dans un second temps (campagne d'essai réalisée sur la table à échelle réduite en septembre 2023).

Enfin, il serait intéressant de réaliser des détonations de charges explosives d'autres natures avec des caractéristiques de détonation différentes (non-idéales) afin d'estimer leur interaction avec un obstacle rigide et vérifier la déviation, si elle existe, du modèle S et d'avoir ainsi une quantification de son applicabilité à ces termes sources.

Un deuxième axe de perspectives concerne l'amélioration des installations expérimentales.

Ainsi, pour les essais effectués à l'IRSN, l'ajout d'une sonde effilée aux dispositifs de mesures permettrait de caractériser simultanément l'onde de souffle en champ libre et celle autour de l'obstacle. Cet ajout permettrait ainsi de ne plus réaliser d'essais spécifiques, sans obstacle, et donc de s'affranchir de la variabilité inhérente à la détonation de la charge elle-même. Certains capteurs, importants lors des analyses, sont situés trop proches du bord, aussi un agrandissement latéral de la table permettrait de diminuer les artéfacts de bord sur les profils de pression et ainsi améliorer la mesure de l'impulsion positive. Le couplage avec un système de visualisation rapide, de type Schlieren, permettrait l'analyse de la propagation de

l'onde de souffle, de son interaction avec l'obstacle et de suivre ainsi la formation du pied de Mach et de la diffraction de l'onde. Enfin, l'analyse des profils temporels de pression des deux technologies de capteurs, piézo-électriques et piézorésistifs, mériterait d'être réalisée dans deux configurations différentes. Par exemple lors d'une sollicitation par :

- onde de choc plane non-réactive afin de comparer les temps de réponse et les mesures de surpression en fonction du temps,
- onde de choc réactive afin de déterminer la réponse de ces derniers en présence d'un transfert radiatif,
- onde de détente afin de mieux comprendre la différence dans la zone de décroissance du profil.

Concernant l'installation de l'ISL, le diagnostic d'imagerie rapide associé au rail de capteurs de pression a permis d'analyser la propagation de l'onde de souffle et son interaction avec l'obstacle. Ce diagnostic a ainsi permis de visualiser d'une part la formation du pied de Mach et d'autre part de caractériser la trajectoire du point triple. L'acquisition d'un système de visualisation plus résolu temporellement et spatialement permettrait d'analyser plus finement la transition de la réflexion régulière à la réflexion irrégulière sur la face avant de l'hémicylindre. Concernant l'amélioration de la mesure de la pression, l'hémicylindre étant métallique, des vibrations sont transmises aux capteurs de pression, qui dans certaines conditions induisent un bruit rendant difficile la mesure de la pression avec une bonne précision. L'équipement de la surface du cylindre d'une couronne en bois, sur une couche absorbant les vibrations permettrait sans doute d'améliorer la mesure. Cependant, cette proposition mérite une vérification afin de s'assurer que cela n'induit pas un comportement complètement différent (absorbeur).

Bibliographie

- [1] Telmedia, « Catastrophe de Courrières - Anniversaires - Anniversaires - Découvrir », Archives - Pas-de-Calais le Département. [En ligne]. Disponible sur: <https://archivespasdecalais.fr/Decouvrir/Anniversaires/Anniversaires/Catastrophe-de-Courrieres>
- [2] « Historique de la butte de Vauquois », Butte de Vauquois. [En ligne]. Disponible sur: <https://butte-vauquois.fr/histoire-de-vauquois/>
- [3] B. Hopkinson, « British Ordnance Board Minutes 13565 », The National Archives (Kew, UK), 1915.
- [4] « LES EFFETS DESTRUCTEURS DE LA BOMBE ATOMIQUE », *Le Monde.fr*, 10 août 1945. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/archives/article/1945/08/10/les-effets-destructeurs-de-la-bombe-atomique_1860260_1819218.html
- [5] IRSN, « Accident à la centrale nucléaire de Three Mile Island (Etats-Unis) en 1979 > Le déroulement de l'accident ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/deroulement-laccident-0>
- [6] « Explosion d'un stock de nitrate d'ammonium dans une usine d'engrais », La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques. [En ligne]. Disponible sur: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/21329-2/
- [7] « Une du jour. Trois ans après l'explosion à Beyrouth, toujours “aucun procès en vue” », *Courrier international*, 4 août 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.courrierinternational.com/une/une-du-jour-trois-ans-apres-l-explosion-a-beyrouth-toujours-aucun-proces-en-vue>
- [8] « Guerre en Ukraine : Kiev revendique l'attaque d'un dépôt de munitions en Crimée », *Le Figaro*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lefigaro.fr/international/guerre-en-ukraine-explosion-d-un-depot-de-munitions-en-crimee-20230722>
- [9] « En Ouzbékistan, une explosion près de l'aéroport de la capitale fait un mort et plus de 160 blessés », *Le Monde.fr*, 28 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur:

https://www.lemonde.fr/international/article/2023/09/28/en-ouzbekistan-une-explosion-pres-de-l-aeroport-de-la-capitale-fait-un-mort-et-plus-de-160-blesses_6191385_3210.html

- [10] « En Turquie, l'attentat-suicide à Ankara est revendiqué par le Parti des travailleurs du Kurdistan », *Le Monde.fr*, 1 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/international/article/2023/10/01/turquie-attentat-a-la-bombe-dans-la-capitale-ankara-pres-du-parlement_6191859_3210.html
- [11] IRSN, « Le logiciel P²REMICS ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/recherche/logiciel-p2remics>
- [12] G. F. Kinney et K. J. Graham, *Explosive Shocks in Air*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985. doi: 10.1007/978-3-642-86682-1.
- [13] R. A. Strehlow et W. E. Baker, « The characterization and evaluation of accidental explosions », *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 2, n° 1, p. 27-60, janv. 1976, doi: 10.1016/0360-1285(76)90007-1.
- [14] « Les phénomènes dangereux accidentels | Ineris ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ineris.fr/fr/risques/comment-evaluer-risque/evaluer-risque-accidentel/phenomenes-dangereux-accidentels>
- [15] G. Tomasovitch, « En juillet, une explosion sur le même réseau », *leparisien.fr*, 15 novembre 2000. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.leparisien.fr/archives/en-juillet-une-explosion-sur-le-meme-reseau-16-11-2000-2001765006.php>
- [16] « Rupture d'une canalisation de chauffage urbain », ARIA - La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/18195/>
- [17] F. Arago, « Ueber die Explosionen der Dampfmaschinen », *Annalen der Physik*, vol. 94, n° 2, p. 287-315, 1830.
- [18] G. B. Airy, « On the numerical expression of the destructive energy in the explosions of steam-boilers, and on its comparison with the destructive energy of gunpowder », *Journal of the Franklin Institute*, vol. 77, n° 4, p. 244-250, 1863.
- [19] « Los Alfaques : le camping de l'enfer », *Affaires Sensibles*, France Inter, 23 septembre 2019. [En ligne]. Disponible sur:

<https://www.radiofrance.fr/franceinter/podcasts/affaires-sensibles/los-alfaques-le-camping-de-l-enfer-1917998>

- [20] « Explosion rue de Trévis à Paris. Les images de l'intervention des pompiers dans les décombres », *Ouest-France.fr*, 13 janvier 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ouest-france.fr/ile-de-france/paris-75000/explosion-rue-de-trevis-paris-les-images-de-l-intervention-des-pompiers-dans-les-decombres-6169587>
- [21] « Explosion de gaz en plein cœur de Paris », ARIA - La référence du retour d'expérience sur accidents technologiques. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/53006/>
- [22] « Dozens dead and thousands injured in Beirut blast », *BBC News*, 4 août 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-53656220>
- [23] IRSN, « Accident de Fukushima Daiichi (Japon - 2011) - Impact du séisme et du tsunami sur la centrale nucléaire de Fukushima-Daiichi ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/crise/impact-seisme-tsunami-sur-centrale-nucleaire-fukushima-daiichi>
- [24] J. Daubech, C. Proust, D. Jamois, et E. Leprette, « Dynamics of vented hydrogen-air deflagrations », présenté à International Conference on Hydrogen Safety (ICHHS 2011), 2011. [En ligne]. Disponible sur: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Dynamics%20of%20vented%20hydrogen-air%20deflagrations&publication_year=2011&author=J.%20Daubech&author=C.%20Proust&author=D.%20Jamois&author=E.%20Leprette
- [25] J. Daubech, C. Proust, O. Gentilhomme, D. Jamois, et M. Ichard, « Hydrogen-air Vented Explosions- New Experimental Data », sept. 2013, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.h2knowledgecentre.com/content/conference686>
- [26] Ch. Proust, « A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19, n° 2, p. 104-120, mars 2006, doi: 10.1016/j.jlp.2005.06.035.

- [27] O. Dufaud, A. Vignes, F. Henry, L. Perrin, et J. Bouillard, « Ignition and explosion of nanopowders: something new under the dust », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 304, n° 1, p. 012076, juill. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/304/1/012076.
- [28] ARIA/BARPI, « Accidentologie ARIA/BARPI - Silos à sucre.pdf ». Rubrique ICPE 2160, 2017.
- [29] U.S. CHEMICAL SAFETY AND HAZARD INVESTIGATION BOARD, « Aluminum dust explosion », Hayes Lemmerz International, Inc, Huntington, Indiana, Investigation Report, sept. 2005.
- [30] S. Glasstone et P. J. Dolan, « The Effects of Nuclear Weapons. Third edition », TID-28061, 6852629, janv. 1977. doi: 10.2172/6852629.
- [31] A. Tugnoli, M. F. Milazzo, G. Landucci, V. Cozzani, et G. Maschio, « Assessment of the hazard due to fragment projection: A case study », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 28, p. 36-46, avr. 2014, doi: 10.1016/j.jlp.2013.08.015.
- [32] J. Akhavan, *The chemistry of explosives*, 2nd ed. in RSC paperbacks. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 2004.
- [33] Ya. B. Zel'dovich, « On the theory of the propagation of detonations on gaseous system », *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 10, p. 542-568, 1940.
- [34] J. Von Neumann, *Theory of detonation waves. Progress Report to the National Defense Research Committee Div. B, OSRD-549*, vol. 6. in John von Neumann: Collected Works, 1903-1957, vol. 6. New York: Pergamon Press.
- [35] W. Döring, « Über den Detonationsvorgang in Gasen », *Annalen der Physik*, vol. 435, n° 6-7, p. 421-436, 1943, doi: 10.1002/andp.19434350605.
- [36] D. L. Chapman, « VI. On the rate of explosion in gases », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 47, n° 284, p. 90-104, janv. 1899, doi: 10.1080/14786449908621243.
- [37] J. C. É. Jouguet, « Sur la propagation des réactions chimiques dans les gaz », *Journal des Mathématiques Pures et Appliquées*, vol. 1, p. 347-425, 1905.

- [38] J. D. Van Der Woerd, M. Wagner, A. Pietzsch, M. Andrae, et N. Gebbeken, « Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review », *Glass Struct Eng*, vol. 7, n° 4, p. 693-710, déc. 2022, doi: 10.1007/s40940-022-00213-w.
- [39] F. Volk et F. Schedlbauer, « Analysis of Post Detonation Products of Different Explosive Charges », *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 24, n° 3, p. 182-188, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1521-4087(199906)24:03<182::AID-PREP182>3.0.CO;2-G.
- [40] P. Cooper et P. W. Cooper, *Explosives engineering*. New York Weinheim: Wiley-VCH, 1997.
- [41] R. Matyáš et J. Pachman, *Primary Explosives*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-28436-6.
- [42] PacSi EMC, « BNCP ». [En ligne]. Disponible sur: <https://psemc.com/products/bncp/>
- [43] « EUR-Lex - 02006R1907-20140410 - EN - EUR-Lex ». [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2006/1907/2014-04-10>
- [44] « EBW Detonators », Teledyne Defense Electronics. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.teledynedefenseelectronics.com/energetics/products/Pages/EBW%20Detonators.aspx>
- [45] S. Delbarre, L. Courty, M. William-Louis, et P. Gillard, « Laser Ignition of Two Low-Vulnerability RDX-Based Gun Propellants: Influence of the Atmosphere on Ignition and Combustion Properties », *Combustion Science and Technology*, vol. 195, n° 7, p. 1450-1460, mai 2023, doi: 10.1080/00102202.2023.2182195.
- [46] N. k. Bourne, « On the laser ignition and initiation of explosives », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 457, n° 2010, p. 1401-1426, juin 2001, doi: 10.1098/rspa.2000.0721.
- [47] J. R. Stroud et D. L. Ornellas, « Flying-plate detonator using a high-density high explosive », US4788913A, 6 décembre 1988 [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US4788913A/en>

- [48] M. Boustie, J. P. Cuq Lelandais, L. Berthe, et R. Ecault, « Laser shocks: A tool for experimental simulation of damage into materials », *AIP Conference Proceedings*, vol. 1464, n° 1, p. 310-316, juill. 2012, doi: 10.1063/1.4739884.
- [49] J. Quinchon, J. Boisson, et B. Hueber, *Les Explosifs*, 2e éd. revue, Augmentée et mise À jour. in Les Poudres, propergols et explosifs, no. 1. Paris: Technique et documentation - Lavoisier, 1987.
- [50] G. F. Henning, « Process for making a nitro compound from hexamethylenetetramine », 104280
- [51] T. Urbański, *Chemistry and technology of explosives. Vol. 3*. Pergamon; PWN, 1967.
- [52] L. Borne, J. Mory, et F. Schlessler, « Reduced Sensitivity RDX (RS-RDX) in Pressed Formulations: Respective Effects of Intra-Granular Pores, Extra-Granular Pores and Pore Sizes », *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, vol. 33, n° 1, p. 37-43, 2008, doi: 10.1002/prop.200800206.
- [53] R. Meyer, J. Köhler, et A. Homburg, *Explosives*, 6th, completely rev. ed éd. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [54] P. O. K. Krehl, *History of shock waves, explosions and impact: a chronological and biographical reference*. Berlin: Springer, 2009.
- [55] « Primacord® - Cordeau Détonant », Enaex Africa. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.enaex.com/af/fr/primacord-2/>
- [56] H. I. Russek, « The therapeutic role of coronary vasodilators: glyceryl trinitrate, isosorbide dinitrate, and pentaerythritol tetranitrate », *American Journal of Medical Science*, vol. 252, n° 1, p. 9-20, juill. 1966, doi: 10.1097/00000441-196607000-00002.
- [57] J. Wilbrand, « Notiz über Trinitrotoluol », *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, vol. 128, n° 2, p. 178-179, 1863, doi: 10.1002/jlac.18631280206.
- [58] J. W. Kury, R. D. Breithaupt, et C. M. Tarver, « Detonation waves in trinitrotoluene », *Shock Waves*, vol. 9, n° 4, p. 227-237, août 1999, doi: 10.1007/s001930050160.

- [59] P. Locking, « THE TROUBLE WITH TNT EQUIVALENCE », présenté à 26th International Symposium on Ballistics, E. Baker et D. Templeton, Éd., Miami, Florida: DESTECH PUBLICATIONS, INC, sept. 2011, p. 143-154.
- [60] M. Held, « TNT — Equivalent », *Propellants Explos. Pyrotech.*, vol. 8, n° 5, p. 158-167, oct. 1983, doi: 10.1002/prop.19830080507.
- [61] B. M. Dobratz, « LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosives and explosive simulants », Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), UCRL-52997, mars 1981. doi: 10.2172/6530310.
- [62] R. Panowicz, M. Konarzewski, et M. Trypolin, « Analysis of Criteria for Determining a TNT Equivalent », *SV-JME*, vol. 63, n° 11, nov. 2017, doi: 10.5545/sv-jme.2016.4230.
- [63] Unified Facilities Criteria (UFC), « Structures to Resist the effects of accidental explosions », Department of Defense, UFC 3-340-02, 2008.
- [64] J. L. Maienschein, « Estimating Equivalency of Explosives Through A Thermochemical Approach », Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), UCRL-JC-147683, juill. 2002. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.osti.gov/biblio/15002352>
- [65] I. Sochet, « Blast effects of external explosions ».
- [66] S. A. Formby et R. K. Wharton, « Blast characteristics and TNT equivalence values for some commercial explosives detonated at ground level », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 50, n° 2, p. 183-198, oct. 1996, doi: 10.1016/0304-3894(96)01791-8.
- [67] H. Kleine, J. M. Dewey, K. Ohashi, T. Mizukaki, et K. Takayama, « Studies of the TNT equivalence of silver azide charges », *Shock Waves*, vol. 13, n° 2, p. 123-138, sept. 2003, doi: 10.1007/s00193-003-0204-3.
- [68] R. K. Wharton, S. A. Formby, et R. Merrifield, « Airblast TNT equivalence for a range of commercial blasting explosives », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 79, n° 1, p. 31-39, déc. 2000, doi: 10.1016/S0304-3894(00)00168-0.

- [69] L. S. Lebel, P. Brousseau, L. Erhardt, et W. S. Andrews, « Measurements of the Temperature Inside an Explosive Fireball », *Journal of Applied Mechanics*, vol. 80, n° 031702, avr. 2013, doi: 10.1115/1.4023561.
- [70] P. J. Rae et J. M. McAfee, « The Blast Parameters Spanning the Fireball from Large Hemispherical Detonations of C-4 », *Prop., Explos., Pyrotech.*, vol. 43, n° 7, p. 694-702, juill. 2018, doi: 10.1002/prop.201800071.
- [71] D. R. Richardson, S. P. Kearney, et D. R. Guildenbecher, « Post-detonation fireball thermometry via femtosecond-picosecond coherent anti-Stokes Raman Scattering (CARS) », *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 38, n° 1, p. 1657-1664, janv. 2021, doi: 10.1016/j.proci.2020.06.257.
- [72] P.-L. Caron, B. Le Borgne, et C. Renault, « Double explosion à Beyrouth : regardez comment l'onde de choc a été ressentie dans tout le Liban », *Franceinfo*, 7 août 2020. [En ligne]. Disponible sur: https://www.francetvinfo.fr/monde/proche-orient/liban/explosions-a-beyrouth/video-double-explosion-a-beyrouth-regardez-comment-l-onde-de-choc-a-ete-ressentie-dans-tout-le-pays_4068731.html
- [73] « Le ministre de la Culture classe les silos du port de Beyrouth parmi les monuments historiques », *L'Orient-Le Jour*, 18 mars 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lorientlejour.com/article/1294098/le-ministre-de-la-culture-classe-les-silos-de-ble-parmi-les-monuments-historiques-malgre-une-decision-de-les-detruire.html>
- [74] W. J. M. Rankine, « XV. On the thermodynamic theory of waves of finite longitudinal disturbance », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 160, p. 277-288, janv. 1997, doi: 10.1098/rstl.1870.0015.
- [75] P.-H. Hugoniot, « Mémoire sur la propagation des mouvements dans les corps et spécialement dans les gaz parfaits (deuxième partie) », *Journal de l'école Polytechnique*, vol. 58, p. 1-125, 1889.
- [76] C. E. Needham, *Blast Waves*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-05288-0.
- [77] G. Taylor, « The Formation of a Blast Wave by a Very Intense Explosion. I. Theoretical Discussion », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 201, n° 1065, p. 159-174, 1950.

- [78] F. Friedlander, « The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane », *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 186, n° 1006, p. 322-344, sept. 1946, doi: 10.1098/rspa.1946.0046.
- [79] C. Proust, L. Heudier, et K. Vilalta, « Long distance propagation of shock waves in the open atmosphere », présenté à 25. International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (ICDERS), août 2015. Consulté le: 22 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://ineris.hal.science/ineris-01855088>
- [80] G. G. Bach et J. H. S. Lee, « An analytical solution for blast waves », *AIAA Journal*, vol. 8, n° 2, p. 271-275, févr. 1970, doi: 10.2514/3.5655.
- [81] A. Sakurai, « On the Propagation and Structure of the Blast Wave, I », *J. Phys. Soc. Jpn.*, vol. 8, n° 5, p. 662-669, sept. 1953, doi: 10.1143/JPSJ.8.662.
- [82] T. A. Rose et P. D. Smith, « Influence of the principal geometrical parameters of straight city streets on positive and negative phase blast wave impulses », *International Journal of Impact Engineering*, vol. 27, n° 4, p. 359-376, avr. 2002, doi: 10.1016/S0734-743X(01)00060-4.
- [83] H. S. Norville, N. Harvill, E. J. Conrath, S. Shariat, et S. Mallonee, « Glass-related injuries in Oklahoma City bombing », *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 13, n° 2, p. 50-56, mai 1999, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(1999)13:2(50).
- [84] S. E. Rigby, A. Tyas, T. Bennett, S. D. Clarke, et S. D. Fay, « The Negative Phase of the Blast Load », *International Journal of Protective Structures*, vol. 5, n° 1, p. 1-19, mars 2014, doi: 10.1260/2041-4196.5.1.1.
- [85] H. L. Brode, « Numerical Solutions of Spherical Blast Waves », *Journal of Applied Physics*, vol. 26, n° 6, p. 766-775, 1955, doi: 10.1063/1.1722085.
- [86] J. Henrych, *The Dynamics of Explosion and Its Use*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [87] W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, et R. A. Strehlow, *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier, 1983.
- [88] DEPARTMENT OF THE ARMY, *AMCP 706 181, Explosions In Air*. 1974. [En ligne]. Disponible sur: <http://archive.org/details/AMCP706181ExplosionsInAir>

- [89] B. Gelfand et M. Silnikov, « Translation from Russian to English the Book "Blast Effects Caused by Explosions" Authored by B. Gelfand and M. Silnikov », United States Army, European Research Office of the U.S. Army, London, N62558-04-M-0004, 2004. [En ligne]. Disponible sur: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA433657>
- [90] C. N. Kingery et G. Bulmash, *Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. Aberdeen Proving Ground: US Army Armament and Development Center, Ballistic Research Laboratory, 1984.
- [91] M. Swisdak, « Simplified Kingery Airblast Calculations ». [En ligne]. Disponible sur: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA526744>
- [92] J. Hetherington et P. Smith, *Blast and Ballistic Loading of Structures*. Taylor & Francis, 1994.
- [93] W. E. Baker, *Explosions in Air*. University of Texas Press, 1973.
- [94] G. Ben-Dor et K. Takayama, « The phenomena of shock wave reflection - a review of unsolved problems and future research needs », *Shock Waves*, vol. 2, n° 4, p. 211-223, déc. 1992, doi: 10.1007/BF01414757.
- [95] H. Kleine, E. Timofeev, et K. Takayama, « Laboratory-scale blast wave phenomena – optical diagnostics and applications », *Shock Waves*, vol. 14, n° 5-6, p. 343-357, déc. 2005, doi: 10.1007/s00193-005-0279-0.
- [96] J. Boutillier *et al.*, « Evaluation of the existing triple point path models with new experimental data: proposal of an original empirical formulation », *Shock Waves*, vol. 28, n° 2, p. 243-252, mars 2018, doi: 10.1007/s00193-017-0743-7.
- [97] G. Ben-Dor, *Shock wave reflection phenomena*, 2nd ed. in Shock wave and high pressure phenomena. Berlin ; New York: Springer, 2007.
- [98] S. Trélat, I. Sochet, B. Autrusson, K. Cheval, et O. Loiseau, « Impact of a shock wave on a structure on explosion at altitude », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, n° 4-6, p. 509-516, juill. 2007, doi: 10.1016/j.jlp.2007.05.004.
- [99] C. A. Mouton, « Transition Between Regular Reflection and Mach Reflection in the Dual-Solution Domain », phd, California Institute of Technology, 2007. doi: 10.7907/TEA0-Q468.

- [100] M. T. White, *Effects of impacts and explosions*, vol. 1. in Summary Report of Division 2, no. AD0221586, vol. 1. Washington, DC: National Defence Research council, 1946. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.loc.gov/resource/gdcmassbookdig.effectsofimpacte01unit/?st=gallery>
- [101] C. S. Whitney, B. G. Anderson, et E. Cohen, « Design of Blast Resistant Construction for Atomic Explosions », *JP*, vol. 51, n° 3, p. 589-683, mars 1955, doi: 10.14359/11697.
- [102] H. G. Hornung, H. Oertel, et R. J. Sandeman, « Transition to Mach reflexion of shock waves in steady and pseudosteady flow with and without relaxation », *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 90, n° 3, p. 541-560, févr. 1979, doi: 10.1017/S002211207900238X.
- [103] S. Itoh, N. Okazaki, et M. Itaya, « On the transition between regular and Mach reflection in truly non-stationary flows », *J. Fluid Mech.*, vol. 108, p. 383-400, juill. 1981, doi: 10.1017/S0022112081002176.
- [104] W. Heilig et H. Reichenbach, « Model Test Investigation Of Shock Wave Reflection With The Aid Of High Speed Shadow-Schlieren Visualisation And Pressure Gauges », vol. 491, p. 583-591, févr. 1985, doi: 10.1117/12.967980.
- [105] T. V. Bazhenova, L. G. Gvozdeva, et M. A. Nettleton, « Unsteady interactions of shock waves », *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 21, p. 249-331, janv. 1984, doi: 10.1016/0376-0421(84)90007-1.
- [106] M. Olim et J. M. Dewey, « A revised three-shock solution for the Mach reflection of weak shocks (1.1 », *Shock Waves*, vol. 2, n° 3, p. 167-176, sept. 1992, doi: 10.1007/BF01414639.
- [107] G. Ben-Dor, « A reconsideration of the three-shock theory for a pseudo-steady Mach reflection », *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 181, p. 467-484, août 1987, doi: 10.1017/S0022112087002179.
- [108] J. Kaca, « AN INTERFEROMETRIC INVESTIGATION OF THE DIFFRACTION OF A PLANAR SHOCK WAVE OVER A SEMICIRCULAR CYLINDER ».
- [109] O. Yamamoto, « Complex Mach reflection in shock diffraction problems », Iowa State University, Ames, Iowa, 1985.

- [110] D. Drikakis, D. Ofengeim, E. Timofeev, et P. Voionovich, « COMPUTATION OF NON-STATIONARY SHOCK-WAVE/CYLINDER INTERACTION USING ADAPTIVE-GRID METHODS », *Journal of Fluids and Structures*, vol. 11, n° 6, p. 665-692, août 1997, doi: 10.1006/jfls.1997.0101.
- [111] B. W. Skews et H. Kleine, « Shock wave interaction with convex circular cylindrical surfaces », *J. Fluid Mech.*, vol. 654, p. 195-205, juill. 2010, doi: 10.1017/S0022112010001151.
- [112] Q. Wan et V. Eliasson, « Numerical Study of Shock Wave Attenuation in Two-Dimensional Ducts Using Solid Obstacles: How to Utilize Shock Focusing Techniques to Attenuate Shock Waves », *Aerospace*, vol. 2, n° 2, p. 203-221, avr. 2015, doi: 10.3390/aerospace2020203.
- [113] V. Soni, A. Hadjadj, A. Chaudhuri, et G. Ben-Dor, « Shock-wave reflections over double-concave cylindrical reflectors », *J. Fluid Mech.*, vol. 813, p. 70-84, févr. 2017, doi: 10.1017/jfm.2016.825.
- [114] S. Sha, Z. Chen, X. Jiang, et J. Han, « Numerical Investigations on Blast Wave Attenuation by Obstacles », *Procedia Engineering*, vol. 45, p. 453-457, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.08.185.
- [115] N. Van Dorsselaer, S. Eveillard, et S. Trélat, « VanDorsselaer_Experiments and Simulations of Explosives_Shock Wave Propagation around a Convex Structure_2018.pdf », présenté à 15th International LS-DYNA® Users Conference, 2018.
- [116] A. Hakkaki-Fard et E. Timofeev, « High resolution determination of sonic and detachment angles at shock wave reflection from a circular cylinder », in *Proceedings of 17th Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Ottawa, Ontario, 2009.
- [117] I. V. Krassovskaya et M. K. Berezkina, « Characteristic Properties of the Formation of Shock-Wave Reflection Configurations in Unsteady Flows », in *30th International Symposium on Shock Waves 1*, G. Ben-Dor, O. Sadot, et O. Igra, Éd., Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 599-603. doi: 10.1007/978-3-319-46213-4_102.

- [118] M. Geva, O. Ram, et O. Sadot, « The regular reflection→Mach reflection transition in unsteady flow over convex surfaces », *J. Fluid Mech.*, vol. 837, p. 48-79, févr. 2018, doi: 10.1017/jfm.2017.835.
- [119] Y. Shi, H. Hao, et Z.-X. Li, « Numerical simulation of blast wave interaction with structure columns », *Shock Waves*, vol. 17, n° 1, p. 113-133, août 2007, doi: 10.1007/s00193-007-0099-5.
- [120] X. Zhi, S. Qi, et F. Fan, « Temporal and spatial pressure distribution characteristics of hemispherical shell structure subjected to external explosion », *Thin-Walled Structures*, vol. 137, p. 472-486, avr. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.01.021.
- [121] S. Qi, X. Zhi, F. Fan, et R. G. J. Flay, « Propagation behaviour of a hemispherical blast wave on a dome roof », *Engineering Structures*, vol. 212, p. 110524, juin 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110524.
- [122] D.-H. Duong, « Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe », Université d'Orléans, 2012.
- [123] S. Trélat, M.-O. Sturtzer, et D. Eckenfels, « MULTI-SCALE EXPERIMENTAL STUDY OF BLAST PROPAGATION AROUND A HEMI-CYLINDRICAL BARRIER », présenté à SUSI 2020, août 2020, p. 53-64. doi: 10.2495/SUSI200051.
- [124] K. Cheval, O. Loiseau, et V. Vala, « Laboratory scale tests for the assessment of solid explosive blast effects. Part I: Free-field test campaign », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, n° 5, p. 613-621, sept. 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2010.05.001.
- [125] K. Cheval, O. Loiseau, et V. Vala, « Laboratory scale tests for the assessment of solid explosive blast effects. Part II: Reflected blast series of tests », *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, n° 3, p. 436-442, mai 2012, doi: 10.1016/j.jlp.2011.11.008.
- [126] A. Becquerel César, « Expériences sur le développement de l'électricité par la pression : Lois de ce développement », vol. 23. in *Annales de Chimie et de Physique*, Par MM. Gay-Lussac et Arago, vol. 23. Crochard, Paris, 1833.

- [127] J. Curie, « Quartz piézo-électrique, extrait de la thèse de Jacques Curie », in *Annales de Chimie et de Physique*, vol. XVII, 1889, p. 392.
- [128] J. Pachman, R. Matyáš, et M. Künzel, « Study of TATP: blast characteristics and TNT equivalency of small charges », *Shock Waves*, vol. 24, n° 4, p. 439-445, juill. 2014, doi: 10.1007/s00193-014-0497-4.
- [129] J. Kucera, A. C. Anastacio, J. Selesovsky, et J. Pachman, « Testing optical tracking of blast wave position for determination of its overpressure », in *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic: IEEE, mai 2017, p. 70-73. doi: 10.1109/MILTECHS.2017.7988733.
- [130] P. Legrand, « Modélisation des effets d'une onde de souffle sur les structures de génie civil: de l'explosif à l'interaction fluide-structure », Université Bretagne-Loire, 2020.
- [131] C. Breda, « Confinement à l'aide de mousse aqueuse des effets combinés de souffle et de projection de fragments générés par la détonation d'un engin explosif », Université de Bretagne Occidentale, 2015.
- [132] M.-O. Sturtzer, S. Trélat, et L. Sinniger, « INVESTIGATION ON THE POST-PROCESSING OF BLAST LOADING CHARACTERISTICS ALONG A CONVEX STRUCTURE », présenté à SUSI 2020, août 2020, p. 41-52. doi: 10.2495/SUSI200041.
- [133] F. Bauer, « PVDF shock sensors: applications to polar materials and high explosives », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 47, n° 6, p. 1448-1454, nov. 2000, doi: 10.1109/58.883534.
- [134] J. Tartière, M. Arrigoni, A. Nême, H. Groeneveld, et S. Van Der Veen, « PVDF Based Pressure Sensor for the Characterisation of the Mechanical Loading during High Explosive Hydro Forming of Metal Plates », *Sensors*, vol. 21, n° 13, p. 4429, juin 2021, doi: 10.3390/s21134429.
- [135] M. Arrigoni, F. Bauer, S. Kerampran, J. Le Clanche, et M. Monloubou, « Development of a PVDF Pressure Gauge for Blast Loading Measurement », *Hum Factors Mech Eng Def Saf*, vol. 2, n° 1, p. 2, avr. 2018, doi: 10.1007/s41314-018-0012-2.

- [136] W. Thomson, « XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:—Effects of magnetization on the electric conductivity of nickel and of iron », *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 8, p. 546-550, janv. 1857, doi: 10.1098/rspl.1856.0144.
- [137] C. S. Smith, « Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon », *Phys. Rev.*, vol. 94, n° 1, p. 42-49, avr. 1954, doi: 10.1103/PhysRev.94.42.
- [138] C. Wheatstone, « An account of several new instruments and processes for determining the constants of a voltaic circuit », *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 4, p. 469-471, janv. 1843, doi: 10.1098/rspl.1837.0240.
- [139] D. D. Keough, « DEVELOPMENT OF A HIGH-SENSITIVITY PIEZORESISTIVE SHOCK TRANSDUCER FOR THE LOW KILOBAR RANGE »:, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, mars 1970. doi: 10.21236/AD0709438.
- [140] G. Bosca, J. David, L. Allay, J. M. Darmon, et Y. Victor, « Piézorésistivité du manganin et de l'ytterbium déposés par pulvérisation cathodique », *Rev. Phys. Appl. (Paris)*, vol. 16, n° 7, p. 387-395, juill. 1981, doi: 10.1051/rphysap:01981001607038700.
- [141] K. Sanchez *et al.*, « Transient Response of Miniature Piezoresistive Pressure Sensor Dedicated to Blast Wave Monitoring », *Sensors*, vol. 22, n° 24, p. 9571, déc. 2022, doi: 10.3390/s22249571.
- [142] Z. Rosenberg et Y. Partom, « Lateral stress measurement in shock-loaded targets with transverse piezoresistance gauges », *Journal of Applied Physics*, vol. 58, n° 8, p. 3072-3076, oct. 1985, doi: 10.1063/1.335833.
- [143] C. Wang, S. Wang, J. Zhang, et F. Ma, « Pressure Load Characteristics of Explosions in an Adjacent Chamber », *Shock and Vibration*, vol. 2021, p. 1-9, janv. 2021, doi: 10.1155/2021/3726306.
- [144] P. Ferdinand, « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg », *Techniques de l'Ingénieur*, n° R6735 V1, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-mesures-mecaniques-et-dimensionnelles-tiard/archive-1/capteurs-a-fibres-optiques-a-reseaux-de-bragg-r6735/>

- [145] D. Tosi, « Review of Chirped Fiber Bragg Grating (CFBG) Fiber-Optic Sensors and Their Applications », *Sensors*, vol. 18, n° 7, p. 2147, juill. 2018, doi: 10.3390/s18072147.
- [146] Y. Barbarin *et al.*, « Dynamic dispersive spectrometer using a fiber Bragg grating for high pressure measurements », présenté à Proceedings of IEEE Sensors, 2017. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808769.
- [147] O. Igra et F. Seiler, Éd., *Experimental Methods of Shock Wave Research*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-23745-9.
- [148] J. Boutillier *et al.*, « New experimental data on blast interaction with instrumented structures », présenté à 24th International Symposium on the Military Aspects of Blast and Shock - MABS 24, Halifax, CA, sept. 2016.
- [149] M. E. Fuller, A. Mousse-Rayaleh, N. Chaumeix, et C. F. Goldsmith, « Laminar flame speeds and ignition delay times for isopropyl nitrate and propane blends », *Combustion and Flame*, vol. 242, p. 112187, août 2022, doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112187.
- [150] E. Udd, I. Udd, J. J. Benterou, et G. Rodriguez, « Ultrafast fiber grating sensor systems for velocity, position, pressure, and temperature measurements », in *Fiber Optic Sensors and Applications XIII*, SPIE, mai 2016, p. 193-206. doi: 10.1117/12.2228309.
- [151] CEA, « Les réseaux de Bragg pour la surveillance en environnements sévères », CEA-List. [En ligne]. Disponible sur: <https://list.cea.fr/fr/30-avril-2020-les-reseaux-de-bragg-pour-la-surveillance-en-environnements-severes/>
- [152] J. Boutillier *et al.*, « A New Anthropomorphic Mannequin for Efficacy Evaluation of Thoracic Protective Equipment Against Blast Threats », *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, p. 786881, janv. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2021.786881.
- [153] « ISL - Terrain d'expériences ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.isl.eu/index.php/installations-fr/terrain-d-experiences>
- [154] D. Lecompte et J. Vantomme, « DIC for damage detection at the surface of a pre-stressed concrete beam under static loading », in *Proceedings of the 3rd international conference on emerging technologies in non-destructive testing*, Thessaloniki, Grèce, mai 2003, p. 287-293.

- [155] R. E. Reisler, J. H. Keefer, et N. H. Ethridge, « Measurement Techniques and Instrumentation. Volume 1. The Nuclear Era. 1945-1963. », Defense Nuclear Agency, Alexandria, VE, USA. [En ligne]. Disponible sur: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA297743>
- [156] R. E. Reisler, J. H. Keefer, et N. H. Ethridge, « Measurement Techniques and Instrumentation. Volume 2. The High Explosive Era, 1959 - 1993. », Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA. [En ligne]. Disponible sur: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA302543>
- [157] R. E. Reisler, J. H. Keefer, et N. H. Ethridge, « Measurement Techniques and Instrumentation. Volume 3. Air Blast Structural Target and Gage Calibration. », Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA. [En ligne]. Disponible sur: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA302544>
- [158] W. J. Yang, *Handbook Of Flow Visualization*, 2^e éd. New York: Routledge, 2001. doi: 10.1201/9780203752876.
- [159] « Accord de coopération entre l'IRSN et l'ISL (ISL COOP 0157 A) ». 15 mars 2018.
- [160] W. Jenny, « Propagation d'Ondes de Choc sur Surfaces Convexes », ENSTA Bretagne, Rapport de PFE, 2017.
- [161] R. Tillet, « Study of the Propagation of a Blast Wave Generated by Plastic Explosives », ENSTA Bretagne, 2019.
- [162] S. Trélat, M.-O. Sturtzer, D. Eckenfels, et L. Sinniger, « Reduced-scale high explosive charges a joint experimental work to study blast effects », présenté à ISIEMS, 2019.
- [163] M. Sućeska, *Test Methods for Explosives*. New York, NY: Springer New York, 1995. doi: 10.1007/978-1-4612-0797-9.
- [164] Y. Grégoire, « Etude expérimentale et numérique de la dispersion explosive et de la combustion de particules métalliques », Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 2009.
- [165] T. Schunck, M. Bastide, D. Eckenfels, et J. F. Legendre, « Explosion mitigation by metal grid with water curtain », *Shock Waves*, vol. 31, n° 6, p. 511-523, sept. 2021, doi: 10.1007/s00193-021-01004-y.

- [166] Davey-Bickford, « SA4201 Technical Data Sheet ».
- [167] ISO - IEC, « Introduction to the expression of uncertainty in measurement ». 2009.
- [168] S. Bell, « Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2) », *National Physical Laboratory*, 2001.
- [169] Joint Committee for Guides in Metrology, *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, 3e éd. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
- [170] ISO - IEC, « Guide to the expression of uncertainty in measurement ». 1995.
- [171] C. Osswald, « Probabilités et Statistiques ». ENSTA Bretagne, 2021.
- [172] M. Neuilly, « Modélisation et calcul de l'incertitude d'un résultat de mesure », *Techniques de l'ingénieur*, 1996, doi: 10.51257/a-v2-p260.
- [173] Student, « The Probable Error of a Mean », *Biometrika*, vol. 6, n° 1, p. 1, mars 1908, doi: 10.2307/2331554.
- [174] Kulite, « MINIATURE RUGGEDIZED PRESSURE TRANSDUCER XT-190 (M) SERIES ».
- [175] E. Boudinet, *Guide pour l'estimation de l'incertitude de mesure*. Luxembourg Institute of Science and Technology.
- [176] PCB Piezotronics, « Model 137A23 ICP® Pressure Sensor - Installation and Operating Manual ».
- [177] PCB Piezotronics, « Model 482A22 4-channel, line-powered, ICP® sensor signal cond., unity gain, BNC - Installation and Operating Manual ».
- [178] OpenCV Team, « OpenCV », OpenCV. [En ligne]. Disponible sur: <https://opencv.org/>
- [179] S. Rigby, « Blast Wave Clearing Effects on Finite-Sized Targets Subjected to Explosive Loads », University of Sheffield, 2014.
- [180] A. Tyas, J. A. Warren, T. Bennett, et S. Fay, « Prediction of clearing effects in far-field blast loading of finite targets », *Shock Waves*, vol. 21, n° 2, p. 111-119, avr. 2011, doi: 10.1007/s00193-011-0308-0.

- [181] K. Ramamurthi, *Modeling Explosions and Blast Waves*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-74338-3.
- [182] J. M. Dewey, « The air velocity in blast waves from t.n.t. explosions », *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 279, n° 1378, p. 366-385, juin 1964, doi: 10.1098/rspa.1964.0110.
- [183] R. Gavart, « Study of the propagation of blast waves generated by plastic explosives around hemicylindrical obstacles », ENSTA Bretagne, 2020.
- [184] R. Gavart, « Evaluation of Uncertainties in Explosive Blast Waves Measurements », présenté à 34th International Symposium on Shock Waves, Daegu, Corée du Sud, 17 juillet 2023.
- [185] H. W. Liepmann et A. Roshko, *Elements of gasdynamics*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2001.
- [186] J. Zóltak et D. Drikakis, « Hybrid upwind methods for the simulation of unsteady shock-wave diffraction over a cylinder », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 162, n° 1-4, p. 165-185, août 1998, doi: 10.1016/S0045-7825(97)00342-3.
- [187] S. Trélat, M.-O. Sturtzer, et D. Eckenfels, « Towards a model to predict blast propagation around a hemicylindrical barrier », *Int. J. CMEM*, vol. 9, n° 4, p. 327-338, nov. 2021, doi: 10.2495/CMEM-V9-N4-327-338.
- [188] A. Gautier, I. Sochet, et E. Lapebie, « Analysis of 3D interaction of a blast wave with a finite wall », *Shock Waves*, vol. 32, n° 3, p. 273-282, avr. 2022, doi: 10.1007/s00193-022-01081-7.
- [189] « Pressure sensor calibration | Kistler ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kistler.com/DE/en/pressure-sensor-calibration/C00000147>
- [190] R. Gavart, S. Trélat, M.-O. Sturtzer, et N. Chaumeix, « A two-scale approach to widen a predictive blast propagation model around a hemicylindrical obstacle », *Shock Waves*, vol. 33, n° 3, p. 287-297, avr. 2023, doi: 10.1007/s00193-023-01135-4.
- [191] G. Gautschi, *Piezoelectric Sensorics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. doi: 10.1007/978-3-662-04732-3.

A. Annexe : Fiches techniques des composants des campagnes IRSN

Capteurs

Pressure



Quartz Pressure Sensor for High Frequencies

Type 603B

Quartz pressure sensor of very small dimensions with acceleration compensation, for measuring pressure fluctuations of high frequency resp. short rise time. Pressure range: vacuum to 200 bar at temperatures up to 200 °C. Natural frequency beyond 400 kHz.

- Measurements up to 400 kHz
- Acceleration compensated

Description

The measured pressure acts through the diaphragm on the quartz crystal measuring element, which transforms the pressure p (bar) into an electrostatic charge Q ($pC = \text{Picocoulomb}$). The stainless steel diaphragm is welded flush and hermetically to the stainless steel sensor body. As the ceramic insulator of the connector is also hermetically welded, the entire sensor is hermetically sealed. The quartz disks are assembled together with a seismic mass in a way to compensate for the acceleration sensitivity.

Application

The sensor Type 603B is especially suited for measuring pressure fluctuations of high frequency resp. short rise time in heavily vibrating measuring objects.

Typical Applications

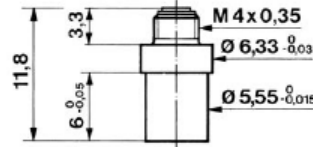
Pressure measurements in shock tubes, measurements of propagation of blast pressures.

Mounting

The sensor is usually screwed by means of a connecting nipple directly into the measuring object (Fig. 1). For low pressure measurements with high frequency in heavily vibrating objects the acceleration compensation of the sensor is often not sufficient. To isolate it against high frequency accelerations (acoustic emission) the special plastic mounting adapter Type 6581 (Fig. 2) is used.

See also data sheets for:

Tools	000-068
Adapters	000-070
Connecting nipples	000-069
Cables	000-352



Technical Data

Range	bar	0 ... 200
Calibrated partial ranges	bar	0 ... 20 0 ... 10
Overload	bar	350
Sensitivity	pC/bar	$\approx -5,0$
Natural frequency	kHz	≈ 400
Linearity	%FSO	$\leq \pm 1$
Acceleration sensitivity	bar/g	$< 0,0001$
Operating temperature range	°C	-196 ... 200
Temperature coefficient of sensitivity	°C ⁻¹	$< 2 \times 10^{-4}$
Insulation resistance at 20 °C	Ω	$\geq 10^{11}$
Shock resistance	g	10 000
Capacity	pF	10
Weight	g	1,7
Connector, Teflon® insulator		M4x0,35

1 N (Newton) = 1 kg·m·s⁻² = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 kp = 1 kgf = 9,80665 N; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 N·m = 0,73756... lbf·ft

Teflon® is a registered trade mark of DuPont.

Page 1/2

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©1995 ... 2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

603B_000-012e-11.10

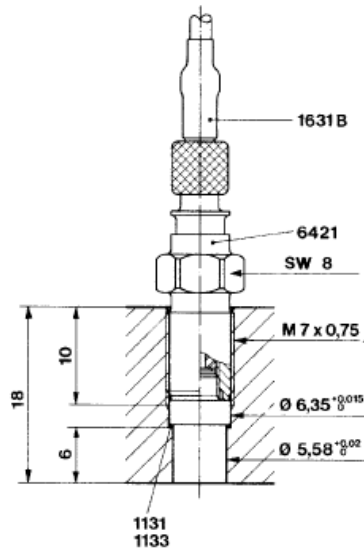


Fig. 1: Direct mounting

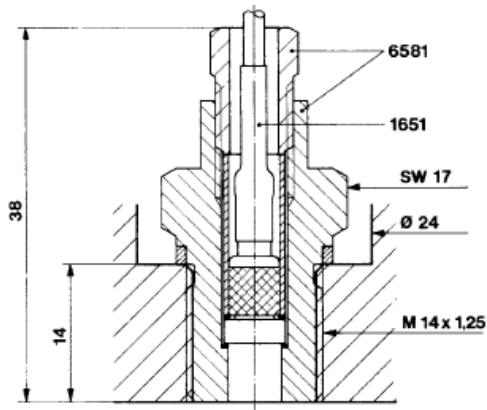


Fig. 2: Mounting with special plastic mounting adapter Type 6581

Included Accessories

- Copper seal

Type
1131

Optional Accessories

- Nickel seal
- Teflon seal
- Step drill
- Extraction tool for KIAG 10-32 and M4
- Connecting nipple M4/KIAG 10-32
- Heat-shrink tubing for connector
- Plastic adapter incl. mounting nut

Type
1131A
1133
1331
1311
6421
1021
6581

Ordering Code

- Quartz pressure sensor for high frequencies

Type 603B

603B_000-012e-11.10

Piezoelectric pressure sensor for Test & Measurement applications

Type 603C...

The miniature pressure sensors of the Type 603C series are, due to their high natural frequency, suited for a variety of applications where highly dynamic pressure transients need to be measured. The acceleration compensation ensures reliable measurements even under highly vibrating conditions.

- Pressure range up to 1 000 bar (15 000 psi)
- Acceleration compensated
- Small sensor size
- Short rise time & high natural frequency
- Wide operating temperature range
- Charge (PE) or Voltage (IEPE) output

Description

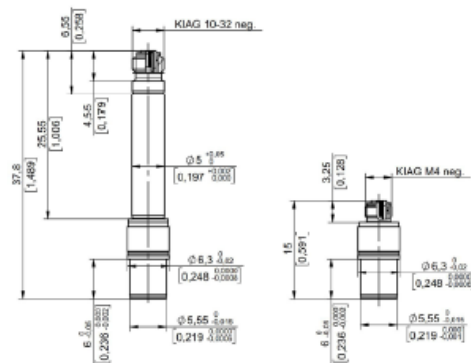
Due to their high natural frequencies, piezoelectric pressure sensors can be used for a variety of applications where dynamic pressures need to be measured. Another unique characteristic of piezoelectric pressure sensors is their ability to measure small pressure fluctuations that are superimposed on top of high static pressures with exceptional resolution. By contrast, piezoresistive pressure sensors are the right choice when measuring static pressure curves.

At the core of the all-welded, hermetically sealed 603C series there is a Quartz crystal. The pressure to be measured acts on the sensor's diaphragm and compresses the Quartz crystal. The compressed crystal produces a charge which is proportional to the pressure. Finally the charge signal needs to be converted, by a charge amplifier, into a voltage which can then be read.

Two variants of the sensor are available, charge output (PE) and voltage output (IEPE resp. Piezotron®). The instruction manual gives an overview on the characteristics of both variants, an indication of which type of application they are best suited to and the full measuring chain.

Typical applications

- High pressure measurements on hydraulic and pneumatics systems, etc.
- Highly dynamic pressure measurements on shock tubes, blast tests, etc.



Technical data – PE sensors¹⁾

Type 603CA...

Output signal	pC	Charge (PE)
Pressure range	bar psi	0 ... 1 000 0 ... 15 000
Calibrated partial range	%	10; 100
Overload	bar psi	1 100 15 950
Sensitivity (nom.)	pC/bar pC/psi	-5.0 -0.35
Linearity (typ.)	%FSO	≤±0.4
(max.)	%FSO	≤±1.0
Operating temperature range	°C °F	-196 ... +200 -321 ... +392
Rise time (10 ... 90 %)	µs	<0.4
Natural frequency ²⁾	kHz	>500
Temp. coefficient of sensitivity	%/°C %/°F	≈-0.027 ≈-0.015
25 °C ... 200 °C	%/°C	≈+0.027
77 °F ... 392 °F	%/°F	≈+0.015
25 °C ... -196 °C	%/°C	≈+0.027
77 °F ... -321 °F	%/°F	≈+0.015
Acceleration sensitivity (axial)	bar/g psi/g	≤0.00014 ≤0.00200
Acceleration sensitivity (radial)	bar/g psi/g	≤0.00001 ≤0.00015
Insulation resistance	Ω	≥10 ¹³
Weight Type 603CAA / 603CAB	gram	4.8 / 2.2
Housing and diaphragm material	-	17-4 S.S.

¹⁾ Indications are valid for 23 °C / 73 °F (if not specified otherwise)

²⁾ Calculated from peak time

Page 1/3

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

© 2017 ... 2019 Kistler Group, Eulachstraße 22, 8408 Winterthur, Switzerland
 Tel. +41 52 224 11 11, info@kistler.com, www.kistler.com. Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details visit www.kistler.com

Technical data – IEPE sensors ¹⁾

Type 603CBA...		00014.0	00035.0	00070.0	00350.0	00690.0	01000.0
Output signal	V	Voltage (IEPE)					
Pressure range	bar psi	14 200	35 500	70 1 000	350 5 000	690 10 000	1000 15 000
Maximum pressure	bar psi	1 000 15 000					
Overload	bar psi	1 100 15 950					
Sensitivity (nom.)	mV/bar mV/psi	357 25	143 10	71 5	14 1	7 0.5	5 0.3
Linearity	%FSO	≤±1.0					
Operating temperature range	°C °F	-55 ... +120 -67 ... +248					
Rise time (10 ... 90 %)	µs	<0.4					
Natural frequency ²⁾	kHz	>500					
Time constant (nom.)	s	2	3				
Low frequency response	-3 dB -5 %	Hz Hz	0.080 0.242	0.053 0.161			
Temp. coefficient of sensitivity							
25 ... 120 °C	%/°C	≈-0.027					
77 ... 248 °F	%/°F	≈-0.015					
25 ... -55 °C	%/°C	≈+0.027					
77 ... -67 °F	%/°F	≈+0.015					
Acceleration sensitivity (axial)	bar/g psi/g	≤0.00014 ≤0.00200					
Acceleration sensitivity (radial)	bar/g psi/g	≤0.00001 ≤0.00015					
Supply voltage (by IEPE-Coupler)	VDC	22 ... 30					
Supply current (by IEPE-Coupler)	mA	2 ... 20					
Output bias voltage (nom.)	VDC	11					
Output voltage FSO	V	±5					
Weight	gram	4.0					
Housing and diaphragm material	—	17-4 S.S.					

¹⁾ Indications are valid for 23 °C / 73 °F (if not specified otherwise)²⁾ Calculated from peak time

603C_003-288e-03.19

Mounting

Please check the T&M Pressure catalogue or sensor manual for an overview on the different mounting options.

Accessories (included)

- Sensor seal copper (5 pcs.)

Type/Art.-No.

1131

Accessories (optional)

- Sensor seal nickel (1 pcs)
- Floating clamp nut M7x0.75
- Floating clamp nut 5/16-24 UNF
- Adapter M10x1¹⁾
- Adapter seal (stainless steel) for 6503C0A
- Adapter seal (copper) for 6503C0A
- Adapter 3/8-24 UNF¹⁾
- Adapter seal (stainless steel) for 6503C1A
- Adapter seal (copper) for 6503C1A
- Adapter M3x0.5¹⁾
- Adapter 5-40 UNC¹⁾
- Adapter seal for 6507BxA
- Lubrication Grease (Adapter)
- Dummy sensor (standard housing)
- Dummy sensor (short housing)

Type/Art.-No.

1131A
6423B00
6423B11
6503C0A
1113C0B
1113C0C
6503C1A
1113C1B
1113C1C
6507B0A
6507B1A
1117B0C
1063
6487AA
6487AB

¹⁾ All of the adapters are delivered with 1 pc. of each adapter seal type and 1 pc. lubrication grease Type 1063.

Please check the T&M pressure catalogue or sensor manual for further accessories and mounting details.

Ordering key

Output signal

Charge (PE)	A
Voltage (IEPE)	B

Housing

Standard housing (PE and IEPE)	A
Short housing (only PE)	B

Pressure range (only IEPE)

14 bar / 200 psi	00014.0
35 bar / 500 psi	00035.0
70 bar / 1 000 psi	00070.0
350 bar / 5 000 psi	00350.0
690 bar / 10 000 psi	00690.0
1 000 bar / 15 000 psi	01000.0

Ordering example

PE sensor with standard housing
PE sensor with short housing
IEPE sensor (70 bar / 1 000 psi)

Type 603C

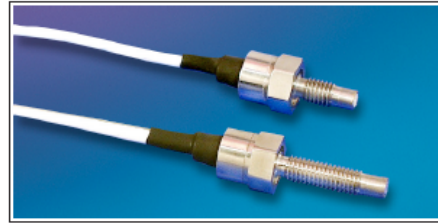
Type

603CAA
603CAB
603CBA00070.0

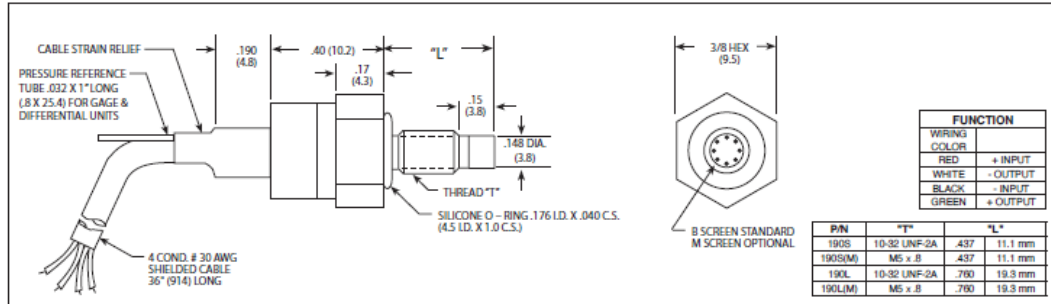
kulite®
MINIATURE RUGGEDIZED
PRESSURE TRANSDUCER
XT-190 (M) SERIES

- Easy Installation
- Silicon on Silicon Integrated Sensor VIS®
- High Natural Frequency

The ruggedness of this sensor has not compromised its performance. It was designed for ease of installation.



Kulite recommends the **KSC Series** of signal conditioners to maximize the measurement capability of the XT-190 transducer.



INPUT	Pressure Range	0.35 5	0.7 10	1 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	140 BAR 2000 PSI
	Operational Mode	Absolute, Gage, Differential			Absolute, Gage, Sealed Gage, Differential			Absolute, Sealed Gage			
	Over Pressure	2 Times Rated Pressure to 500 PSI (35 BAR), 1.5 Times Rated Pressure Above 500 PSI (35 BAR)									
	Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 5000 PSI (350 BAR)									
	Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (All Media May Not Be Suitable With O-Ring Supplied)									
	Rated Electrical Excitation	10 VDC/AC									
	Maximum Electrical Excitation	12 VDC/AC									
OUTPUT	Input Impedance	1000 Ohms (Min.)									
	Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)									
	Full Scale Output (FSO)	100 mV (Nom.)									
	Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)									
	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)									
	Resolution	Infinitesimal									
	Natural Frequency of Sensor Without Screen (KHz) (Typ.)	150	175	200	240	300	380	550	700	1000	
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	1.5x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	
	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC									
	ENVIRONMENTAL	Operating Temperature Range	-65°F to +350°F (-55°C to +175°C)								
Compensated Temperature Range		+80°F to +180°F (+25°C to +80°C) Any 100°F Range Within The Operating Range on Request									
Thermal Zero Shift		± 1% FS/100°F (Typ.)									
Thermal Sensitivity Shift		± 1% /100°F (Typ.)									
Mechanical Shock		20g Half Sine Wave 11 msec. Duration									
PHYSICAL	Linear Vibration	20g Peak, Sine 10 to 2000 Hz									
	Electrical Connection (Standard)	4 Conductor 30 AWG Shielded Cable 36" Long									
	Weight	4 Grams (Nom.) Excluding Cable									
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon									
	Mounting Torque	15 Inch-Pounds (Max.) 1.7 Nm									

Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available. Dimensions are in inches. Dimensions in parenthesis are in millimeters. All dimensions nominal. (T) Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice. Copyright © 2017 Kulite Semiconductor Products, Inc. All Rights Reserved. Kulite miniature pressure transducers are intended for use in test and research and development programs and are not necessarily designed to be used in production applications. For products designed to be used in production programs, please consult the factory.

KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. • One Willow Tree Road • Leonia, New Jersey 07605 • Tel: 201 461-0900 • Fax: 201 461-0990 • <http://www.kulite.com>

Amplificateurs

Charge Amplifier

Type 5011B...

Single-channel multi-range laboratory charge amplifier

The mains-operated, microprocessor controlled single-channel charge amplifier Type 5011B... converts the electrical charge produced by piezoelectric sensors into a proportional voltage signal.

- Large measuring range
- Wide frequency range
- Automatic zero correction
- Adjustable low-pass filter and time constant
- Various options and versions provide optimum adaptation to the measuring problem
- Conforming to CEE

Description

The main features of the instrument are its continuous measuring range adjustment range from $\pm 10 \dots \pm 999\,000$ pC and convenient adjustment of the parameters with a two-line LC display. The values entered are retained in the event of an interruption in the power supply.

A built-in IEEE-488 parallel interface or a serial RS-232C interface is available as an option. This enables all set values to be entered or queried. Transmission of data measured is not possible.

The version ...Y50 additionally has a drift compensation and is used in engine measuring technology with uncooled sensors

Application

This amplifier serves mainly to measure mechanical quantities, e.g. pressure, force or acceleration.

The instrument dimensions are DIN standardized and it can be supplied in a desktop or rack mount case.



The principle measurement without calculation:

- Set sensor sensitivity
- Select display scale
- Sensor sensitivity and scale are displayed
- Set the signal output of the data acquisition unit (recorder, oscilloscope...), for example to 1 V/unit (1 V/cm)
- The display appears directly in mechanical units according to the display scale selected

5011B_000-296e-12.05

Page 1/6

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2005, Kistler Instrumente AG, PO Box, Eulachstr. 22, CH-8408 Winterthur
Tel +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Technical Data

Basic unit

Measuring range for 10 V FS	pC	±10 ... ±999 000
Sensor sensitivity [T] (M.U. = Mechanical units)	pC/M.U.	±0,01 ... ±9 990
Scale [S]	M.U./V	0,001 ... 9'990'000
Output voltage	V	±10
Output current (short-circuit protected)	mA	±5
Output impedance	Ω	10
Frequency range (-3dB, Filter "OFF")	kHz	≈0 ... 200
Low-pass filter upper cutoff frequency -3dB Butterworth, 2 pin 8 stages (1, 3, 10 ...)	kHz (%)	0,01 ... 30 (±10)
Time constant [TC] (high pass filter)		
Long	s	>1 000 ... 100 000
Medium (T = R _e ·C _p)	s	1 ... 10 000
Short (T = R _e ·C _p)	s	0,01 ... 100
Error		
<±100 pC FS (max./typ.)	%	<±3/<±2
≥±100 pC FS (max./typ.)	%	<±1/<±0,5
Linearity	% FS	<±0,05
Noise	mV _{eff}	<0,5 (<1,5)
9,99 pC/V (1 pC/V)	mV _{eff}	<4 (<8)
Loss due to cable capacitance	pC _m /pF	<2·10 ⁻⁶
Drift at 25 °C	pC/s	<±0,07

General Data

Operating temperature range	°C	0 ... 50
Connections		
Measuring input/signal output	–	BNC negative
Remote control (Operate, Overload, ...)	–	Connector 6 pin DIN 45322
Power plug	–	IEC 320 C 14
Conformity to EC Directive		
Safety	–	EN 61010-1
EMC Interference Emission	–	EN 50081-1/EN 50081-2
EMC Interference Immunity	–	EN 50082-1/EN 50082-2
Power, switchable (Protection class I)	VAC (%)	230/115 (-22/+15)
Voltage between protection and measuring ground	V _m	48 ... 62 (20)
Dimensions		
with desktop case Type 5747A1	mm	94x141x195
for rack mounting	mm	71,12x128,7x169
Front panel according to DIN 41494 (Part 5)	HE (mm)	3 (128,7)
	TE (mm)	14 (71,12)
Weight (incl. IEEE-488 or RS-232C)	kg	≈2

Version ...Y50, Drift compensation; at [TC] setting "Drco"

Time constant [TC] (High-pass filter)		
Long	s	>1 000 ... 100 000
Drco	–	Driftcompensation
Short (T = R _e ·C _p)	s	0,01 ... 100
Driftcompensation; at [TC] setting "Drco"		
Range for ±10 V FS	pC	±100 ... ±999 000
Zero point error	mV	<±20
Max. Error in signal repetition frequency range	%	<1
Signal repetition frequency range	Hz	5 ... in dependence of the selected low-pass filter

Option: Parallel Interface IEEE-488 Type 5605A

Standardized interface with IEC 625-1 electrically compatible for remote control and checking of all parameters. Measured data are not transmitted.

Standard used	Type	IEEE-488-1978
Max. distance between 2 instruments	m	2
Max. bus length	m	20
Max. number of instruments on the bus	–	15
Address range	–	30
Functions	–	Listener, Talker

Option: Serial Interface RS-232C Type 5611A

Standardized interface for remote control and checking of all parameters. Measured data not transmitted.

Standard used	Type	RS-232C resp. V24
Max. cable length	m (pF)	20 (2 500)
Baud rates	Baud	50, 110, 250, 300, 600, 1 200, 2 400, 4 800
Number of data bit	Bit	7 or 8
Number of stop bit	Bit	1 or 2
Parity	–	without, even or odd
Software protocol	XON/XOFF	not allowed

Functional description

The charge signal to be measured (Charge Input) is fed to the inverting amplifier (OP1), which features high internal gain and extremely high input impedance (Fig. 2). C_k provides negative feedback and thus acts as an integrator for the charge to be measured. The C_k capacitance determines the charge measuring range according to the approximation formula $Q = C_k \cdot U_1$.

A voltage U_1 then appears at the output of OP1 proportional to the charge and thus to the mechanical measurand.

When a purely dynamic measurement is involved, one of the two time constant resistors R_k can be connected in parallel with the range capacitor C_k . This avoids problems of drift such as can occur in quasi-static measurements.

A shorting switch in the negative feedback branch of OP1 is used to discharge the range capacitor C_k thereby preparing the instrument for a new measurement (Reset function, $U_1 \rightarrow 0$).

Any remaining zero deviation is compensated by a special circuit (zero compensation) in the Reset condition. The voltage signal U is brought to the value calculated by the instrument with a digital voltage divider (12 bit DAC).

The adjustable 8-stage low-pass filter (LP filter) reduces in the upper frequency limit as required.

An 8 bit microprocessor circuit (μP) controls and monitors the entire instrument. The software is stored in an EPROM; the set values in a battery-backed NOVRAM.

The following functions are available through the remote control connections (Remote Control) without optional interface:

- Reset/Operate switching
- Reset overload signal
- Display: Overload
- Display: Zero out of Limit

Version ...Y50

The charge amplifier version ...Y50 additionally has a drift compensation and is used in engine measuring technology with uncooled sensors. The drift compensation detects drift as a slowly changing signal. This slow change in a positive and negative direction is compensated by means of a closed-loop control in the circuitry. This compensation keeps the reference line on zero (Fig. 1).

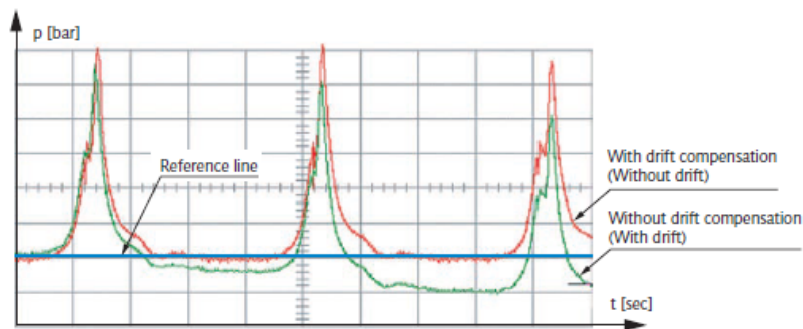


Fig. 1: Pressure measurement of the charge amplifier with and without drift compensation ...Y50

5011B_000-296e-12.05

Block diagram

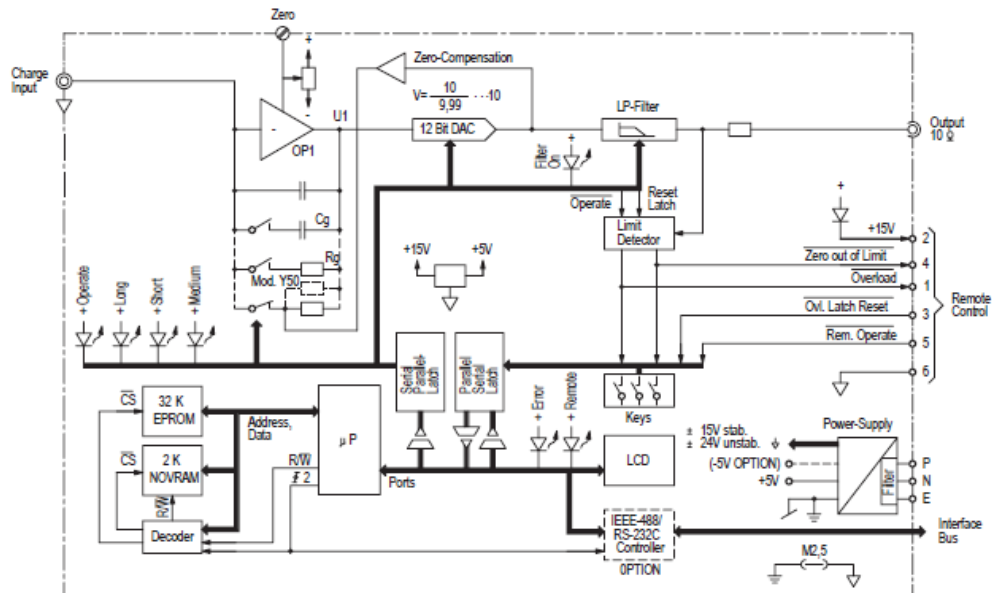


Fig. 2: Block diagram of charge amplifier Type 5011B...

Cable wiring for the RS-232 C interface

Without control signals for transmission up to 1200 baud
(S = Socket, P = Plug)

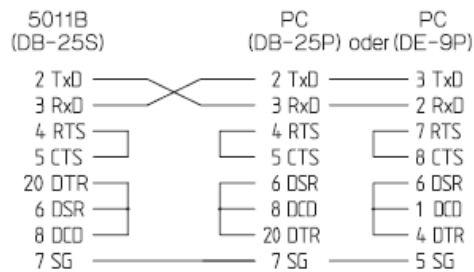


Fig. 3: Pin configuration for RS-232 C interface without control signals

With control signals for transmission up to 2 400 ... 4 800 baud
(S = Socket, P = Plug)

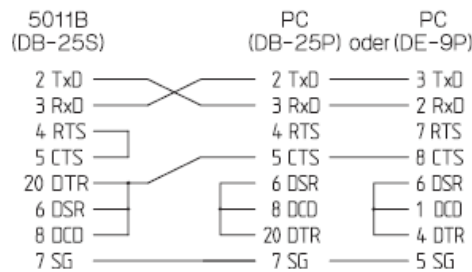


Fig. 4: Pin configuration for RS-232 C interface with control signals

5011B_000-296e-12.05

Dimensions

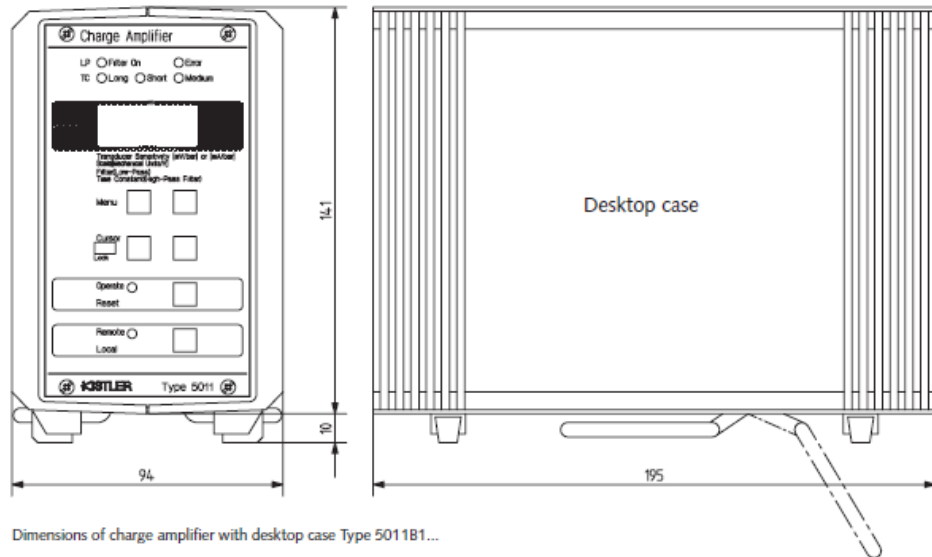


Fig. 5: Dimensions of charge amplifier with desktop case Type 5011B1...

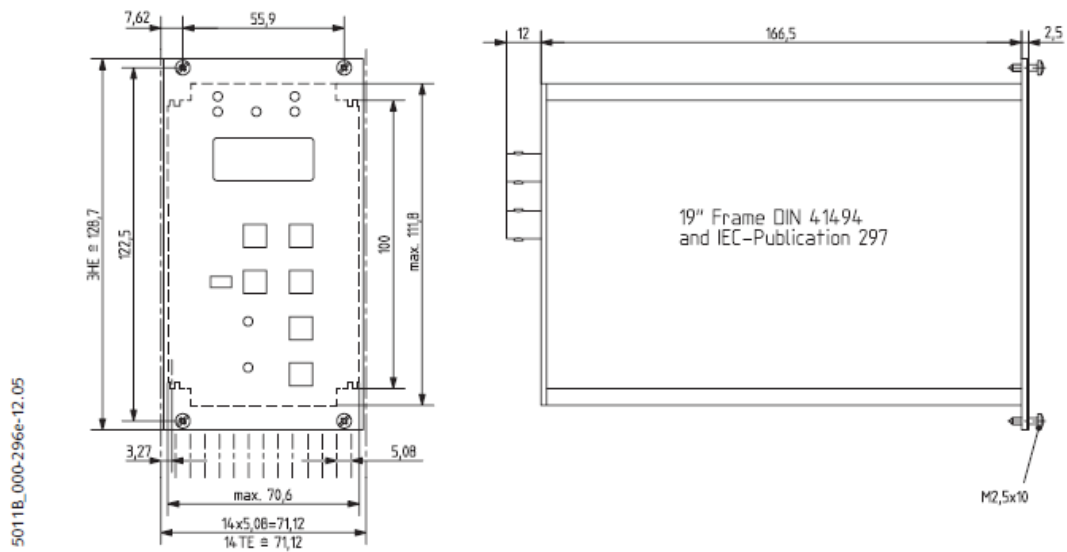


Fig. 6: Dimensions of charge amplifier for rack mounting Type 5011B0...

Accessories Included

- BNC/BNC cable
- Power cable

Type/Art. No.
1601B

Ordering Key

Type 5011B

Optional Accessories

- Connecting cable for remote control length 5 m (Data sheet 000-349)
- Remote control box (Data sheet 000-339)
- Connector for remote control connection 6 pin per DIN 45322 (Data sheet 000-349)
- RS-232C cable, length 3 m, with Hardwired-Handshake DB-25 P/DB-9 S
- RS-232C adapter DB-9 P/DB-25 S

Type/Art. No.
1455A5

5663

1564

1475A3

1469

Case

For rack mounting	0
With desktop case	1

Interface

Without Interface	0
With parallel interface IEEE-488 (Type 5605A)	1
With serial interface RS-232C (Type 5611A)	2

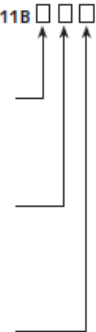
Version

Charge amplifier set to 115 VAC power supply*	Y26
Charge amplifier with drift compensation	Y50

*Supply voltage setting can be changed at any time

Ordering Example: Type 5011B10Y26Y50

This is a charge amplifier of the basic Type 5011B... with desktop case, without integral interface, set to 115 VAC supply with drift compensation.



5011B_000-296e-12_05

Amplificateur de Charge

Amplificateur de Charge de Laboratoire

Type 5018A...

Cet amplificateur de charge universel de laboratoire peut être utilisé pour le conditionnement du signal de tout capteur piézoélectrique. Il convertit le signal de charge en provenance du capteur en une sortie analogique proportionnelle.

- Amplificateur de Charge Mono-voie
- Compensation de dérive pour toute application Moteurs
- Entrée Piezotron® (en option)
- Large gamme de mesure
- Evaluation directe du signal
- Reconnaissance automatique des capteurs PiezoSmart®
- Enregistrement automatique des heures d'opération et du nombre de cycles d'utilisation du capteur de Pression PiezoSmart
- Interfaces USB et RS-232C pour commande à distance
- Ecran à cristaux liquides et menu déroulant

Description

Le Type 5018A... est le successeur de l'amplificateur de charge type 5011B... Les modes d'opération sont Short (Court), Medium, Long et DrCo (Compensation automatique de la dérive). La DrCo s'appliquera lors de mesures de la pression cylindre afin de compenser toute éventuelle dérive.

Il est disponible sous diverses versions :

- Reconnaissance automatique des capteurs PiezoSmart®
- Entrée en tension pour capteurs avec circuit Piezotron®

Lors de l'utilisation d'un PiezoSmart®, les paramètres individuels du capteur de la chaîne de mesure sont réglés automatiquement. L'élément principal d'un PiezoSmart® est une Notice Technique Electronique appelée TEDS, liée au capteur et qui contient toutes ses données essentielles.

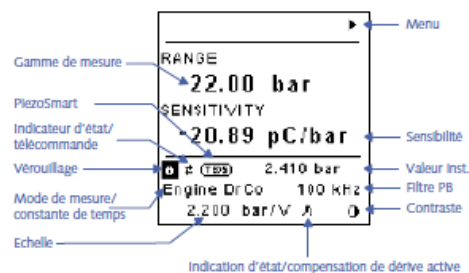
Une autre caractéristique est la capacité à déterminer lorsqu'un capteur de pression cylindre est exposé aux conditions d'utilisation. Lorsque l'amplificateur est utilisé avec un capteur de type PiezoSmart®, le nombre de cycles de pression ainsi que la durée d'utilisation peuvent être calculés et sauves sur la puce TEDS. Ces informations peuvent être utilisées comme élément de Gestion de Ressource afin de déterminer la fréquence d'étalonnage ou le contrôle d'inventaire.

Application

Il a été développé, dans un premier temps, spécifiquement pour l'utilisation de capteur de pression dans des Moteurs à Combustion modernes. De plus, il est conseillé pour toute application générale R&D et laboratoire.



Affichage



Données Techniques

Entrée de charge

Type de connecteur	BNC nég. ou TRIAX nég.
Gamme de mesure FS	pC ±2 ... 2 200 000
Erreur de mesure	
Gammes FS <10 pC	% <±2
Gammes FS <100 pC	% <±0,6
Gammes FS ≥100 pC	% <±0,3
Dérive, Mode de mesure DC (Long)	
à 25 °C, Humidité relative max. RH de 60 % (pas de condensation)	pC/s <±0,03
à 50 °C, humidité relative max. RH de 50 % (pas de condensation)	pC/s <±0,3
Tension max. en mode commun entre masses entrée et sortie	V <±25
Surcharge	%FS ≈±110

Page 1/5

Ces informations sont valides au moment de leur publication. Kistler se réserve le droit de modifier les caractéristiques de ses produits. La responsabilité de Kistler ne peut être engagée du fait de l'utilisation de ses produits.

©2010, Groupe Kistler, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Suisse
 Tél. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Entrée Tension optionnelle (Piezotron®)

Type de connecteur	BNC nég.
Gamme de Mesure FS	mV ±20 ... 30 000
Erreur de mesure	
Gamme FS <100 mV	% <±3
Gamme FS <1 V	% <±1
Gamme FS >1 V	% <±0,5
Tension max. en mode commun V entre masses entrée et sortie	<±25
Surcharge	%FS ≈±110
Mode Piezotron	
Courant d'alim. (ajustable)	mA/% 1/±20
	mA/% 2 ... 15/±10
Tension d'entrée	V 0 ... 30

Sortie en Tension

Type de Connecteur	Type	BNC nég.
Gamme sortie FS	V	±10 /-8 ... 10
Courant sortie	mA	0 ... ±2
Impédance de sortie	Ω	≈10
Saut de zéro		
Saut de zéro (Long)	compense	
Temps de correction, y compris temps de retard	ms	<15
Erreur Offset (Reset)	mV	<±2

Signal parasite de sortie (0,1 Hz ... 1 MHz), Mode Charge

Gamme FS, filtre-PB off (200 kHz)			
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	typ./max.	25/40
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	typ./max.	8/12
100,0 ... 2 200 000 pC	mVpp	typ./max.	4/8

Interférence sortie Dual Mode (0,1 Hz ... 1 MHz), Mode Piezotron

Gamme FS, filtre-PB off (200 kHz)			
Gain 1 (Range FS 10V)	mVpp	typ./max.	4/8
Gain 2 (Range FS 5V)	mVpp	typ./max.	6/12
Gain 10 (Range FS 1V)	mVpp	typ./max.	10/20

Réponse en fréquence

DC (Long), filter-PB off		
Bande passante (-3 dB)	kHz	≈0 ... 200
Temps de retard	μs	≈2

Constantes de temps

Constantes de temps pour mode Short/Medium			
Gamme charge FS, (Tension)			
≥2 pC ... <217 pC	s	≈0,033/3,3	
(≥20 mV ... <2 170 mV)			
Short/Medium			
≥217 pC ... <4 717 pC	s	≈0,42/42	
(≥2 170 mV ... <47 170 mV)			
Short/Medium			

≥4 717 pC ... <102 400 pC	s	≈10/1 000
Short/Medium		
≥102 400 pC ... 2 200 000 pC	s	≈220/22 000
Short/Medium		
Constantes de temps DC (longue)		
Gamme de charge FS, (Tension)		
<217 pC	s	≈10 000
(<2 170 mV)		
≥217 pC ... ≤2 200 000 pC	s	≈100 000
(≥2 170 mV ... ≤30 000 mV)		

Compensation de la dérive (DrCo)

Gamme de travail	1/min	≈100 ... 20 000
Gamme de compensation	pC/s	≈±8 ... ±280
Gamme de fonctionnement	pC	±50 ... ±2 200 000

Filtre Passe Bas

Filtre Passe Bas sélectionnable		
Type de filtre	Butterworth	
Ordre	2ème	
Fréquence de coupure (-3 dB)	Hz	10, 20, 30, 100, 300, 600
	kHz	1, 2, 3, 6, 10, 22, 30, 60, 100, (LP off)
Tolérance	%	<±10*

* (@ 6 kHz <±15 %)

Taux de rafraîchissement du LCD

Valeur instantannée	s	0,3
---------------------	---	-----

Telecommande (Remote control)

Type de Connecteur	Type	Connecteur rond MiniDin
Affectation des broches		
Entrées à résistance pull-up interne		
Broche 5 (entrée)		/Mesure Telecde.
Broche 6		DGND
Niveau d'entrée		
logique inactif		
ou entrée ouverte	V	3,5 ... 30
logique actif	V(mA)	0 ... 1 (0 ... 4)
Temps de retard		
Mesure (telecommande)	ms	<15

Identification du Capteur

TEDS selon l'IEEE 1451.4	-	-
Longueur max. pour TRIAX	m	10
câble de rallonge		
Gamme de température pour couplage PiezoSmart	°C	-20 ... 85

5018A_000-719f-01.10

Interface RS-232C (Electriquement isolée)

Standard EIA/TIA	RS-232C
Type de Connecteur	DB-9S (D-Sub)
Affectation des broches	
Broche 2	RxD
Broche 3	TxD
Broche 5	GND RS
Longueur de câble max. pour	
1 200 bps	m <15
9 600 bps	m <15
19 200 bps	m <15
38 400 bps	m <12
57 600 bps	m <10
115 200 bps	m <5
Tension max. d'entrée, en permanence	V <±20
Vitesse de transfert en bauds	bps 1 200/9 600/19 200/38 400/57 600/115 200
Bit de données	8
Bit d'arrêt	1
Parité	aucun
Logiciel Handshake	aucun

Interface USB 2.0-Full Speed

Type de Connecteur	USB	Type B
Longueur câble max.	m	5

Branchement Secteur

Type Fiche secteur (2P+E, classe protection I) IEC 320C14	
Tension commutable	VCA 115/230
Tolérance Tension Secteur	% -22, +15
Fréquence secteur	Hz 48 ... 62
Puissance consommée	VA ≈20
Tension entre la masse du signal et la terre de protection	V _{RMS} max. 20

Autres données

Classe de protection (IEC 60529)	IP 40
Température de service	°C 0 ... 50
Température de stockage	°C -10/60
Résistance aux vibrations (20 Hz ... 2 kHz, durée 16 min, cycle 2 min.)	
	g <10
Résistance aux chocs (1ms)	g <200
Dimensions du boîtier	
avec cadre (BxHxT)	mm 105,3x142x253,15
sans cadre (BxHxT)	mm 71,12x128,7x230
Platine avant (conforme à DIN 41494, part 5) HT/TE	
	3/14
Poids	kg ≈2,3

5018A_000-719f-01.10

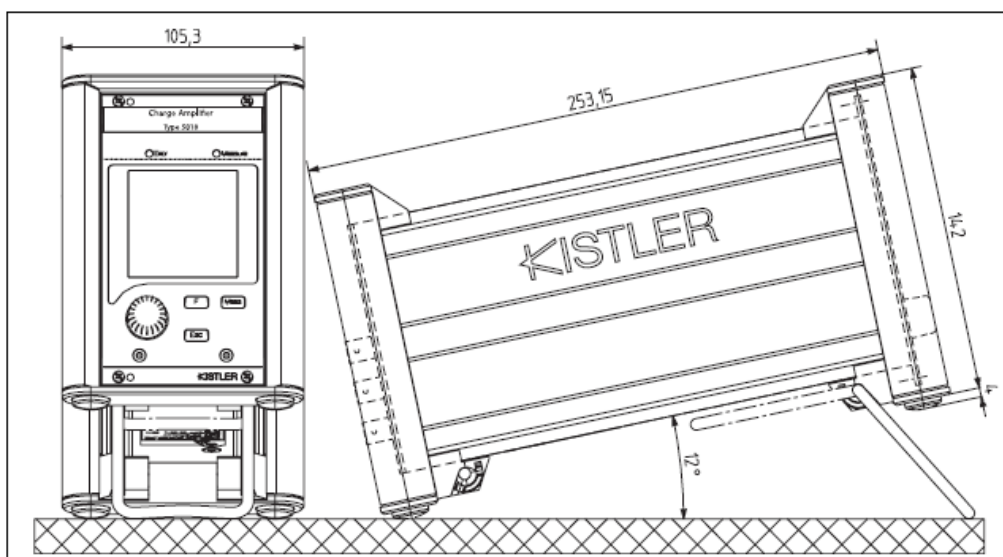


Fig. 1: Appareil de table Type 5018A1... (empilable)

Page 3/5

Ces informations sont valides au moment de leur publication. Kistler se réserve le droit de modifier les caractéristiques de ses produits. La responsabilité de Kistler ne peut être engagée du fait de l'utilisation de ses produits.

©2010, Groupe Kistler, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Suisse
 Tél. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

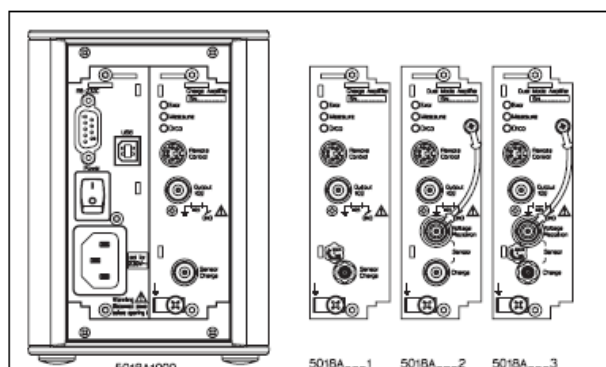


Fig. 2: Différents type de 5018A...

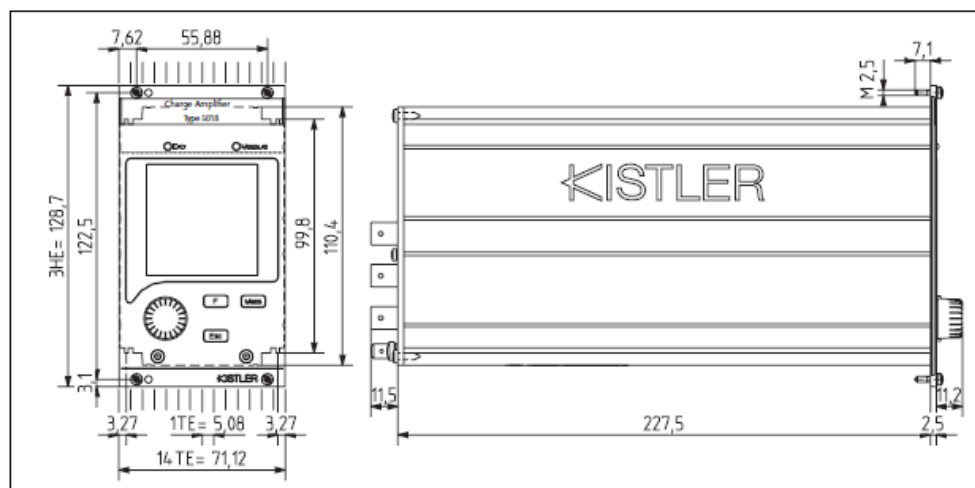


Fig. 3: Type 5018A0... montage en rack 19"

5018A_000-719f-01.10

Accessoires inclus dans la livraison

Amplificateur de charge Type 5018A...

- Câble secteur répondant aux normes du pays d'utilisation
- Câble de connexion USB Type A vers B; longueur 1,8 m Type 5.590.303
- Fiche pour entrée télécommande Type 5.510.305
- Manuel d'instruction et CD-ROM avec driver USB
- Feuille d'étalonnage
- Adaptateur BNC neg. → TRIAX neg. Type 1704A1 (seulement pour les Types 5018A...1 et 5018A...3)

Accessoires Optionnels**Type/Art. No.**

- Câble RS-232C, l = 5 m, null-modem, DB-9P/DB-9S 1200A27
- Câble de connexion BNC pos. – BNC pos. (L = ... m) 1601B...
- Câble de rallonge TRIAX neg. – TRIAX pos. (L = ... m) 1987B...

Configurations du Produit

La référence de désignation complète de l'Amplificateur de Charge est composée de la désignation du type de base 5018A... et de 4 digits additionnels.

La référence de base contient un amplificateur de Charge monovoie (doté d'une entrée de charge pour capteurs piezoelectriques) équipé d'une unité d'affichage ainsi que d'interfaces USB et RS-232C. Les variantes suivantes sont disponibles :

Reference de commandeType 5018A ☐ ☐ ☐ ☐

Version module enfichable 19" selon DIN 41494; hauteur 14 TE et largeur 3 HE	0
Version appareil de table avec étrier support	1
Interface USB et RS-232C	0
Amplificateur de charge réglé sur Alim* 230 VAC	0
Amplificateur de charge réglé sur Alim* 115 VAC	1
Amplificateur de charge avec entrée BNC	0
Amplificateur de charge avec entrée TRIAX (PiezoSmart®)	1
Amplificateur de charge avec entrée BNC et entrée tension pour capteur avec circuit Piezotron® intégré	2
Amplificateur de charge avec entrée TRIAX (PiezoSmart®) et entrée tension pour capteur avec circuit Piezotron® intégré	3

* Le réglage de la Tension d'alimentation peut être changé à tout moment.

5018A_000-719f-01.10



Advanced Test Equipment Corp.
www.atecorp.com 800-404-ATEC (2832)



Model 2311 Signal Conditioning Amplifier

Description

While the Model 2311 provides wider frequency response and more versatile excitation, both 2310 and 2311 Signal Conditioner/Amplifier Modules accept inputs from strain gages, load/pressure/dc displacement transducers, potentiometers, thermocouples, RTD's and nickel temperature sensors, without any internal modification.

Controls on the 2311 are arranged in sections, permitting easy setup. Clearly marked push-button and single-purpose switches minimize the possibility of operator error during use. With the exception of the playback switch, all operational and monitor controls are on the front panel. Switches for selecting remote sense and specific shunt calibration configurations are located on the printed circuit board inside the unit.

Front Panel

Galvanometer: Electronic adjustment for zero positioning and span of the galvanometer, remote from recorder.

Calibration: Momentary two-position switches, $\pm A$ and $\pm B$, control shunt calibration levels; 4 point.

LED Display: Set up indicator for amplifier balance, bridge balance and for monitoring the output polarity.

Filter Section: Push-button controls for activating appropriate low-pass active filter, or selecting wide-band operation (WB).

Electronic Bridge Balance Section: Three-position switch--OFF, ON, RESET--for electronic bridge balance; auto ranging up to $\pm 25\,000$ microstrain with nonvolatile zero storage; yellow light indicates high-range operation or



overrange condition. Vernier TRIM control is used to refine bridge balance when desired.

AC IN: Capacitive coupling in the amplifier; eliminates static component of the signal.

Bridge Excitation: ON-OFF switch for removing bridge excitation from the strain gage or transducer.

Amplifier Balance: Adjusts any amplifier offset.

Excitation Level: Twelve-position switch; values arranged for doubling power with each step. Also, variable setting: 0.4 to 6 Vdc.

Amplifier Gain Section: Continuously variable potentiometer (1.00 to 11.00) plus push-button multipliers control amplifier gain; direct-reading.

Battery Test: Momentary push button determines battery level for bridge zero storage.

Main Power: Turns unit on/off; LED pilot light.

Pin Jacks: Monitoring of EXCITATION.

Rear Panel



AC Line Switch: Selects nominal 115 or 230 Vac operation. Recessed to eliminate inadvertent movement.

Tape Playback Section: Slide switch activates magnetic tape-playback operating mode. Connects the input to the filter circuits and post amplifiers. BNC input connector.

Magnetic Tape Output: Full-scale $\pm 1.4\text{V}$ level available at this BNC connector for driving magnetic tape recorder.

High-Level Output: Full-scale $\pm 10\text{V}$ level available at this BNC connector for driving an oscilloscope, DPM, ADC, etc.

Output Receptacle: All three outputs available at this connector for those who prefer to hard wire their connections (*mating plug included*). Outputs are 75 mA for galvanometers, $\pm 1.4\text{V}$, and $\pm 10\text{V}$.

Input Receptacle: All sensor inputs made through this 15-pin quarter-turn connector. Pin selection determines mode of operation (*mating plug included*).

Power Connector: Main power input from the rack adapter, portable enclosure or individual line plug. Additional pins for optional remote operation of shunt calibration, bridge excitation (ON/OFF), and electronic bridge balance.

Specifications

All specifications nominal or typical at +23 deg C unless noted.

Input

Strain Gages:

Quarter(120 ohms or 1000 ohms and 350 ohms), half or full bridge (50 to 1000 ohms). Dummy resistors installed.

Transducers:

Foil or piezoresistive strain gage types.

Potentiometer.

DCDT displacement transducer.

Excitation

12 settings:

Variable setting: 0.4 to 6 Vdc, 0.7, 1, 1.4, 2, 2.7, 3.5, 5, 7, 10, 12 and 15 Vdc $\pm 1\%$, max.

Current:

0-100 mA, limited at 175 mA, max.

Regulation (0-100 mA, $\pm 10\%$ line change):

± 0.5 mV $\pm 0.04\%$, max measured at remote sense point. (Local sense: -5 mV, typical, at 100 mA, measured at plug.)

Remote Sense Error:

0.0005%/ohms of lead resistance (350 ohm load).

Noise and Ripple:

0.05% p-p, max (dc to 10 kHz).

Stability:

0.02%/deg C.

Level:

Normally symmetrical about ground; either side can be grounded with no effect on performance.

Bridge Balance:

Method:

Counter-emf injection at preamp; automatic electronic; dual range; can be disabled on front panel.

Ranges (auto ranging):

+5000 microstrain (1% bridge unbalance or 2.5 mV/V), resolution 2.5

microstrain (0.0012 mV/V).
±25 000 microstrain (5% bridge unbalance or 12.5 mV/V), resolution 12.5
microstrain (0.006 mV/V).

Balance Time:
2 seconds, typical.

Manual Vernier Balance:
±50 microstrain (±0.025 mV/V).

Interaction:
Essentially independent of excitation and amplifier gain.

Storage:
Digital; up to 2 years without line power.

Shunt Calibration:

Circuit (2-level, dual polarity):

Single-shunt (for stress analysis) across any bridge arm, including
dummy gage.

Double-shunt (for transducer) across opposite bridge arms.

Provision for 4 dedicated leads to shunt external arms.

Cal circuit selected by switches on PC board.

Standard Factory-Installed Resistors (±0.1%) Simulate:

±200 and ±1000 microstrain at GF=2 across dummy half bridge;
+1000 microstrain at GF=2 across dummy gage (120 and 350 ohm);
±1 mV/V (double-shunt) for 350 ohm transducer.

Remote-Operation Relays (Option Y):

4 relays (plus remote-reset relay for bridge balance and relay for excitation
on/off). Each requires 10 mA at 5 Vdc, except excitation on/off 25 mA.

Amplifier:

Gain:

1 to 11 000 continuously variable. Direct-reading.
±1% max of reading.

Ten-turn counting knob (X1 to X11) plus decade multiplier (X1 to X1000).

Frequency Response (all gains full output):

dc coupled: dc to 50 kHz, -0.5 dB max.

dc to 125 kHz, -3 dB max.

ac coupled: 1.7 Hz to 125 kHz, -3 dB max.

Frequency Response, Reduced Output (2 Vrms max):

Bandwidth (-3 dB) at Gain of: 1-11, 200 kHz; 10-110, 170 kHz;
100-1100, 135 kHz; 1000-11 000, 125 kHz.

Input Impedance:

100 megohms, min, differential or common-mode, including bridge balance circuit.

Bias Current:

± 50 nA, typical each input.

Source Impedance:

0 to 1000 ohms each input.

Common-Mode Voltage:

± 10 V.

Common-Mode Rejection (gain over X100):

Shorted input: 100 dB, min, at dc; 90 dB, min, dc to 1 kHz.

350 ohms balanced input: 90 dB, typical, at 1 kHz.

Stability (gain over X100):

± 2 microvolts/deg C, max, referred to input (RTI).

Noise (gain over X100, all outputs):

0.01 to 10 Hz: 1 microvolt p-p RTI.

0.5 Hz to 125 kHz: 5 microvolts rms, max, RTI.

Filter:

Characteristic:

Low-pass active 2-pole Butterworth standard.

Frequencies (-3 $\pm$ 1 dB):

10, 100, 1000 and 10 000 Hz and wide-band.

Outputs Filtered:

Any 1 or 2 or all (switch-selected on PC board).

Amplifier Outputs:

Standard Output:

± 10 V at 5 mA, min.

Enregistreur



Specifications

Bridge 1M Iso Digitizer

Analog Input Section	
Number of Channels	4
Input Type	Fully isolated bridge or fully isolated full differential, software selectable
Input Connectors	Lemo 16-pin, mating connector: FG2B316CLA52
Input Ranges	$\pm 2 \text{ mV}$, $\pm 5 \text{ mV}$, $\pm 10 \text{ mV}$, $\pm 20 \text{ mV}$, $\pm 50 \text{ mV}$, $\pm 100 \text{ mV}$, $\pm 200 \text{ mV}$, $\pm 500 \text{ mV}$, $\pm 1 \text{ V}$, $\pm 2 \text{ V}$, $\pm 5 \text{ V}$, $\pm 10 \text{ V}$
Gain	5000, 2000, 1000, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1
Offset	1000 steps (0.1 %)
Input Coupling	AC ($\sim 3 \text{ dB}$ @ 1.6 Hz), DC, GND
Input Impedance	$2 \times 10 \text{ M}\Omega // 130 \text{ pF}$
Analog Bandwidth	$> 120 \text{ kHz}$ at maximum gain (ranges $\pm 20 \text{ mV}$), 450 kHz at minimum gain
CMRR	$> 72 \text{ dB}$ @ 100 Hz
CMV	$\pm 10 \text{ V}$ to amplifier ground
Overload Protection	$\pm 50 \text{ V}$ to isolated ground
Number of Slots	35 Volt 1, including signal conditioners

* These are metal foil high-performance instrumentation resistors with a tolerance of 0.1% and a TCR of 0.6 ppm/°C

GENESIS BRIDGE 1M ISO DIGITIZER WITH FULL DIFFERENTIAL MODE

GENESIS HIGH SPEED

Bridge Support	
Completion	Half bridge: $2 \times 10 \text{ k}\Omega$ Quarter bridge*: 350Ω , and user-defined, software selectable, auto balance
Excitation Voltage	Off, $\pm 1.0 \text{ V}$ to $\pm 7.5 \text{ V}$ in 1000 steps, up to 85 mA per channel
Balance Voltage	$\pm 250 \text{ mV}$ max unbalance voltage compensation
Remote Sensing	2 separate sense wires or internal
Excitation Current	Off, 2 mA to 40 mA, 15 V compliance
Shunt Calibration	2 pre-installed calibration resistors* (20 k Ω , 100 k Ω), one user-defined, plus external, shunt to + or - excitation
Wiring Configurations	Two to ten wire incl. driven guard
Isolation	
Channel-to-chassis	50 Volt peak
Channel-to-channel	100 Volt peak
Non-destructive	100 Volt to chassis (earth)
Error and Noise	
Maximum Static Error	0.1 % of FS $\pm 40 \mu\text{V}$
Noise (RMS)	0.02 % of FS $\pm 30 \mu\text{V}$
Acquisition	
Sample Rate	From 1 MS/s to 0.1 S/s
ADC Resolution	16 bit (0.0015 %)
Timebase Accuracy	50 ppm
Anti-Alias Filters	Bypass, Time-, Frequency domain optimized
Time Domain	7-pole Bessel 250 kHz, optimal step response
Frequency Domain	7-pole Butterworth 400 kHz, extended frequency response
Digital Decimation Filters	Off, IIR or FIR
Time Domain	6-pole Bessel style IIR, sample rate divided by 10, 20, 40, 100
Frequency Domain	12-pole FIR, sample rate divided by 4, 10, 20, 40
Transient Memory	
	256 MS per card, shared by enabled channels, 4 channels, 64 MS per channel
Triggering	
Each channel has a dual-level trigger detector with selectable hysteresis, modes and qualifiers.	
Pre- and post-trigger	0 to full memory length
Trigger Rate	Up to 200 triggers per second, zero re-arm time
Resolution	16 bit for each level (= 0.0015 %)
Acquisition	
Sample Rate	From 1 MS/s to 0.1 S/s
ADC Resolution	16 bit (0.0015 %)
Timebase Accuracy	50 ppm
Anti-Alias Filters	Bypass, Time-, Frequency domain optimized
Time Domain	7-pole Bessel 250 kHz, optimal step response
Frequency Domain	7-pole Butterworth 400 kHz, extended frequency response
Digital Decimation Filters	Off, IIR or FIR
Time Domain	6-pole Bessel style IIR, sample rate divided by 10, 20, 40, 100
Frequency Domain	12-pole FIR, sample rate divided by 4, 10, 20, 40
Transient Memory	
	256 MS per card, shared by enabled channels, 4 channels, 64 MS per channel
Triggering	
Each channel has a dual-level trigger detector with selectable hysteresis, modes and qualifiers.	
Pre- and post-trigger	0 to full memory length
Trigger Rate	Up to 200 triggers per second, zero re-arm time
Resolution	16 bit for each level (= 0.0015 %)
StatStream Real-time Analysis	
Each channel includes real-time extraction of Max, Min, Mean, Peak-to-peak, and RMS values.	
Acquisition Modes	
Sweeps	Triggered acquisition to RAM without sample rate limitations; for single or repetitive transients or intermittent phenomena
Continuous	Direct storage to PC or mainframe hard disc without file size limitations; triggered or untriggered; for long duration recorder type applications with up to 1 MS/s rate per channel; (maximum aggregate rate pending from mainframe configuration and PC)
Dual	Combination of Sweeps and Continuous; recorder type streaming to hard disc with simultaneously triggered sweeps in RAM



PR China
HBM Sales Office
Room 2912, Jing Guang Centre
Beijing, China 100020
Tel: +86 10 6597 4006
Email: hbmchina@hbm.com.cn

USA
HBM, Inc.
19 Bartlett Street
Marlborough, MA 01752, USA
Tel: +1 (800) 578 4260
Email: info@usa.hbm.com

UK
HBM United Kingdom
1 Churchill Court, 58 Station Road
North Harrow, Middlesex, HA2 7SA
Tel: +44 (0) 208 515 6100
Email: info@uk.hbm.com

Germany
HBM Sales Office
Carl-Zeiss-Ring 11-13
85737 Ismaning
Tel: +49 89 92 33 33 0
Email: info@hbm.com

France
HBM France SAS
46 rue du Champoux, BP76
91542 Mennecy Cedex
Tel: +33 (0) 69 90 63 70
Email: info@fr.hbm.com

www.hbm.com/highspeed

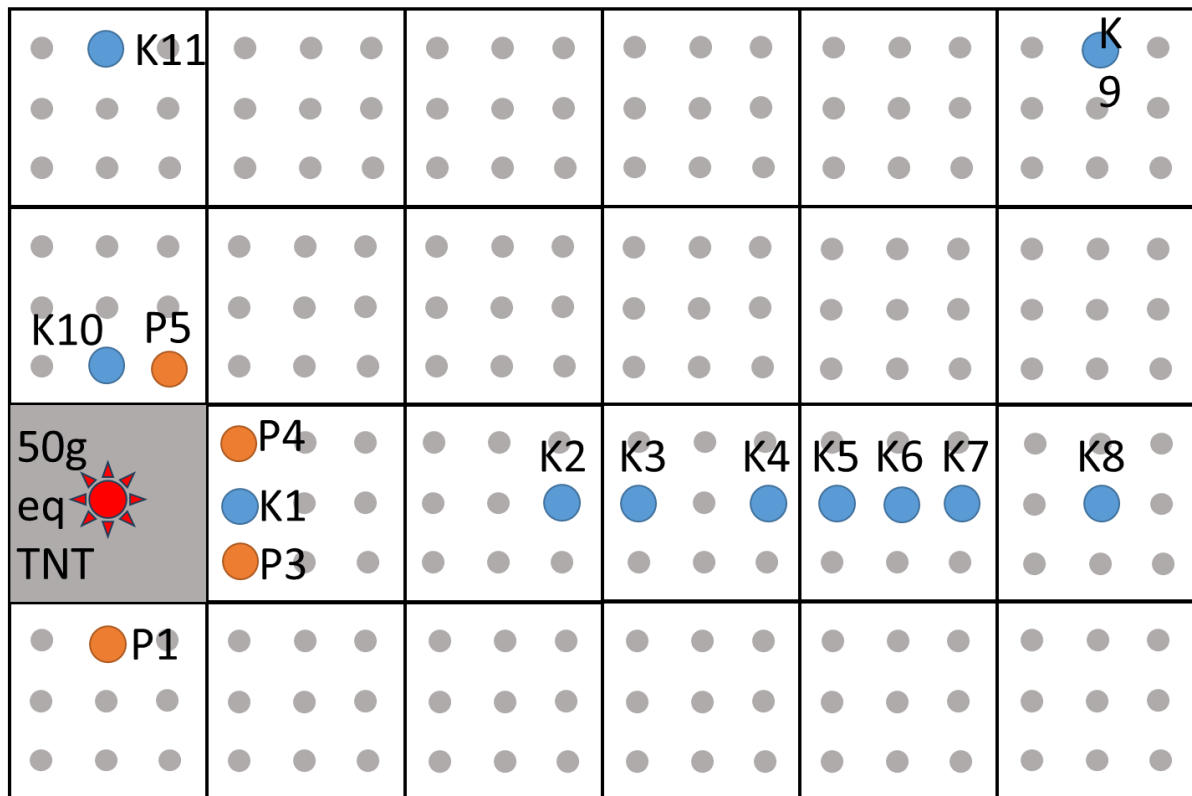
HBM Genesis HighSpeed products were previously sold under the Nicolet brand. The Nicolet brand is owned by Thermo Fisher Scientific Inc. Corporation.

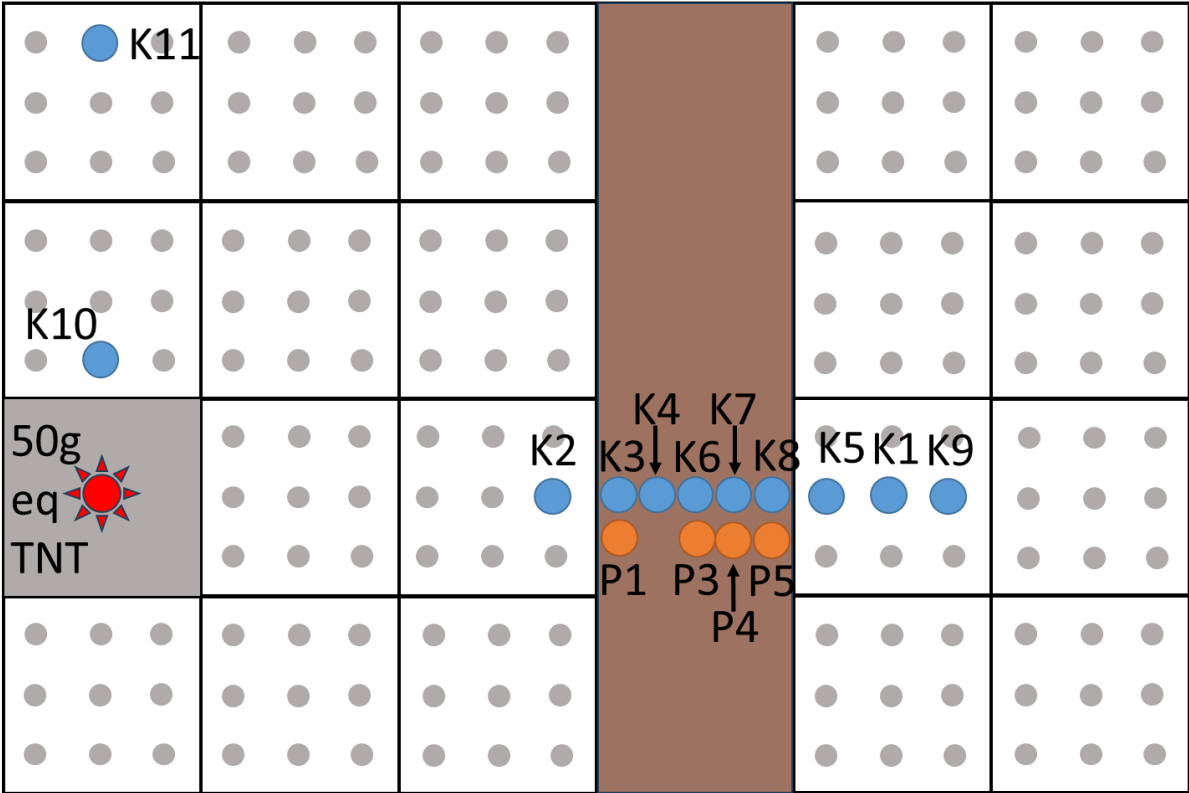
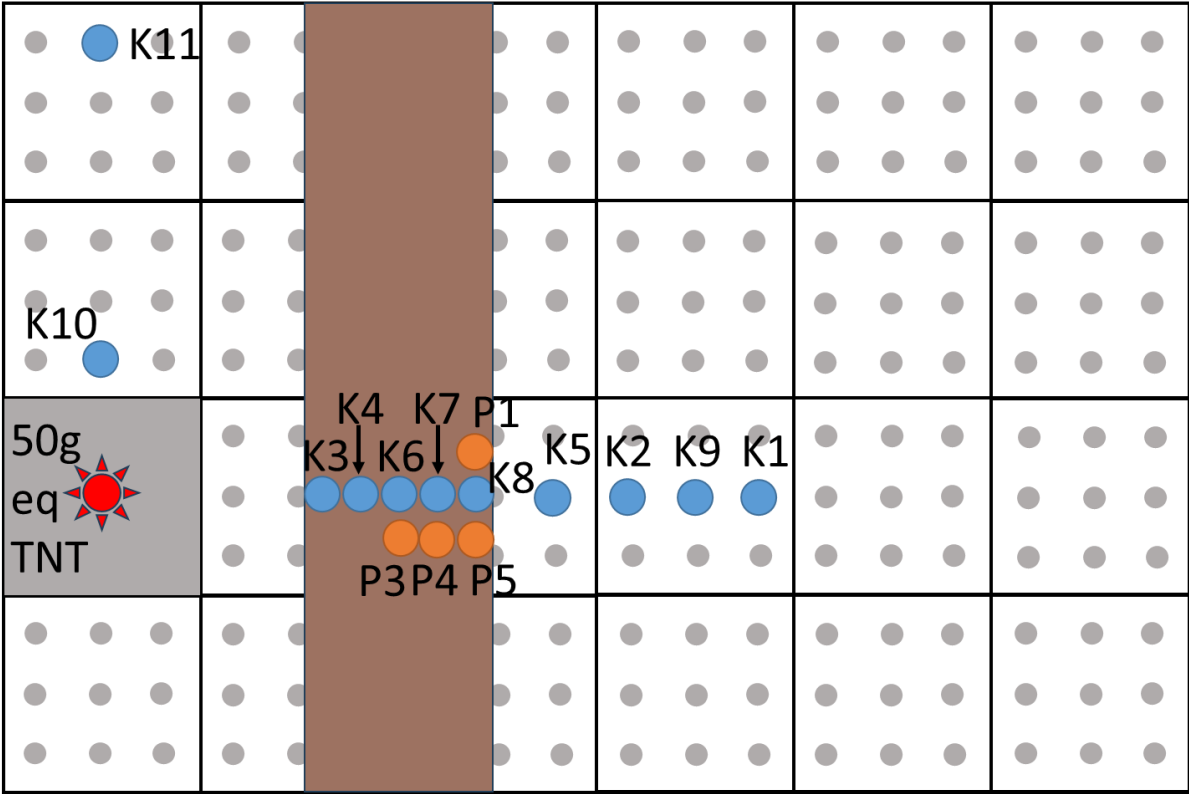
HBM reserves the right to change this document without notice. It provides outline specification only and cannot be used as the basis of any contract.

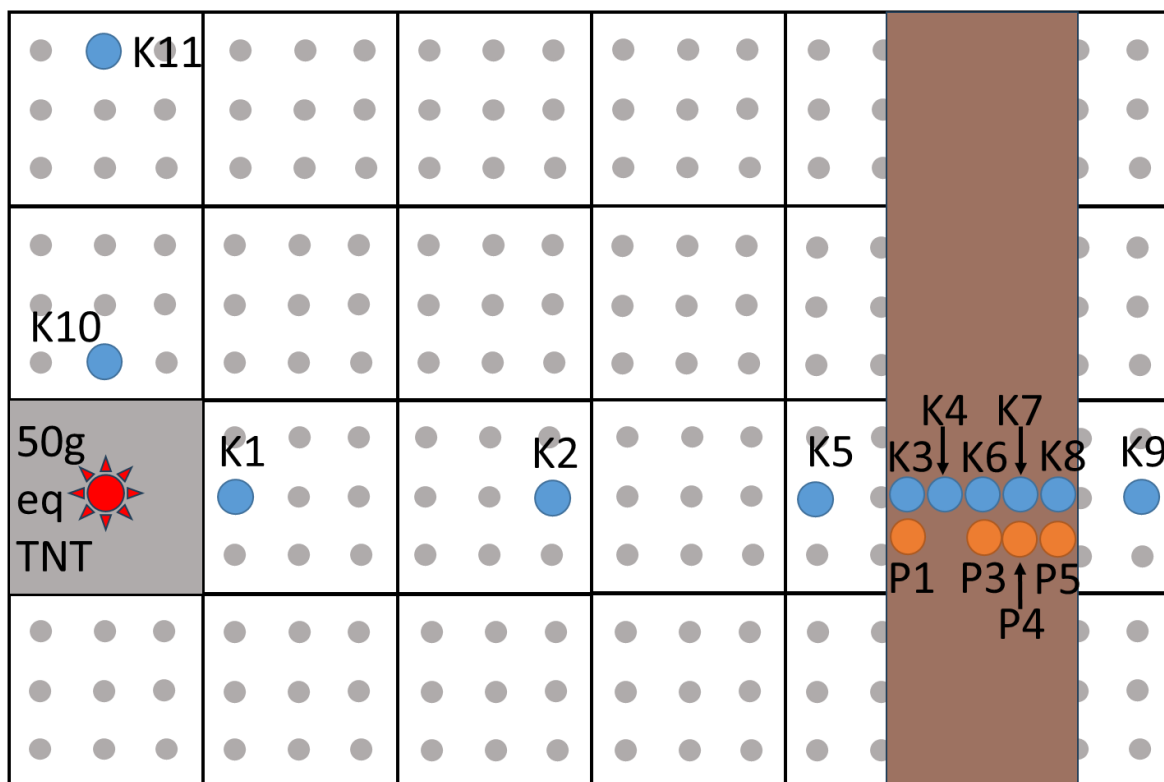
B2639-1.1 en

B. Annexe : Schémas des configurations étudiées à l'IRSN

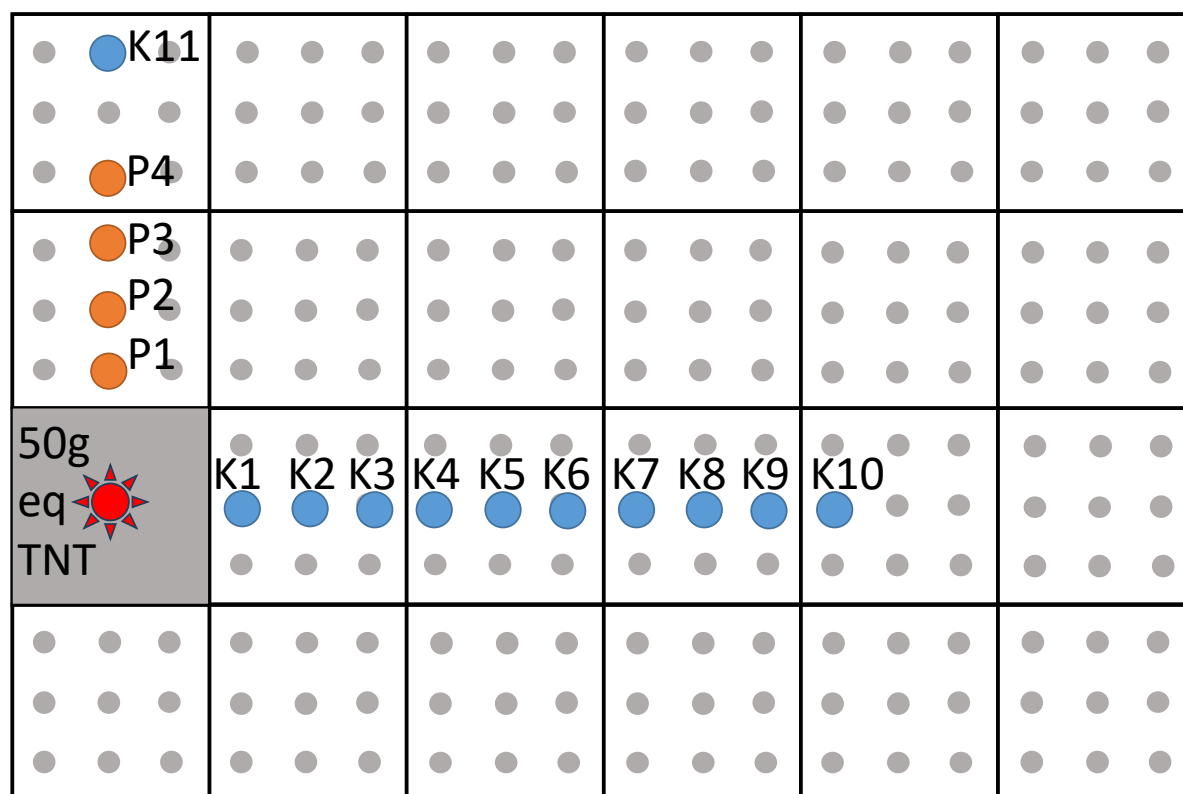
Campagne expérimentale 9 – septembre 2020

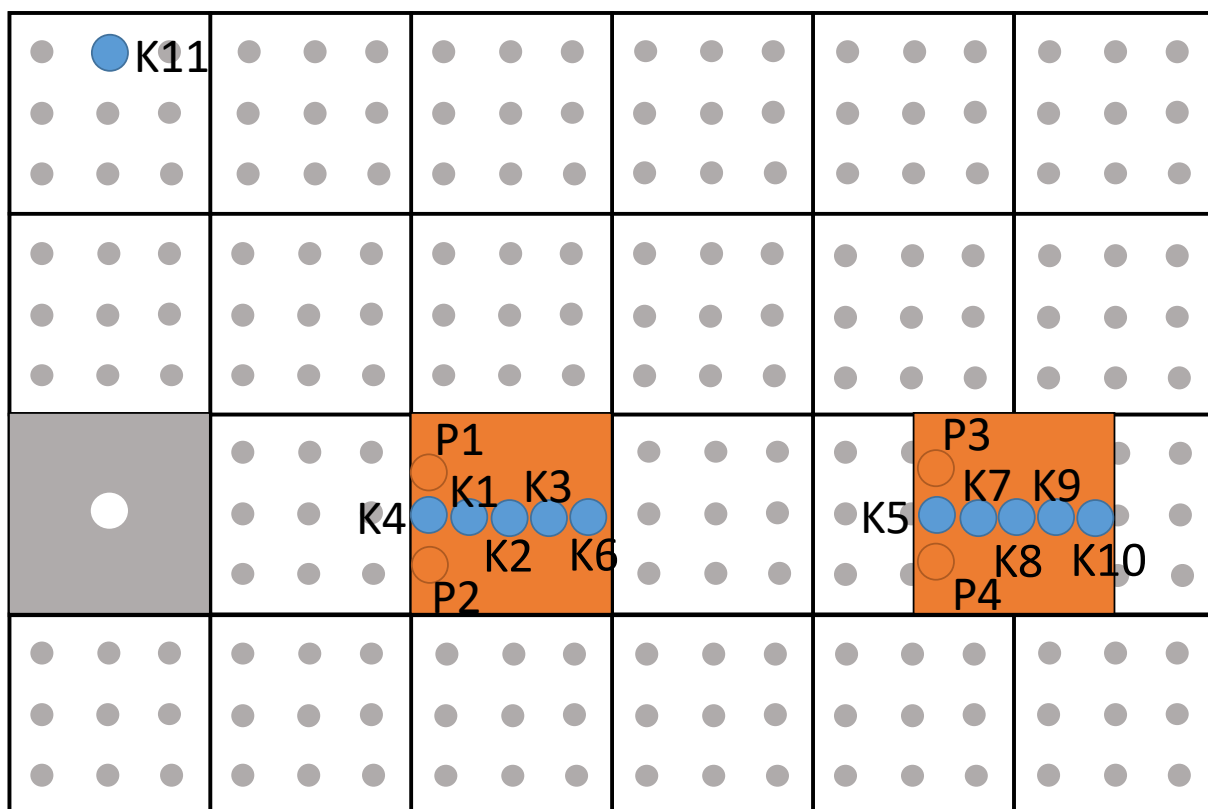
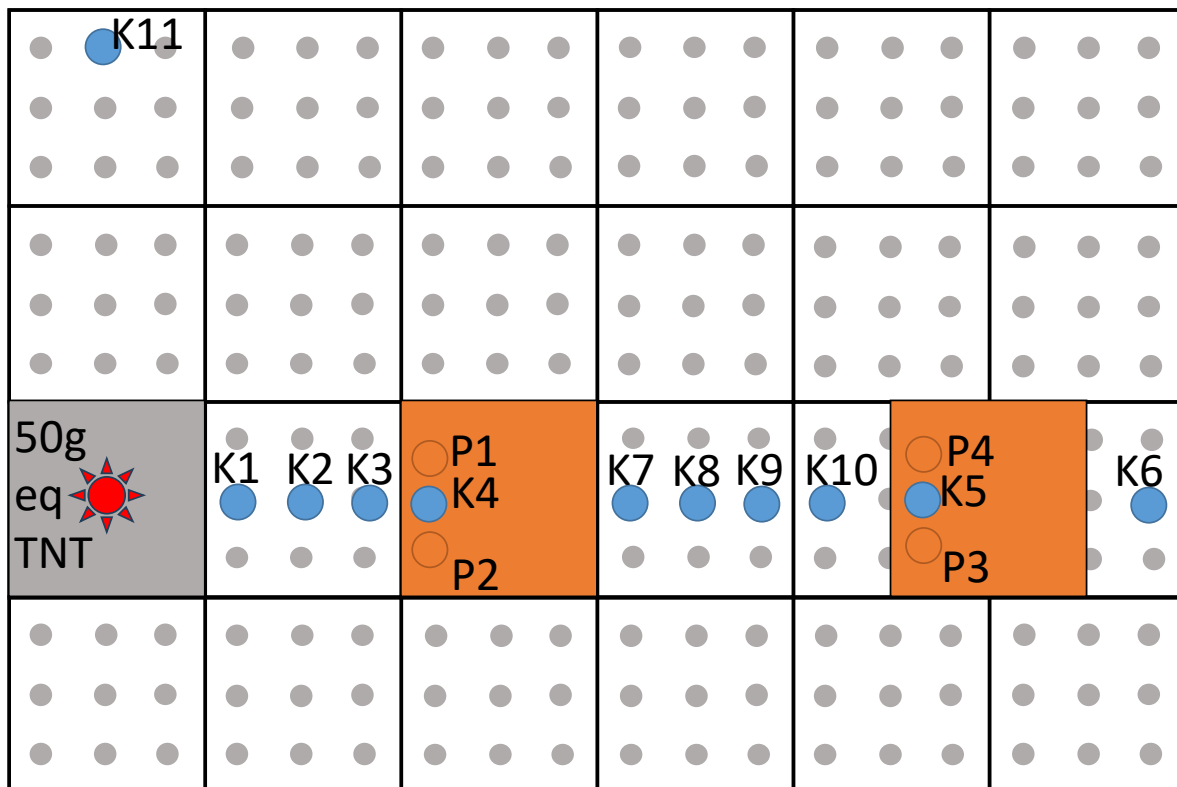


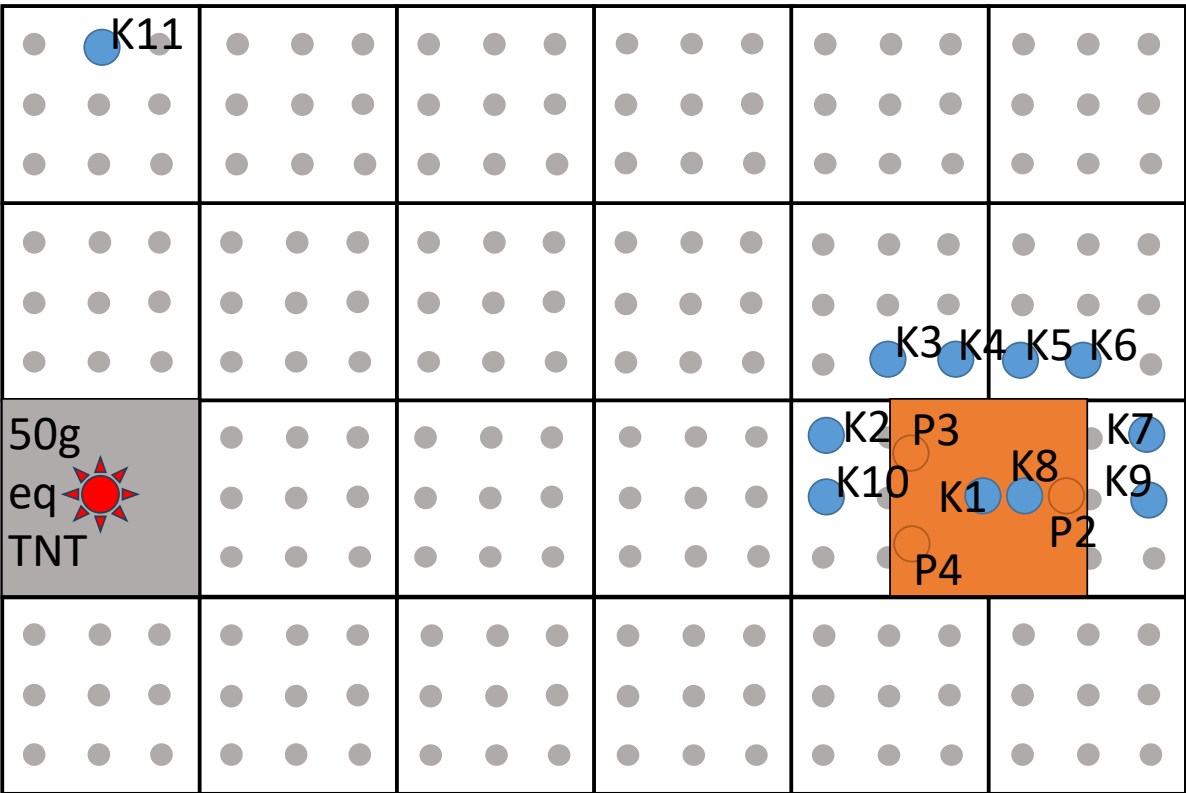
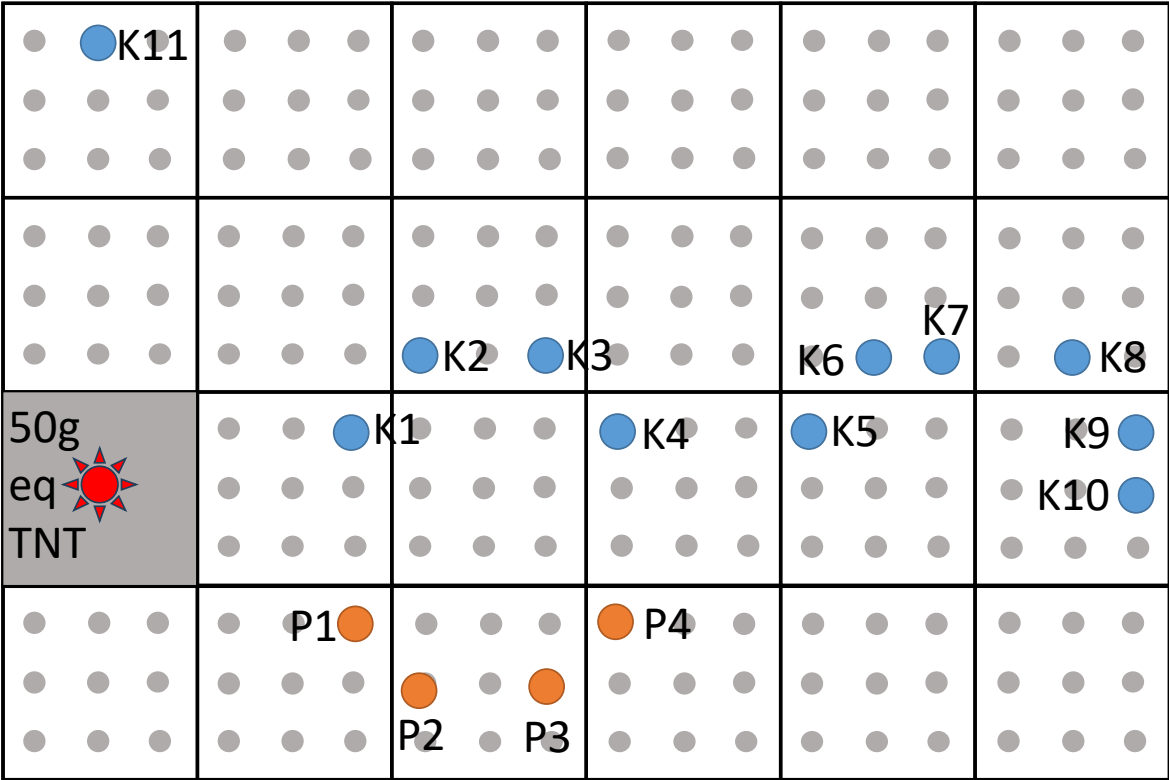


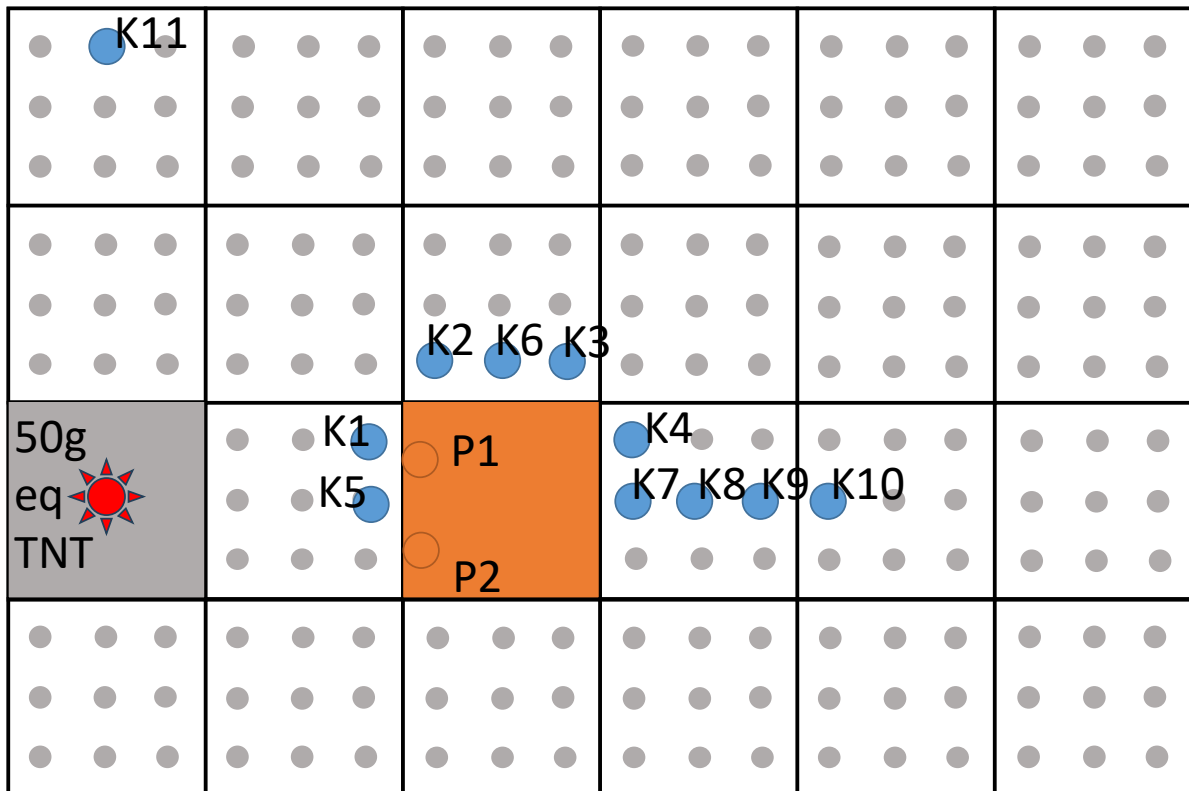
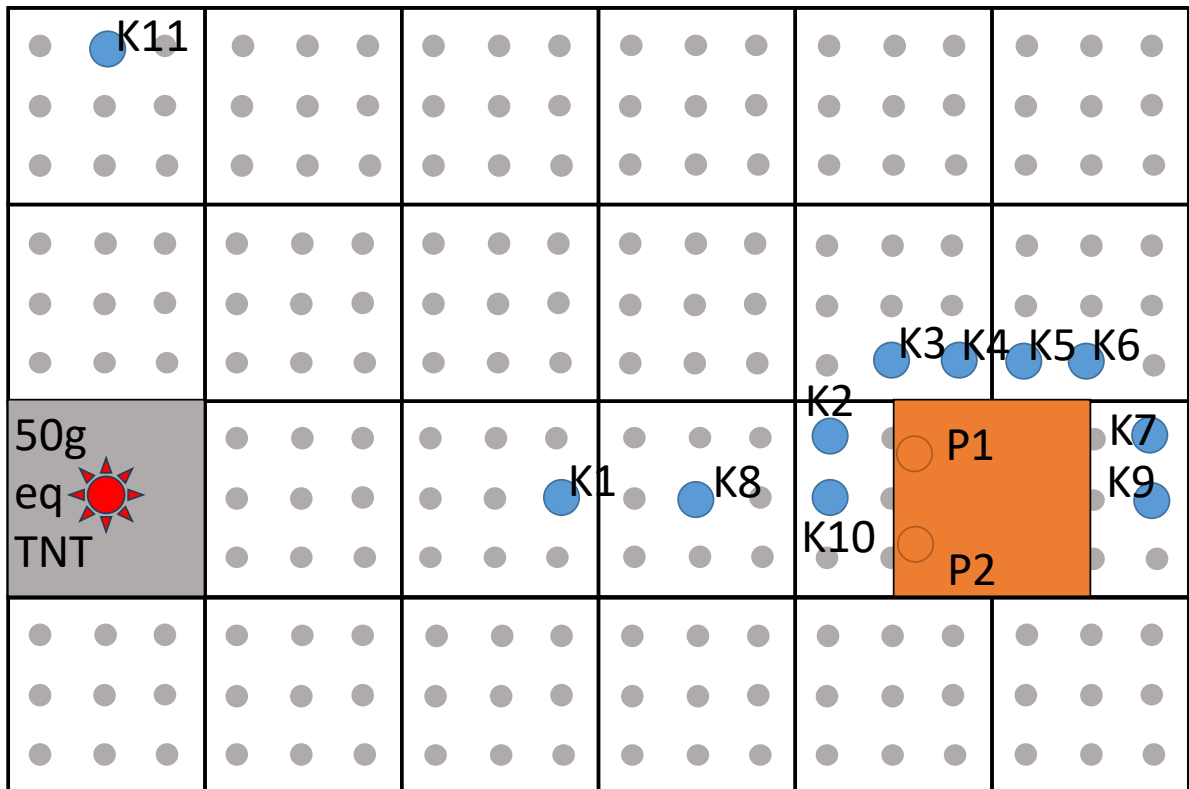


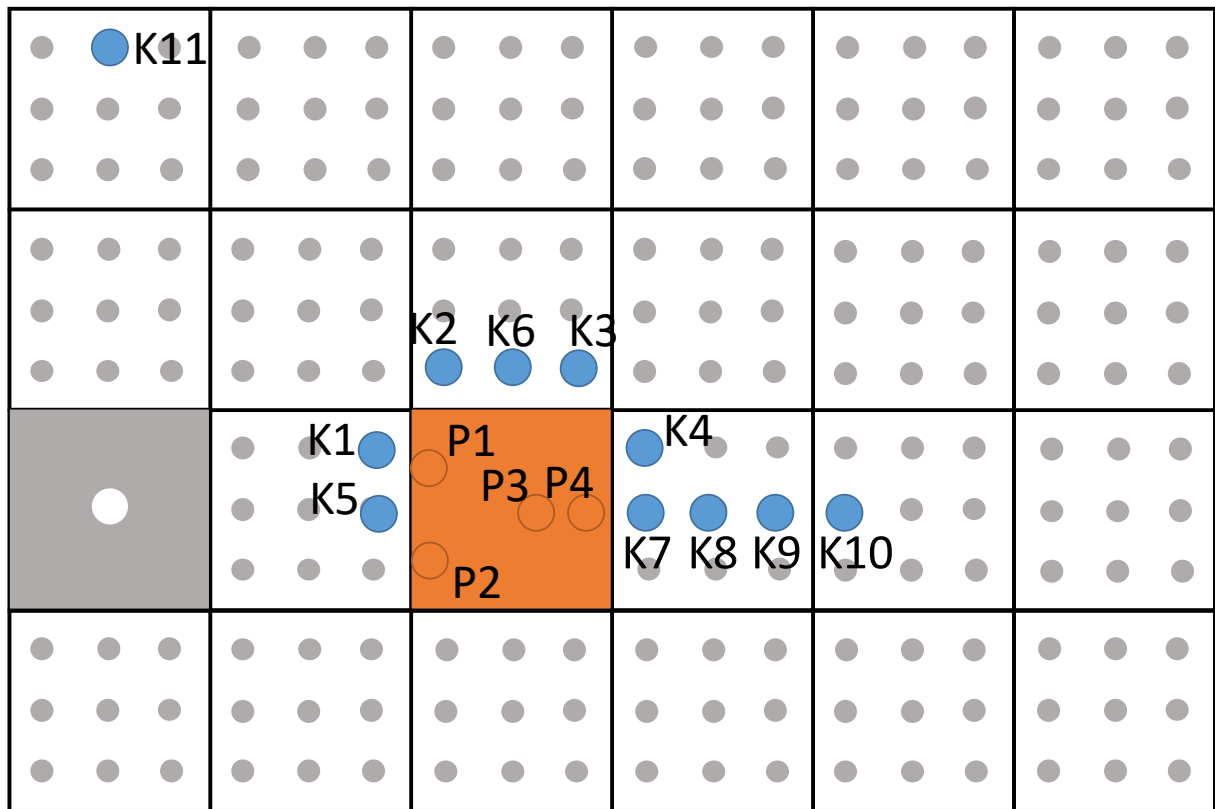
Campagne expérimentale 10 – septembre-octobre 2022











C. Annexe :Fiches techniques des composants des campagnes ISL

Capteurs



Model M102B

ICP® Pressure Sensor

Installation and Operating Manual

For assistance with the operation of this product,
contact PCB Piezotronics, Inc.

Toll-free: 800-828-8840
24-hour SensorLine: 716-684-0001
Fax: 716-684-0987
E-mail: info@pcb.com
Web: www.pcb.com



**OPERATION MANUAL FOR
QUARTZ PRESSURE SENSORS
SERIES 102
SERIES 113**

1

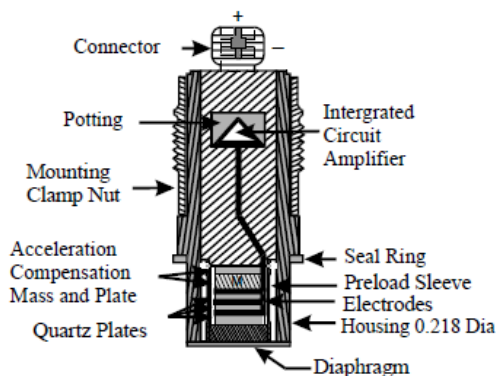
1.0 INTRODUCTION

This series of miniature dynamic pressure sensors is specifically designed for shock tube and blast wave measurements and for other applications requiring very high frequency, near non-resonant response.

The term used to describe the transient response of this model series is "Frequency Tailoring" and it encompasses several mechanical and electrical design features coupled with stringent in-process fabrication/test procedures with heavy emphasis on the shock tube as a tool.

2.0 DESCRIPTION

Although this series consists of sensors with three basic mechanical configurations and six different sensitivities, each model is basically similar in internal design.



Typical ICP® Probe Style Sensor

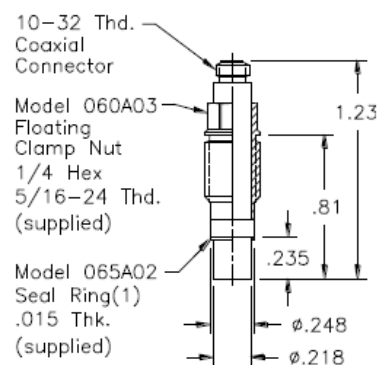
Each utilizes the acceleration-compensated Series 113 quartz piezoelectric element coupled to a source follower type miniature electronics. (See "General Guide to ICP® Instrumentation," G-0001B, for a detailed description of the ICP® concept.)

Drawing Number: 21075
Revision: C
ECN Number: 47023

The figure above shows the components of the basic ICP® probe, i.e. the piezoelectric element and the ICP® source follower amplifier. These components are joined together as an inseparable sealed assembly at the factory. Disassembly should not be attempted in the field.

Series 113B2x are in a probe configuration and are installed with a hollow clamp nut with 5/16-24 external threads. The housing of these models is at electrical ground potential.

Series 113B3x are similar to the B2x Series with an additional feature; all Invar construction. The all Invar sensors are designed to have minimal susceptibility to thermal transient events and are specifically suited for high-temperature shock and blast measurements.



Series 113: Probe Style Sensor

Series 102 consist of the basic 113 Series probe, as in the above mentioned series, mounted in a 3/8-24 threaded mounting adaptor. The probe is installed at the factory in an "off ground" configuration, i.e. the probe body is insulated from the external mounting adaptor body.

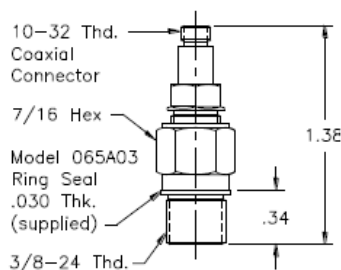
The Model 102A12 utilizes the same inner probe design as the above two designs but in a 3/8-24

**OPERATION MANUAL FOR
QUARTZ PRESSURE SENSORS
SERIES 102
SERIES 113**

2

threaded adaptor with floating clamp nut to allow adjustment of diaphragm mounting depth where it is necessary to adapt to various wall thicknesses. These models are supplied only as low-pressure (250 psi and 100 psi) sensors and are also "off ground".

Models 102A21 and 102A22 are high-temperature ICP[®] versions to 400 °F (204 °C), with a 3/8-24 straight threads adaptor and 1/8-27 NPT adaptor, respectively.



Series 102: Thread Mount Design, Ground-Isolated Sensor

3.0 INSTALLATION

This manual contains outline and installation information for your specific model.

Prepare mounting ports in accordance with instructions given in specific installation drawings, paying particular attention to sealing surfaces. These surfaces must be smooth and free from chatter marks, nicks and other irregularities which could preclude a pressure tight seal.

To fully realize the high-frequency response capabilities of this sensor series, flush mounting of the diaphragm must be used.

In some cases, where flash temperatures such as those generated by blasts and shock fronts are present, it may be necessary to thermally insulate the diaphragm to minimize signals generated by these effects.

Drawing Number: 21075
Revision: C
ECN Number: 47023

Common black vinyl electrical tape has been found to be an effective insulating material in many cases. One or more layers may be used across the end of diaphragm and adaptor.

A silicone rubber coating approximately .010" thick has also been proven effective in many applications. General Electric RTV type 106 is recommended. Apply the rubber coating to the surface of the diaphragm and allow it to cure in accordance with the manufacturer's instructions. (If you have ordered the CA option, ablative coated models, further protection will not be necessary.)

Although ICP[®] sensors have low-output impedance and in general are not affected by moisture, in extreme environments it is good practice to protect cable connections with shrink tubing.

It is not necessary to use low-noise cable with this sensor series. In fact, an optional Model 070B09 Solder Connector Adaptor allows the use of ordinary two-wire cable if desired.

4.0 OPERATION

It is only necessary to supply the sensor with a 2 to 20 mA constant current at +20 to +30 VDC through a current-regulating diode or equivalent circuit. (See guide G-0001B for powering and signal utilization information pertaining to all ICP[®] instrumentation).

Most of the signal conditioners manufactured by PCB have an adjustable current feature allowing a choice of input currents from 2 to 20 mA. In general, for lowest noise (best resolution), choose the lower current ranges. For driving long cables (to several thousand feet), use higher current, up to 20 mA maximum.

To operate system using a PCB signal conditioner:

1. Switch power on.
2. Wait several minutes for the IC amplifier to turn on and stabilize.
3. Proceed with measurements.

**OPERATION MANUAL FOR
QUARTZ PRESSURE SENSORS
SERIES 102
SERIES 113**

3

5.0 POLARITY

The sensors in this series produce a positive-going output voltage for increasing pressure input.

calibrator or dead weight tester and readout is by recorder or storage oscilloscope.

PCB offers a complete calibration service. Consult factory for details.

6.0 LOW-FREQUENCY RESPONSE

The low-frequency response of an ICP® system is determined by:

1. The discharge T.C. of the sensor
2. If AC-coupled at power unit, the coupling time constant.

Consult Section 7.0 in guide G-0001B detailed explanation of low-frequency characteristics of ICP® instruments.

7.0 HIGH-FREQUENCY RESPONSE

Frequency tailoring and the very high-natural frequency of the sensor give an extremely wide usable frequency range (beyond 100 kHz). Exceptionally fast response time (1 μsec) and clean, virtually non-resonant response to rapid step functions are also features of these sensors. As mentioned previously, the diaphragm must be flush-mounted to fully realize the high-frequency response capabilities of this series.

8.0 CALIBRATION

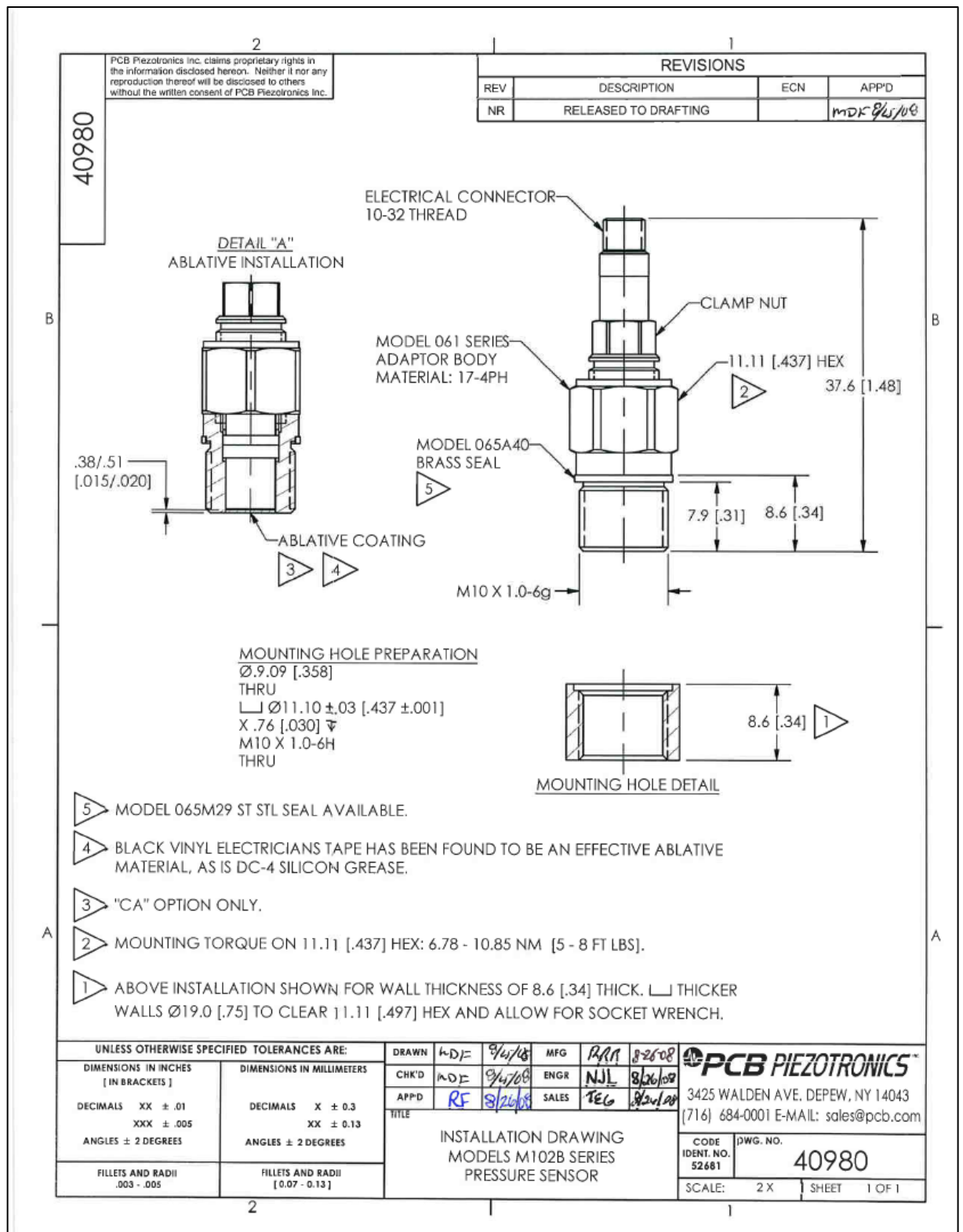
Piezoelectric sensors are dynamic devices, but static calibration means can be employed if discharge time constants are sufficiently long. Generally, static methods are not employed below several hundred seconds time constant.

®ICP is a registered trademark of PCB Piezotronics

To employ static means, direct couple the sensor to the DVM readout using a T-Connector from the sensor jack or use the Model 484B in the calibrate mode. Apply pressure with dead weight tester and take readings quickly. Release pressure after each calibration point.

For the shorter time constant, rapid step functions of pressure are generated by a pneumatic pressure pulse
Drawing Number: 21075
Revision: C
ECN Number: 47023

Model Number 102B		Revision: C ECN #: 34651	
Performance Measurement Range(for ±5V output) Useful Overrange(for ±10V output) Sensitivity(± 10 %) Maximum Pressure(static) Resolution Resonant Frequency Rise Time(Reflected) Low Frequency Response(±5 %) Non-Linearity Environmental Acceleration Sensitivity Temperature Range(Operating) Temperature Coefficient of Sensitivity Maximum Flash Temperature Maximum Shock Electrical Output Polarity(Positive Pressure) Discharge Time Constant(at room temp) Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Electrical Isolation Physical Sensing Geometry Sensing Element Housing Material Diaphragm Sealing Electrical Connector Weight		OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used. CA - Ablative Coating H - Hermetic Seal M - Metric Mount N - Negative Output Polarity S - Stainless Steel Diaphragm W - Water Resistant Cable Welded Hermetic Sealing	
ENGLISH 5 kpsi 10 kpsi 1.0 mV/psi 15 kpsi 20 mpsi ≥ 500 kHz ≤ 1.0 μ sec 0.001 Hz ≤ 1.0 % FS ≤ 0.002 psi/g -100 to +275 °F ≤ 0.03 %/°F 3000 °F 20,000 g pk Positive ≥ 500 sec 20 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤ 100 ohm 8 to 14 VDC 10 ⁸ ohm Compression Quartz Stainless Steel Invar Welded Hermetic 10-32 Coaxial Jack 0.44 oz		SI 34,500 kPa 69,000 kPa 0.15 mV/kPa 103,000 kPa 0.14 kPa ≥ 500 kHz ≤ 1.0 μ sec 0.001 Hz ≤ 1.0 % FS ≤ 0.0014 kPa/(m/s ²) -73 to +135 °C ≤ 0.054 %/°C 1650 °C 196,000 m/s ² pk Positive ≥ 500 sec 20 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤ 100 ohm 8 to 14 VDC 10 ⁸ ohm Compression Quartz Stainless Steel Invar Welded Hermetic 10-32 Coaxial Jack 12.5 gm	
NOTES: [1] Typical. [2] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [3] Zero-based, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.		SUPPLIED ACCESSORIES: Model 065A03 Seal ring 0.435" OD x 0.377" ID x 0.030" thk brass (3)	
Entered: <i>pmw</i> Engineer: <i>mpg</i> Sales: <i>pmw</i> Approved: <i>pb</i> Date: <i>12/31/10</i> Date: <i>12/31/10</i> Date: <i>12/31/10</i>		Spec Number: 40708	
			
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.		3425 Valden Avenue, Depew, NY 14043 Phone: 716-684-0001 Fax: 716-686-9129 E-Mail: pressure@pcb.com	



Model Number 113B28		ICP® PRESSURE SENSOR		Revision: D ECN # 44078
Performance Measurement Range(for ±5V output) Useful Overrange(for ± 10V output) Sensitivity(± 15 %) Maximum Pressure Resolution Resonant Frequency Rise Time Low Frequency Response(±5 %) Non-Linearity Environmental Acceleration Sensitivity Temperature Range(Operating) Temperature Coefficient of Sensitivity Maximum Flash Temperature Maximum Vibration Maximum Shock Electrical Discharge Time Constant(at room temp) Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Physical Sensing Geometry Sensing Element Housing Material Diaphragm Sealing Electrical Connector Weight(with clamp nut)		ENGLISH 50 psi 100 psi 100 mV/psi 1000 psi 0.001 psi ≥ 500 kHz ≤ 1.0 μ sec 0.5 Hz ≤ 1.0 % FS ≤ 0.002 psig -100 to +275 °F ≤ 0.03 %/°F 3000 °F 2000 g pk 20,000 g pk ≥ 1.0 sec 22 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤100 Ohm 8 to 15 VDC Compression Quartz 17-4 Stainless Steel Invar Welded Hermetic 10-32 Coaxial Jack 0.16 oz  ^[4] <i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</i>		SI 344.7 kPa 689.4 kPa 14.5 mV/kPa 6895 kPa 0.007 kPa ≥ 500 kHz ≤ 1.0 μ sec 0.5 Hz ≤ 1.0 % FS ≤ 0.0014 kPa/(m/s ²) -73 to +135 °C ≤ 0.054 %/°C 1649 °C 19,614 m/s ² pk 196,140 m/s ² pk ≥ 1.0 sec 22 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤100 Ohm 8 to 15 VDC Compression Quartz 17-4 Stainless Steel Invar Welded Hermetic 10-32 Coaxial Jack 4.5 gm
OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used. E - Enralon coating Coating Electrical Isolation Supplied Accessory : Model 065A08 Isolation ring 0.250"OD x 0.218" ID x 0.027" thk anodized aluminum (3) Supplied Accessory : Model 065A22 Isolation Seal, .250" OD x .218" ID x .015", Torton or Vespel (3) H - Hermetic Seal Sealing Supplied Accessory : Model 065A03 Clamp nut, 5/16-24-2A thd, 1/4" hex, stainless steel (1) J - Ground Isolated N - Negative Output Polarity S - Stainless Steel Diaphragm Diaphragm Supplied Accessory : Model 060A03 Clamp nut, 5/16-24-2A thd, 1/4" hex, stainless steel (1) W - Water Resistant Cable Supplied Accessory : Model 060A05 Clamp nut M7 x 0.75-6g thd (1) WM - Water Resistant Cable Supplied Accessory : Model 060A05 Clamp nut M7 x 0.75-6g thd (1) NOTES: [1]For +10 volt output, minimum 26 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [2]Typical. [3]Zero-based, least-squares, straight line method. [4]See PCB Declaration of Conformance PS023 for details. [5]For sensor mounted in thread adaptor, see adaptor installation drawing for supplied accessories. [6]Used with optional mounting adaptor. [7]Clamp nut installed prior to cable attachment		SUPPLIED ACCESSORIES: Model 060A03 Clamp nut, 5/16-24-2A thd, 1/4" hex, stainless steel (1) Model 060A05 Clamp nut M7 x 0.75-6g thd (1) Model 065A02 Seal ring, sensor flush mount, 0.248" OD x 0.219" ID x 0.015" thk, brass (3) Model 065A05 Seal sleeve sensor recess mount 0.248" OD x 0.221" ID x 0.240" thk 17-4 (1)		
Entered: AP		Engineer: RPF	Sales: RWM	Approved: RPF
Date: 4/9/2015		Date: 4/9/2015	Date: 4/9/2015	Date: 4/9/2015
Spec Number:		40624		



PCB PIEZOTRONICSTM
3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043

Phone: 716-684-0001
Fax: 716-684-0987
E-Mail: info@pcbc.com


PCB PIEZOTRONICS
 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043
 Phone: 716-684-0001
 Fax: 716-684-0987
 E-Mail: info@pcb.com



Model 137A23
ICP® Pressure Sensor
Installation and Operating Manual

For assistance with the operation of this product,
contact PCB Piezotronics, Inc.

Toll-free: 800-828-8840
24-hour SensorLine: 716-684-0001
Fax: 716-684-0987
E-mail: info@pcb.com
Web: www.pcb.com



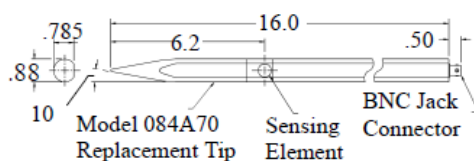
**OPERATION MANUAL FOR
FREE FIELD BLAST PRESSURE PROBE
Models 137A21, A22, A23**

1

1.0 INTRODUCTION

The Series 137A20 Free Field Blast ICP® Pressure Probe is designed for measuring field blast and shock tunnel pressure time profiles.

Designed with an ICP® built-in source follower amplifier, the 137A20 Series offers sensitivities of 1, 10 and 100 mV/psi with full-scale ranges from 0 to 50, 500 or 5000 psi. The 137A20 Series is constructed with a stable quartz piezoelectric element in an Invar housing



Series 137A20: Free Field Blast Pencil Probe

2.0 INSTALLATION

In field blast measurements, mount the Series 137A20 incident pressure probe in an axial direction to the blast source with the sensing surface of the probe in a vertical plane.

In some cases, where flash temperatures such as those generated by blasts and shock fronts are present, it may be necessary to thermally insulate the diaphragm to minimize signals generated by these effects.

Common black vinyl electrical tape has been found to be an effective insulating material in many cases. One or more layers may be used across the end of diaphragm and adaptor.

A silicone rubber coating approximately .010" thick has also been proven effective in many applications. General Electric RTV type 106 is recommended. Apply the rubber coating to the surface of the diaphragm and allow it to cure in accordance with the manufacturer's instructions. (If you have ordered the ablative coated models, further protection will not be necessary.)

3.0 OPERATION

Using suitable cable, connect the sensor to one of PCB's Series 480, 481, 482, 483, or 484 signal conditioners or equivalent power supply. If using a PCB line power unit, the equipment will supply the 137A20 with a 2 to 20 mA constant current at +20 to +30 VDC through a current-regulating circuit. If using a battery-operated unit, the constant current is 2 mA. See Guide G-0001B for powering and signal utilization information pertinent to all ICP® instrumentation.

Switch power on and observe reading of bias monitoring voltmeter on front panel of signal conditioner.

If indicator is in green section of indicator panel, the IC amplifier is producing proper bias (8 to 14 VDC), the cable connections are normal, and the system is ready to operate.

If the pointer moves into the red area of the fault monitor meter, output is zero and a short is indicated. The short could be located in amplifier cable connectors or power unit.

If the pointer moves into the yellow area of the fault monitor meter, an open circuit is indicated with full power supply voltage.

An open circuit could be the result of a faulty amplifier, an open cable or open connectors. Check to be sure connectors are properly mated. Some PCB power units feature fault LEDs in place of a fault meter. Instead of a pointer, the fault LED will light when an open or short circuit condition is present.

Allow the sensor to thermally stabilize for about one minute. A signal drift may occur when the cable is connected to the readout instrument. This drift occurs during charging of the coupling capacitor in the power unit. The signal will stabilize in several minutes. Proceed with measurements.

Most line-powered signal conditioners manufactured by PCB have an adjustable current feature allowing a choice of input currents from 2 to 20 mA. In general, for the lowest noise (best resolution), choose the lower current ranges.

Drawing Number: 21168
Revision: NR

**OPERATION MANUAL FOR
FREE FIELD BLAST PRESSURE PROBE
Models 137A21, A22, A23**

2

For driving long cables (to several thousand feet), use the higher current, up to 20 mA maximum. Use of low-capacitance cable (i.e. RG 62/U) and impedance-matching variable resistors are suggested to improve long cable performance characteristics at high frequencies.

3.1 POLARITY

The 137A20 Series produces a positive-going output voltage for increasing pressure output.

4.0 LOW-FREQUENCY RESPONSE

Consult Section 7.0 in General Guide G-0001B for detailed explanation of low-frequency characteristics of ICP® instrumentation.

5.0 CALIBRATION

Do not try to calibrate the Series 137A20 statically. The Series 137A20 is calibrated dynamically by PCB using a hydraulic pulse technique.

For best accuracy, use the calibration certificate supplied. Factory recalibration is available for a nominal charge.

6.0 MAINTENANCE

Although ICP® sensors have low-output impedance and are not usually affected by moisture, in extremely damp environments it may be well to protect cable connections with shrink tubing.

It is well to observe the following precautions in using the sensor:

1. Do not exceed specified maximum range.
2. Do not subject sensor to temperatures exceeding temperature shown on specification sheet.
3. Do not apply voltage to sensor without current-limiting diodes or other current protection.
4. Do not apply more than 20 mA of current to the sensor.

Field repair of the piezoelectric element or amplifier of the Series 137A20 is not practicable. Thus, should a sensor in this series require servicing, refer to the warranty sheet.

CAUTIONARY NOTE: If sensors are left outside overnight, they should be coated with silicone oil and covered. The protective silicone oil or grease coating should also be applied when the sensors are operated in a humid or rainy environment.

®ICP is a registered trademark of PCB Piezotronics

Drawing Number: 21168
Revision: NR

Model Number 137A23		Revision: N ECN #: 34582	
ICP® PRESSURE SENSOR		OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.	
Performance Measurement Range (for ±5V output) Useful Overrange (for ±10V output) Sensitivity (±1%) Maximum Pressure Resolution Resonant Frequency Rise Time (Incident) Non-Linearity Environmental Temperature Range (Operating) Temperature Coefficient of Sensitivity Electrical Output Polarity (Positive Pressure) Discharge Time Constant (at room temp) Excitation Voltage Constant Current Excitation Output Impedance Output Bias Voltage Physical Sensing Geometry Sensing Element Housing Material Diaphragm Sealing Electrical Connector Weight		[1] 345 kPa 680 kPa 14.5 mV/kPa 6895 kPa 0.089 kPa ≥ 500 kHz ≤ 6.5 μsec ≤ 1.0 % FS -100 to +275 °F ≤ 0.03 %/°F Positive ≥ 0.2 sec 22 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤ 100 ohm 10 to 15 VDC Compression Quartz Aluminum Invar Epoxy BNC Jack 360 gm [2] 6895 kPa 0.089 kPa ≥ 500 kHz ≤ 6.5 μsec ≤ 1.0 % FS -73 to +135 °C ≤ 0.054 %/°C Positive ≥ 0.2 sec 22 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤ 100 ohm 10 to 15 VDC Compression Quartz Aluminum Invar Epoxy BNC Jack 360 gm [3] 345 kPa 680 kPa 14.5 mV/kPa 6895 kPa 0.089 kPa ≥ 500 kHz ≤ 6.5 μsec ≤ 1.0 % FS -100 to +275 °F ≤ 0.03 %/°F Positive ≥ 0.2 sec 22 to 30 VDC 2 to 20 mA ≤ 100 ohm 10 to 15 VDC Compression Quartz Aluminum Invar Epoxy BNC Jack 360 gm	
NOTES: [1] For +10 volt output, minimum 24 VDC supply voltage required. Negative 10 volt output may be limited by output bias. [2] Typical. [3] Zero-biased, least-squares, straight line method. [4] See PCB Declaration of Conformance P-S023 for details.			
 [4]			
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.		Entered: <i>amw</i> Date: <i>12/6/10</i> Engineer: <i>apb</i> Date: <i>12/6/10</i> Sales: <i>alum</i> Date: <i>12/8/10</i> Approved: <i>apb</i> Date: <i>12/8/10</i> Spec Number: <i>137-1230-80</i>	
		Phone: 716-684-0001 Fax: 716-686-9129 E-Mail: pressure@pcb.com 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043	

137-1010-95	APPLICATION			REVISIONS				
	NEXT ASS'Y	USED ON	VAR	REV	DESCRIPTION	ECN	DATE	APP'D
				B	REVISED AND REDRAWN	3926	9/28/92	10/6/92

REPLACEMENT TIP
MODEL 084A70

SENSING ELEMENT

6.2(157)

16.0(406)

BNC JACK

Ø.88(Ø22.4)

.50(12.7)

UNLESS SPECIFIED TOLERANCES				DRAWN	CP	10/1/92	MFG	RJA	10/6/92
DIMENSIONS IN INCHES DECIMALS XX ±.01 XXX ±.005 ANGLES ±2 DEGREES DIMENSIONS IN MILLIMETERS (IN PARENTHESIS) DECIMALS X ±0.3 XX ±0.13 ANGLES ±2 DEGREES FILLETS AND RADI .003 - .005 (0.07 - 0.13)				CHK'D	DM	10/7/92	ENGR	BA	10/6/92
				APP'D	BA	10/7/92	Sales	DF	10/6/92
				OUTLINE DRAWING MODEL 137A SERIES FREE FIELD BLAST PROBE					
PCB PIEZOTRONICS, INC. 3425 WALDEN AVE. DEPEW, NEW YORK 14043 PHONE: (716) 684-0001								CODE	137-1010-95
								IDENT. NO.	
SCALE: .5X								SHEET 1 OF 1	



HIGH PRESSURE RUGGEDIZED DYNAMIC RESPONSE PRESSURE TRANSDUCER

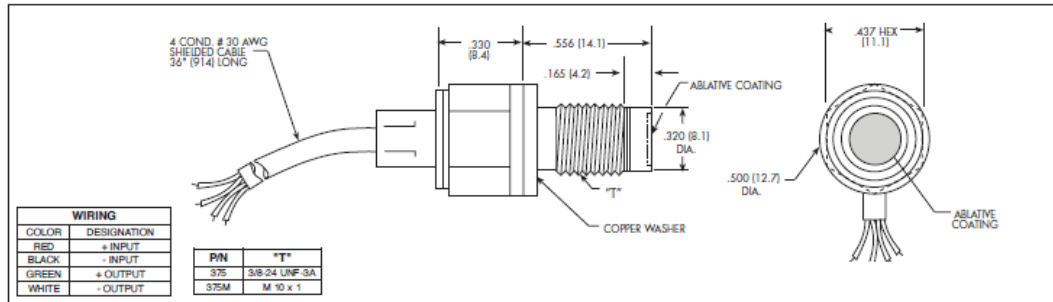
HKS-37-375 (M) SERIES

- Designed For Blast Pressure Applications
- Low Impedance High Output
- Very High Natural Frequency
- Silicon on Silicon Integrated Sensor VIS®
- Excellent Signal To Noise Ratio

Designed for high pressure, high shock environments, this transducer is widely used in both military and commercial blast measurement applications.



Kulite recommends the [KSC Series](#) of signal conditioners to maximize the measurement capability of the HKS-37-375 transducer.



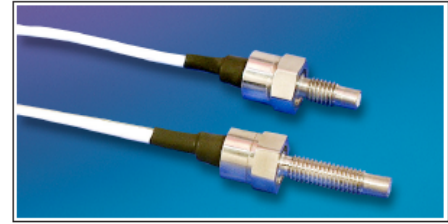
INPUT	Pressure Range	4200 BAR 60000 PSI
	Operational Mode	Sealed Gage
	Over Pressure	4200 BAR 60000 PSI
	Burst Pressure	4200 BAR 60000 PSI
	Pressure Media	Any Liquid or Gas Compatible With 15-5 PH, 316 Stainless Steel and Silicone RTV
	Rated Electrical Excitation	10 VDC/AC
	Maximum Electrical Excitation	12 VDC/AC
	Input Impedance	1000 Ohms (Min.)
	Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)
	Full Scale Output (FSO)	100mV (Nom.)
OUTPUT	Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)
	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.) ± 0.5% FSO (Max.)
	Resolution	Infinitesimal
	Natural Frequency of Sensor Without RTV (MHz) (Typ.)	10
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	5.0x10 ⁻³
	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC
	Operating Temperature Range	-65°F to +350°F (-55°C to +175°C)
ENVIRONMENTAL	Compensated Temperature Range	80°F to +180°F (25°C to +80°C) Any 100°F Range Within The Operating Range on Request
	Thermal Zero Shift	± 1% FS/100°F (Typ.)
	Thermal Sensitivity Shift	± 1% /100°F (Typ.)
	Mechanical Shock	20g Half Sine Wave 11 msec. Duration
PHYSICAL	Electrical Connection	4 Conductor 30 AWG Shielded Cable 36" Long
	Weight	25 Grams (Nom.) Excluding Cable
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon
	Mounting Torque	180 Inch-Pounds (Max.) 20 Nm
	Diaphragm Coating	Ablative Coating Standard

Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available. Dimensions are in inches. Dimensions in parenthesis are in millimeters. All dimensions nominal. (J)
Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice. Copyright © 2014 Kulite Semiconductor Products, Inc. All Rights Reserved.
Kulite miniature pressure transducers are intended for use in test and research and development programs and are not necessarily designed to be used in production applications. For products designed to be used in production programs, please consult the factory.

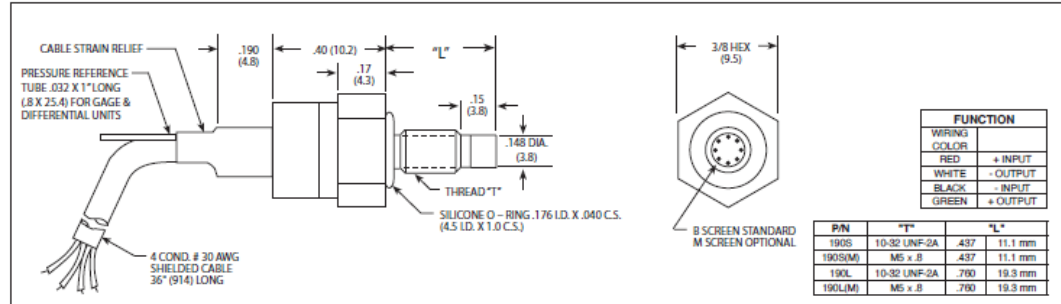
kulite®
MINIATURE RUGGEDIZED
PRESSURE TRANSDUCER
XT-190 (M) SERIES

- Easy Installation
- Silicon on Silicon Integrated Sensor VIS®
- High Natural Frequency

The ruggedness of this sensor has not compromised its performance. It was designed for ease of installation.



Kulite recommends the **KSC Series** of signal conditioners to maximize the measurement capability of the XT-190 transducer.



INPUT	Pressure Range	0.35 5	0.7 10	1 15	1.7 25	3.5 50	7 100	17 250	35 500	70 1000	140 BAR 2000 PSI
	Operational Mode	Absolute, Gage, Differential			Absolute, Gage, Sealed Gage, Differential			Absolute, Sealed Gage			
	Over Pressure	2 Times Rated Pressure to 500 PSI (35 BAR), 1.5 Times Rated Pressure Above 500 PSI (35 BAR)									
	Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 5000 PSI (350 BAR)									
	Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (All Media May Not Be Suitable With O-Ring Supplied)									
	Rated Electrical Excitation	10 VDC/AC									
	Maximum Electrical Excitation	12 VDC/AC									
OUTPUT	Input Impedance	1000 Ohms (Min.)									
	Output Impedance	1000 Ohms (Nom.)									
	Full Scale Output (FSO)	100 mV (Nom.)									
	Residual Unbalance	± 5 mV (Typ.)									
	Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSI (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)									
	Resolution	Infinitesimal									
	Natural Frequency of Sensor Without Screen (KHz) (Typ.)	150	175	200	240	300	380	550	700	1000	
	Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	1.5x10 ⁻³	1.0x10 ⁻³	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	
	Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC									
	ENVIRONMENTAL	Operating Temperature Range	-65°F to +350°F (-55°C to +175°C)								
Compensated Temperature Range		+80°F to +180°F (+25°C to +80°C) Any 100°F Range Within The Operating Range on Request									
Thermal Zero Shift		± 1% FS/100°F (Typ.)									
Thermal Sensitivity Shift		± 1% /100°F (Typ.)									
Mechanical Shock		20g Half Sine Wave 11 msec. Duration									
PHYSICAL	Linear Vibration	20g Peak, Sine 10 to 2000 Hz									
	Electrical Connection (Standard)	4 Conductor 30 AWG Shielded Cable 36" Long									
	Weight	4 Grams (Nom.) Excluding Cable									
	Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon									
	Mounting Torque	15 Inch-Pounds (Max.) 1.7 Nm									

Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available. Dimensions are in inches. Dimensions in parenthesis are in millimeters. All dimensions nominal. (T) Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice. Copyright © 2017 Kulite Semiconductor Products, Inc. All Rights Reserved. Kulite miniature pressure transducers are intended for use in test and research and development programs and are not necessarily designed to be used in production applications. For products designed to be used in production programs, please consult the factory.

KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. • One Willow Tree Road • Leonia, New Jersey 07605 • Tel: 201 461-0900 • Fax: 201 461-0990 • <http://www.kulite.com>

Amplificateurs



Model 482A22

4-channel, line-powered, ICP® sensor signal cond., unity gain, BNC

Installation and Operating Manual

For assistance with the operation of this product,
contact PCB Piezotronics, Inc.

Toll-free: 800-828-8840
24-hour SensorLine: 716-684-0001
Fax: 716-684-0987
E-mail: info@pcb.com
Web: www.pcb.com



1.0 Introduction and Specifications

A specification sheet and outline drawing are located in the rear of this manual.

1.1 Introduction: Safety Considerations

WARNING 1: *The power supply/signal conditioner should not be opened by anyone other than qualified service personnel.* This product is intended for use by qualified personnel who recognize shock hazards and are familiar with the safety precautions required to avoid injury.

WARNING 2: This equipment is designed with user safety in mind; however, the protection provided by the equipment may be impaired if the equipment is used in a manner not specified by PCB Piezotronics, Inc.

Caution 1: *Cables can kill your equipment.* High voltage electrostatic discharge can damage electrical devices. Similar to a capacitor, a cable can hold a charge caused by triboelectric transfer, such as that which occurs in the following:

- Laying on and moving across a rug.
- Any movement through air.
- The action of rolling out a cable.
- Contact with a non-grounded person.

The solution for product safety: 1) Connect the cables only with the AC power off. 2) Temporarily "short" the end of the cable before attaching it to any signal input or output.

Caution 2: *ESD considerations should be made prior to performing any internal adjustments on the equipment.* Any piece of electronic equipment is vulnerable to ESD when opened for adjustments. Internal adjustments should therefore be done ONLY at an ESD-safe work area. Many products have ESD protection, but the level of protection may be exceeded by extremely high voltage.

WARNING SYMBOLS AND TERMS

The following symbols and terms may be found on the equipment described in this manual.



This symbol on the unit indicates that the user should refer to the operating instructions located in the manual.



This symbol on the unit indicates that high voltage may be present. Use standard safety precautions to avoid personal contact with this voltage.



This symbol indicates safety, earth ground.

The **WARNING** heading used in this manual explains dangers that might result in personal injury or death. Always read the associated information very carefully before performing the indicated procedure.

The **Caution** heading used in this manual explains hazards that could damage the instrument.

MANUAL #: 19174
MANUAL REV: B
ECO: 43785

1.2 Introduction

Model 482A22 is a four-channel, line-operated signal conditioner for ICP® transducer systems. This unit provides constant current excitation to the built-in transducer amplifier and decouples the signal from the DC bias voltage.

The unit also contains provision for fault monitoring the channel, as well as provision for externally varying the constant current output over a 2 to 20 mA range. This model is factory set at 4 mA.

2.0 Description

Model 482A22 is powered externally by universal power supply model 488B04. The rear panel contains BNC jacks for transducer signal INPUT and BNC jacks for signal OUTPUT connections.

The AC signal information is decoupled from the sensor bias by a coupling capacitor and brought out to the OUTPUT jack.

The bias monitor consists of a color-coded front panel meter and a four position selector switch. The switch selects the bias voltage at each channel and displays it on the front panel meter. See the sensor spec sheet for specific sensor bias voltage and additional sensor information.

3.0 Installation

See the included outline drawing for dimensions, as well as jack and control locations. Plug the five-pin DIN output connector on model 488B04 into the DC INPUT located on the rear panel of 482A22.

Plug the three-wire line cord of the Model 488B04 into a source of 85 to 264 VAC, 47 to 440 Hz power and switch the power on for 482A22.

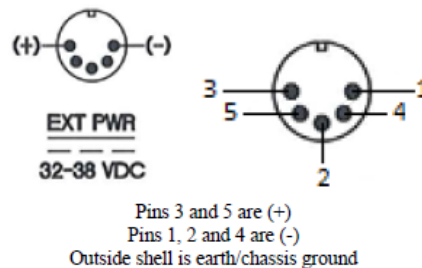


Figure 1: External Power Connector and Pin Numbers

Note: For battery operation use model 488B07 in place of model 488B04.

With no transducer connected to the INPUT connector, the front panel bias indicator meter indicates full scale (yellow), which corresponds to an open circuit power supply voltage. See Figure 2.

Meter Reading	Yellow	Green	Red
Condition	Open	Ok	Short

MANUAL #: 19174
MANUAL REV: B
ECO: 43785

Figure 2: Fault Monitor Table

When an ICP® transducer (or in-line amplifier) is connected to the INPUT jack, the front monitor meter indicates approximately midscale (green) if the transducer or amplifier is functioning properly. It does not read midscale if the transducer bias is 3 to 5 volts.

If a cable is faulty (open), or the sensor's built-in amplifier is open, the meter indicates a yellow (full scale) reading. When a cable or transducer is shorted, the meter indicates zero volts (red).

Immediately after connecting a readout instrument (oscilloscope, meter, or recorder) to the OUTPUT jack, the coupling capacitor begins charging through the input resistance of the readout instrument. This charging causes an apparent "drifting" of the output signal until the capacitor is fully charged. The normal amount of leakage through the coupling capacitor usually results in a <20 mV maximum DC offset.

4.0 Coupling Time Constant, AC Coupled

The coupling time constant (TC) is the product of the coupling capacitor (47 μ F) and the input resistance of the readout instrument, in parallel with the 274 kilohm shunt resistor. Typically, this is ten seconds, assuming the input resistance of the readout measurement is one megohm.

In most cases, it is desirable to keep the coupling TC long, with respect to the transducer discharge TC, to minimize the effect of the coupling TC on low frequency response.

4.1 Driving Long Cables

When driving long cables, it may be necessary to increase the constant current drive to the transducers. Model 482A22 is normally supplied with the constant current output to the transducer set at 4 mA nominal. This is adequate for most laboratory and field applications. Special situations, such as driving long cables (beyond 100 ft) with high frequency or fast rise time pulses, may require increasing the transducer drive current up to 20 mA.

When driving fast rise time pulses over long lines, system performance may be optimized by "tuning" the drive current to the line; i.e., by finding the best current setting for the particular set of physical parameters established by the transducer, line length, line termination, pulse rise time, etc.

The optimum current setting is best determined by experimentation with your particular test setup. A good rule of thumb is to use the lowest current consistent with satisfactory results to minimize transducer self-heating and noise.

Another technique requires the use of impedance matching resistor model 073A connected immediately after the transducer. This variable resistor is then used to "tune" the current to the line.

One of the best approaches is to test the long line with a signal generator set at a frequency of interest.

4.2 Setting the Constant Current

To set the constant current, locate the current adjust potentiometer on the rear panel. Connect a 0 to 30 mA DC ammeter (or multimeter) to the INPUT jack (as shown in Figure 3). The constant current value is read directly on the ammeter. Using a small regular screwdriver, vary the setting of the current adjust pot to set the current at a new level. All channels are adjusted using the potentiometer.

CAUTION: It may be possible to exceed 20 mA slightly. Do not do so; to operate an ICP® transducer or amplifier above 20 mA may damage the equipment.

MANUAL #: 19174

MANUAL REV: B

ECO: 43785

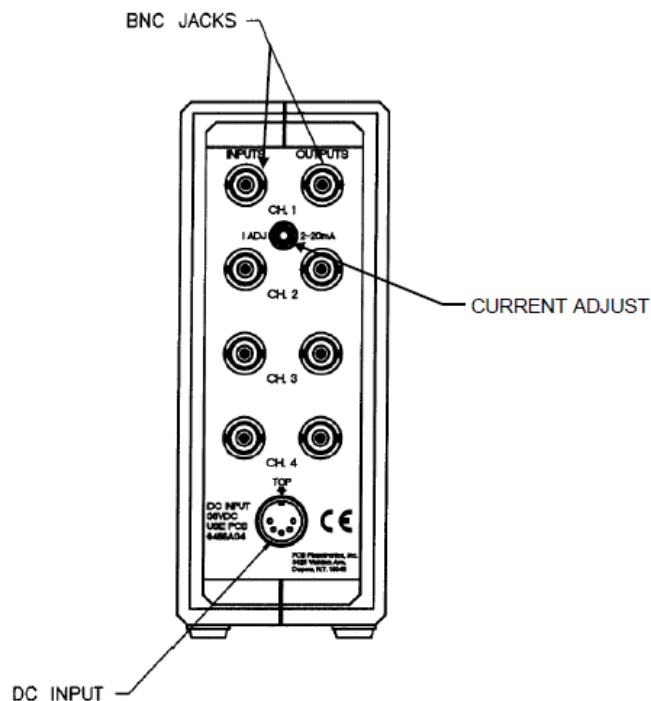


Figure 3: Constant Current Adjust

5.0 Maintenance and Repair

Because of the sophisticated nature of PCB instrumentation, field repair of the equipment is not recommended. Most PCB signal conditioners are of modular construction and are factory repairable. A repair or replacement quotation is available at no charge. Before returning equipment for repair, it is advisable that the user confers with a factory application engineer (or international representative) concerning the difficulty to ascertain if an on-site procedure rectifies the problem.

If repair is indicated, contact PCB to request a Return Materials Authorization (RMA) number from the factory. An advanced authorization to proceed with the repair, permitting charges of up to 50% of a new item, greatly expedites repair.

For the most efficient service, please provide a detailed, written description of the malfunction encountered with the equipment you are returning, together with your specific application and setup procedures. International customers should return PCB equipment to their representative. For exceptions, please contact the International Sales department at PCB to request shipping instructions and an RMA.

MANUAL #: 19174
MANUAL REV: B
ECO: 43785

482A21 and 482A22 Troubleshooting Guide

Problem	Test/Solution
Unit does not appear to be powered up/ No meter movement.	- Power switch in the on position. - Test 'sensor' excitation current. Measure the current on the 'sensor' input BNC from the center conductor to the shell. Adjust 'Iadj' (rear panel) with screwdriver turning both clockwise and counterclockwise. Reference section 'Setting the Constant Current.' - Make sure the bias monitor channel select matches the channel of interest.
Output signal seems to drift.	- Make sure the input impedance of the readout device, scope or data acquisition system is approximately 1 MΩ.
Low frequency response not meeting specification or amplitude is attenuated.	- The input impedance of the readout device may be too low. May need to use a buffered signal conditioner, for example 482C16.
Meter does not seem to show sensor bias voltage.	- Match the channel select with channel of interest. - Measure the sensor bias while the sensor is attached to the unit. This requires a 'T' connector to allow both the sensor and the measuring device to be attached. If problem persists, return for repair.

MANUAL NUMBER: 19174

MANUAL REVISION:

ECO NUMBER:

MANUAL #: 19174

MANUAL REV: B

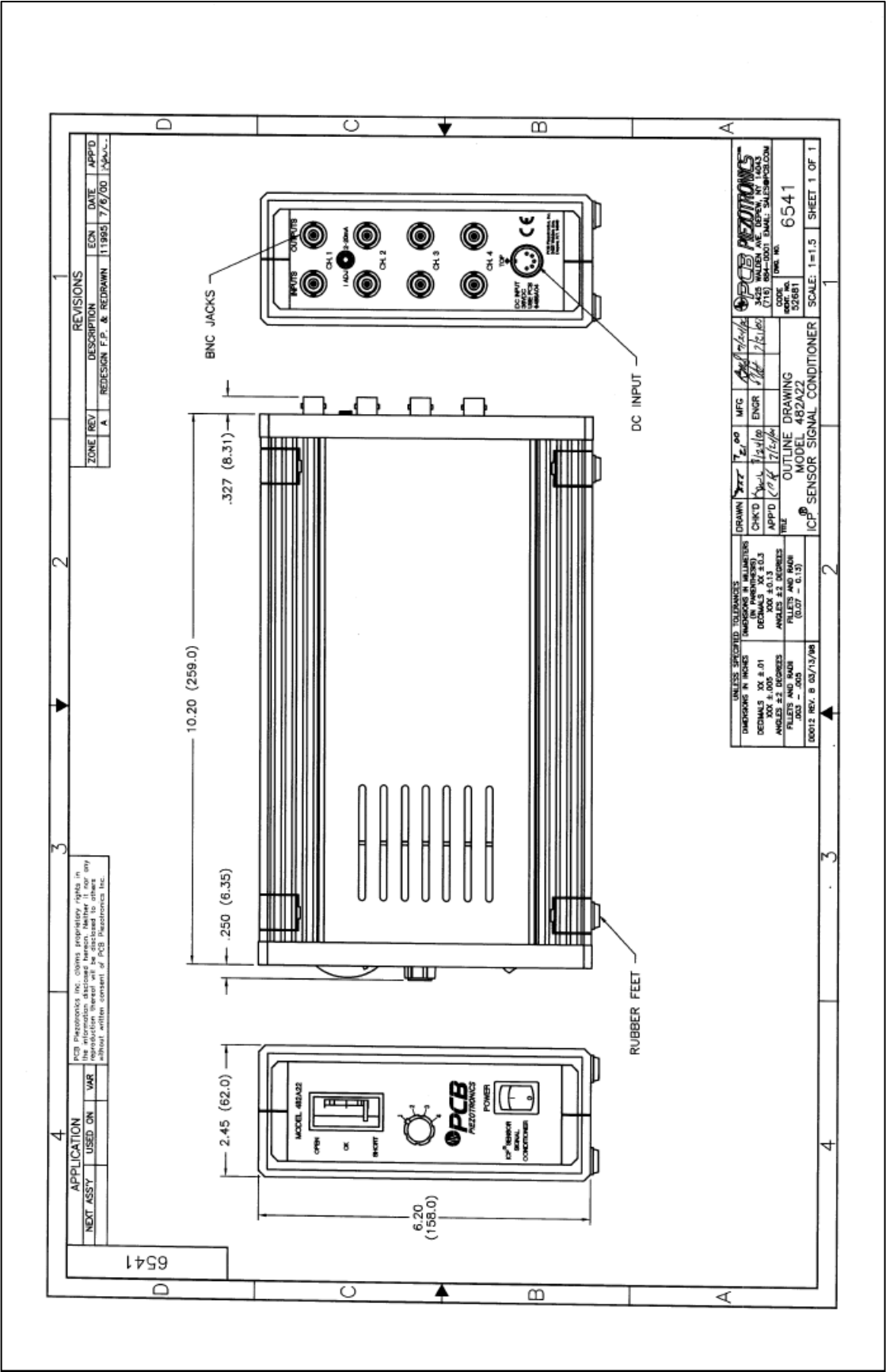
ECO: 43785

Model Number 482A22		SENSOR SIGNAL CONDITIONER				Revision: K ECN # 43617	
Performance Channels Voltage Gain($\pm 1\%$) Low Frequency Response(-5%) High Frequency Response(-5%) Fault/Bias Monitor/Meter Environmental Temperature Range Electrical Power Required(Standard) Excitation Voltage(To Sensor) DC Offset(Maximum) DC Power DC Power Constant Current Excitation(To Sensor) Discharge Time Constant(0 to $+50\%$) Spectral Noise(1 Hz) Spectral Noise(10 Hz) Spectral Noise(100 Hz) Spectral Noise(1 kHz) Spectral Noise(10 kHz) Broadband Electrical Noise(1 to 10,000 Hz) Physical Electrical Connector(Input, sensor) Electrical Connector(Output) Electrical Connector(DC Power Input) Size (Height x Width x Length) Weight		ENGLISH 4 1:1 <0.1 Hz >1000 kHz 26 V FS 32 to 120 °F DC power 25 to 27 VDC <20 mV $+32$ to 38 VDC 0.12 Amps 2 to 20 mA 10 sec 1.11 μ V/Hz 0.14 μ V/Hz 0.07 μ V/Hz 0.04 μ V/Hz 0.03 μ V/Hz 3.25 μ V BNC Jack BNC Jack DIN Jack 6.3 in x 2.4 in x 11 in 1.67 lb		SI 4 1:1 <0.1 Hz >1000 kHz 26 V FS 0 to 50 °C DC power 25 to 27 VDC <20 mV $+32$ to 38 VDC 0.12 Amps 2 to 20 mA 10 sec -119 dB -138 dB -144 dB -149 dB -150 dB -110 dB BNC Jack BNC Jack DIN Jack 16 cm x 6.1 cm x 28 cm 756 gm		[3][4] <	



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Model Number 488B04		POWER SUPPLY		Revision: A ECN #: 32528	
Environmental Temperature Range(Operating) Humidity Range(Non-Condensing)		ENGLISH 32 to 104 °F 0 to 95 %		OPTIONAL VERSIONS Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.	
Electrical Output Voltage Output Current AC Power(50 to 60 Hz)		SI 0 to 40 °C 0 to 95 % 32 - 38 VDC 0.54 amps 100 to 240 VAC		488B04/NC - Does not include a 017AXX Power Cord	
AC Ripple(Peak to Peak) Physical Electrical Connector(AC Power Input) (Output DC)		0.6 amps <350 mV IEC 320 DIN 5 Pin (Male) 1.3 in x 2.13 in x 3.76 in 1.25 lb		NOTES: [1] See PCB Declaration of Conformance PS024 for details.	
Size (Height x Width x Depth) Weight		33 mm x 54.1 mm x 955 mm 0.57 kg		SUPPLIED ACCESSORIES: Model 017AXX Power Cord (1)	
		Entered: <i>SK</i> Date: <i>3-15-10</i>		Approved: <i>EB</i> Date: <i>3-10-10</i>	
[1]		Engineer: <i>SK</i> Date: <i>3-3-10</i>		Sales: <i>AGM</i> Date: <i>3-26-10</i>	
All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.		PCB PIEZOTRONICS ELECTRONICS DIVISION 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043		Spec Number: 45177	
				Phone: 716-684-0001 Fax: 716-684-0987 E-Mail: electronics@pcb.com	



CDV/CDA-700A

Signal Conditioners



CDV-700A



CDA-700A



8 Units Accommodated in Portable Housing Case YB-508A

Signal Conditioner with Direct Current Excitation and a gain of 10000 times maximum.

- Frequency response range is as wide as DC to 500 kHz, suitable for high-speed phenomena such as impulse wave.
- Strain amplifier mode provides a range of 100 $\mu\text{m/m}$.
- Noise referred to input is low despite the wide bandwidth and high gain capabilities.
- Balance adjustment is possible up to $\pm 10000 \mu\text{m/m}$ (equivalent to a resistance deviation of 2%).
- RANGE, L.P.F., VERN and BAL settings are saved in nonvolatile memory.
- User registration function improves the measurement accuracy, such as ;
 - 1) With CDV-700A, the cable resistance compensation function ensures the same measurement accuracy as ensured by remote sensing.
 - 2) With CDA-700A, other than 120 Ω or 350 Ω .
- Output of 4 to 20 mA is option.
- Digital indicator and bar graph are provided.
- Powerful low-pass filter provides the attenuation characteristic of -24 dB/oct.
- Key lock function prevents maloperation of balance, range, vernier and low-pass filter switches.

Specifications

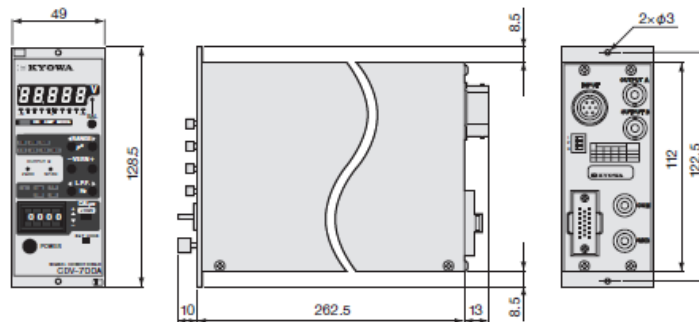
Model	CDV-700A	CDA-700A
Bridge Excitation Mode	Constant voltage	Constant current
Applicable Bridge Resistance	60 to 1000 Ω	120 Ω , 350 Ω User registration function allows for selection in a range of 60.0 to 9999 Ω .
Bridge Voltage (selectable by rear panel dip switch)	10VDC 4VDC 2VDC 1VDC (30 mA or less for each voltage)	350 Ω 25mA 350 Ω 5mA 120 Ω 25mA 120 Ω 5mA
Sensitivity (to 100 mV/m Input)	BV 10VDC 5V 4VDC 2V 2VDC 1V 1VDC 0.5V	Output BR BC Output 350 Ω 25mA 4.375V 350 Ω 5mA 0.875V 120 Ω 25mA 1.5V 120 Ω 5mA 0.3V
Setting Range by User Registration Function	Cable resistance in one way 0.0 to 200.0 Ω	Bridge resistance 60.0 to 999.9 Ω or 60 to 9999 Ω
Cable Extension	Remote sensing enables up to 2 km by 6-conductor (0.5 mm ²) shielded cable	Up to 2 km by 4-conductor (0.5 mm ²) shielded cable

Common Specifications

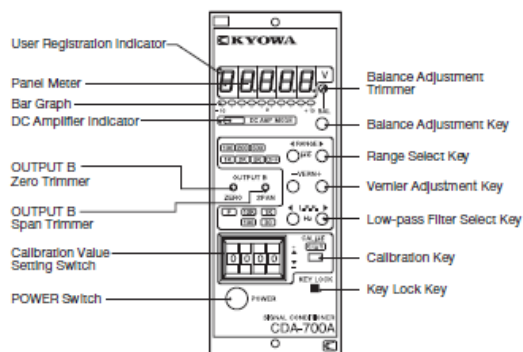
Number of Measuring Channels : 1 (multiple units can be combined for multichannel configuration)
Gage Factor : 2.00 fixed
Input Impedance : 10M Ω + 10M Ω or more
Balance Adjustment Range (BAL) : Resistance $\pm 2\%$ (Initial unbalance of transducer 10000 $\mu\text{m/m}$)
Balance Adjustment Method : Resistance : True electron auto balance Accuracy : $\pm 2 \mu\text{m/m}$ (with range set to 100 $\mu\text{m/m}$) Saved in nonvolatile memory
Output (Dual output) : OUTPUT A ± 10 V or more (load 5 K Ω or more) Zero adjustment range ± 0.1 V or more OUTPUT B ± 10 V or more (load 5 K Ω or more) Sensitivity adjustment range 1 to 1/100 Zero adjustment range ± 30 mV or more to OUTPUT A
Nonlinearity : Within $\pm 0.01\%$ FS
Output Impedance : Approx. 2 Ω
Sensitivity Switch (RANGE) : Strain amplifier : 7 steps of 100, 200, 500, 1k, 2k, 5k $\mu\text{m/m}$ and OFF DC amplification : 7 steps of 10000, 5000, 2000, 1000, 500, 200 times and OFF Accuracy : Within $\pm 0.1\%$ Saved in nonvolatile memory

Fine sensitivity adjustment : 1 to 1/2.5 or more		Over-input Indication : Panel meter flickers.											
Saved in nonvolatile memory		Output Voltage Indication : 4-digit LED display for OUTPUT A, updated approximately 15 times per second											
Calibration (CAL) : Reference equivalent strain: $\pm(1 \text{ to } 9999 \mu\text{m/m})$		10-segment LED bar graph											
DC voltage: $\pm(10 \text{ to } 9990 \mu\text{V})$		Key Lock Function : RANGE, BAL, VERIN, CAL, L.P.F. switches can be locked.											
Setting: 4-digit switch		Remote Function : Allows remote execution of zero balance, calibration and key lock											
Accuracy: $\pm(0.2\% + 0.5 \mu\text{m/m})$, ($0.1\% + 5.0 \mu\text{V RTI}$)		Vibration Resistance : Conforms to MIL-STD-810°C. 10 to 500 Hz $19.61 \mu\text{m/s}^2$ (2 G) 5 to 55 Hz $29.42 \mu\text{m/s}^2$ (3 G) 12 cycles each in X, Y and Z directions, 15 minutes/cycle											
Frequency Response Range : DC to 500 kHz, deviation $\pm 1/3$ dB		Operating Temperature & Humidity Range : - 10 to 50°C, 85% RH or less (noncondensing)											
Low-Pass Filter (L.P.F)		Storage Temperature : - 30 to 70°C											
Transfer characteristic : 4-pole fourth-order Butterworth		Power Supply : AC line, approx. 12 VA (100 VAC) or 10.5 to 15 VDC, approx. 0.8 A (12 VDC)											
Cutoff frequency : 5 steps of 10, 100, 1k, 10kHz and F (flat)		Dimensions & Weight : 49(W) x 128.5(D) x 262.5(H) mm (excluding protrusions), approx. 1.4 kg											
Saved in nonvolatile memory		Panel cut dimensions : 50 x 113 mm											
Amplitude ratio at cutoff point: -3 dB ± 1 dB		<table><tr><td>Standard Accessories</td><td>AC power cable P-25 (with conversion adapter CM-39) Output cable U-58 Spare fuse (Midget type 3A) Miniature screwdriver, Instruction Manual</td></tr><tr><td>Optional Accessories</td><td>Housing cases YC-A (Refer to page 3-18.) Amplifier stand FA-1B (Refer to page 3-19.) Input cable U-37 (Refer to page 8-4.) Extension cables N-81 to N-85 (Refer to page 8-5.)</td></tr></table>	Standard Accessories	AC power cable P-25 (with conversion adapter CM-39) Output cable U-58 Spare fuse (Midget type 3A) Miniature screwdriver, Instruction Manual	Optional Accessories	Housing cases YC-A (Refer to page 3-18.) Amplifier stand FA-1B (Refer to page 3-19.) Input cable U-37 (Refer to page 8-4.) Extension cables N-81 to N-85 (Refer to page 8-5.)							
Standard Accessories	AC power cable P-25 (with conversion adapter CM-39) Output cable U-58 Spare fuse (Midget type 3A) Miniature screwdriver, Instruction Manual												
Optional Accessories	Housing cases YC-A (Refer to page 3-18.) Amplifier stand FA-1B (Refer to page 3-19.) Input cable U-37 (Refer to page 8-4.) Extension cables N-81 to N-85 (Refer to page 8-5.)												
Attenuation: -24 ± 1 dB/oct.													
Noise	<table><tr><th>Low-pass Filter</th><th>Noise (RTI)</th></tr><tr><td>10Hz</td><td>3 $\mu\text{V p-p}$ or less</td></tr><tr><td>100Hz</td><td>4 $\mu\text{V p-p}$ or less</td></tr><tr><td>1kHz</td><td>6 $\mu\text{V p-p}$ or less</td></tr><tr><td>10kHz</td><td>12 $\mu\text{V p-p}$ or less</td></tr><tr><td>Pass</td><td>60 $\mu\text{V p-p}$ or less</td></tr></table>	Low-pass Filter	Noise (RTI)	10Hz	3 $\mu\text{V p-p}$ or less	100Hz	4 $\mu\text{V p-p}$ or less	1kHz	6 $\mu\text{V p-p}$ or less	10kHz	12 $\mu\text{V p-p}$ or less	Pass	60 $\mu\text{V p-p}$ or less
Low-pass Filter	Noise (RTI)												
10Hz	3 $\mu\text{V p-p}$ or less												
100Hz	4 $\mu\text{V p-p}$ or less												
1kHz	6 $\mu\text{V p-p}$ or less												
10kHz	12 $\mu\text{V p-p}$ or less												
Pass	60 $\mu\text{V p-p}$ or less												
1 $\mu\text{V p-p RTI} = 1 \mu\text{m/m}$, with bridge voltage 2 V													
Maximum Allowable Input Voltage : $\pm 15\text{V}$													
Allowable Common Mode Input Voltage : $\pm 10\text{V}$													
Common Mode Rejection Ratio : 100 dB or more													
Zero Stability : With bridge voltage 2 V $\pm 1 \mu\text{m/m}/^\circ\text{C}$, $\pm 8 \mu\text{m/m}/24 \text{ h}$ $\pm 0.05\%$ FS $\pm 10\%$ power fluctuation													
Sensitivity Stability : $\pm 0.01\%/^\circ\text{C}$, $\pm 0.05\%/24 \text{ h}$ $\pm 0.05\%/^\circ\text{C}$, $\pm 0.05\%$ power fluctuation													
Withstand Voltage : 1000 VAC for one minute between AC power supply and chassis													

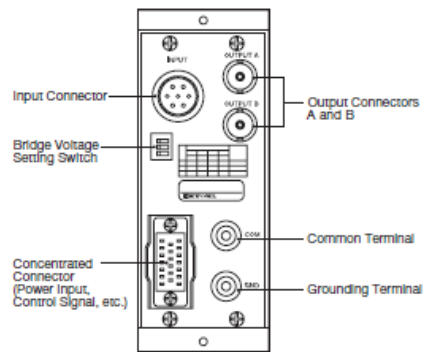
Dimensions



Front Panel



Rear Panel



Measurement Equipment for Future Transient Recorder **TransCom-RackX**



**MF Instruments
GmbH**



07/2005

Technical Specifications

TPCX (14Bit-ADC)	8014-4S	8014-4D	4014-4S	4014-4D	2014-4/8S	2014-4/8D	1014-4/8S	1014-4/8D	
TPCX (16Bit-ADC)	8016-4S	8016-4D	4016-4S	4016-4D	2016-4/8S	2016-4/8D	1016-4/8S	1016-4/8D	1)
Input channels	4 SE or 2 Diff.	4 SE or 4 Diff.	4 SE or 2 Diff.	4 SE or 4 Diff.	4/ 8 SE or 2/4 Diff.	4/ 8 SE or 4/8 Diff.	4/ 8 SE or 4/8 Diff.	4/ 8 SE or 4/8 Diff.	7)
Input resolution	14 / 16 Bit								1)
Max. sampling rate (all channels simultaneous)	4 x 80MHz (125ns)		4 x 40MHz (25ns)		4 x 20MHz (50ns) resp. 8 x 20MHz		4 x 10MHz (100ns) resp. 8 x 10MHz		
Memory (per module)	4 x 16MWorte resp. 8 x 8MWorte (= 128MByte), optional up to total 256MWorte (= 512MByte)								
Input Amplifier									
Ranges (1-2-5 Steps)	+/-50mV .. +/-50V resp. 0.1V .. 100V (100V limited at 70V)								
Adjustable Offset	0...100% in Steps of 0.1%								
Input-Impedance	1 MOhm (+/-0.2%) / 40pF (+/-5%)								
Input-Coupling	AC / DC Software switchable (AC: -3dB at < 5Hz) invertable by software								
Bandwidth	30MHz (8MHz ranges < 1V)		18MHz (7MHz ranges < 1V)		10MHz (6 MHz ranges < 1V)		5MHz (4 MHz ranges < 1V)		
Rise Time (10..90%)	16ns (50ns ranges < 1V)		25ns (60ns ranges < 1V)		40ns (70ns ranges < 1V)		70ns (80ns ranges < 1V)		
Settling time to 1%	< 200ns								
Lowpass-Filter (RC-type)	2 Stages (1 MHz and 100kHz) and OFF by Software selectable								
Anti-Aliasing-Filt. (Option)	200Hz ... 5MHz, Butterworth min. 4th. Order, Software selectable								
Common Mode Range	Differenzial-Mode: +/-8V resp. +/-80V ranges >=10V								
Common Mode Rejection	>74dB (DC...1kHz); >80dB (...100kHz); >40dB (...5MHz)								
Range Error (+/-)	max. 0.1% typ. 0.03% (with auto calibration)								
Offset Error (+/-)	max. 0.1% typ. 0.02% (with auto calibration)								
Offset Drift (+/-)	max. 0.0100%/°C, typ. 0.0050%/°C (compensation possible by auto calibration)								
Input noise									2)
at max. sampl. rate	< 0.300mVrms		< 0.200mVrms		< 0.150mVrms		< 0.150mVrms		
at 5MHz sampl. rate	< 0.150mVrms		< 0.120mVrms		< 0.100mVrms		< 0.100mVrms		
at 1MHz sampl. rate	< 0.100mVrms		< 0.070mVrms		< 0.050mVrms		< 0.050mVrms		
at 100kHz sampl. rate	< 0.050mVrms		< 0.030mVrms		< 0.020mVrms		< 0.020mVrms		
at 10kHz sampl. rate	< 0.055mVrms		< 0.015mVrms		< 0.010mVrms		< 0.010mVrms		
Signal-to-noise (SNR): *4,*3)	59dB		68dB		70dB		70dB		3)
at 5MHz sampl. rate *3)	66dB		70dB		72dB		72dB		4)
at 1MHz sampl. rate *3)	69dB		74dB		76dB		76dB		
at 100kHz sampl. rate *3)	79dB		82dB		84dB		84dB		
at 10kHz sampl. rate *3)	89dB		90dB		92dB		92dB		
Cross Talk Attenuation	> 80dB (> 60dB at ranges <1V)								
Special:	Automatic adjustment of gain and offset in all ranges. (execution by software)								
Auto calibration									
Trigger									
Trigger channels	4 resp. 8 on Analog-Inputs, pos./neg. slope, with or without hysteresis, Window-IN, Window-OUT								
Advanced Trigger (Option)	all Analog-Inputs: Slew Rate, Pulse length or Period (too short or too long=Missing Event)								
External Trigger input	1 per System (TTL) pos. or neg. slope								
Trigger delay	-100% (Pretrigger) to +200% (Posttrigger) in steps of 1%								
Miscellaneous									
Digital-Inputs (Marker) only with 14Bit-Modules (Option)	8 resp. 16 (2 per Analog-Input) (TTL)								
Online-Harddisk-Recording (Chart-Mode)	Optocoupled terminal box (5, 12, 24, 48 V) as an option								
	Sum sampling rate up to 5 MHz per module		Sum sampling rate 5 MHz per module		Sum sampling rate 5 MHz per module		Sum sampling rate 5 MHz per module		6)
Ext. control inputs (TTL)	Trigger, Arm/Disarm, ext. sampling rate (fmax = ¼ max. sampling rate)								
Status-Outputs (TTL)	Trigger-Out, Record-Active (indicates recording state)								
ICP® Sensor supply (Option)	4mA supply for ICP-Piezo-Sensors over the signal inputs								

*1) With 16 Bit-Modules the ADC resolution is reduced to 14 Bits, if the sampling rate is higher than 1/8 of the maximum sampling rate.

*2) Noise depends on sampling speed

*3) With 14 Bit-Modules the Signal-To-Noise-Ratio (SNR) is reduced by 2 dB

*4) With 8-Channel Modules the Signal-To-Noise-Ratio (SNR) is reduced by 3 dB

*6) The max. sampling rate in harddisk recording mode depends on the PC especially on the number of harddisks.

*7) Input type single-ended or differentiell is software selectable

Technical changes subject without notice!

Part 2 of Technical Specifications - Main systems

	Rack_B	RackX_B_XL	RackX_F
Connectors	BNC back side	BNC back side	BNC front side
max. number of channels	40 single-ended resp. 20 differentiell	64 single-ended resp. 32 differentiell	40 single-ended resp. 20 differentiell
Processor	Pentium IV, 2.8 GHz	Pentium IV, 2.8 GHz	Pentium IV, 2.8 GHz
Memory	1024 MB	1024 MB	1024 MB
Harddisk	2 x 120 GB (RAID 1)	2 x 120 GB (RAID 1)	2 x 120 GB (RAID 1)
Drives	DVD-CD/RW	DVD-CD/RW	DVD-CD/RW
Interfaces	4 x USB 2.0, Ethernet 10/100MBit, printer, Monitor (DVI, VGA)	4 x USB 2.0, Ethernet 10/100MBit, printer, Monitor (DVI, VGA)	4 x USB 2.0, Ethernet 10/100MBit, printer, Monitor (DVI, VGA)
Operating system	Windows XP Prof.	Windows XP Prof.	Windows XP Prof.
Housing			
Type	19" Rack with handles	19" Rack with handles	19" Rack with handles
Dimensions	W x H x D 482 x 177 x 432 mm	W x H x D 482 x 177 x 674 mm	W x H x D 482 x 177 x 465 mm
Weight	approx. 12 Kg	approx. 18 Kg	approx. 13 Kg
Environmental			
Power	95 – 132V u. 180V – 260 V 47 – 63Hz	95 – 132V u. 180V – 260 V 47 – 63Hz	95 – 132V u. 180V – 260 V 47 – 63Hz
Temperature	Operating: 0°C – 50°C Non Operating: -10°C – 70°C	Operating: 0°C – 50°C Non Operating: -10°C – 70°C	Operating: 0°C – 50°C Non Operating: -10°C – 70°C
Humidity	up to 85% non condensating	up to 85% non condensating	up to 85% non condensating
Colour	white	white	white

16.9.2005, All specifications subject to change without notice!

Hint: Possibility to synchronise several TransCom-RackX systems!

With pleasure we also offer you Transient Recorders

- up to 64 channels in a 19" rack case
- up to 100 MHz per channel
- with fiber optical isolation
- up to 96 channels integrated in one system
- several systems to combine

with consideration to your special wishes

**MF Instruments
GmbH**



Kranichstr. 6
D-72336 Balingen
Tel.: ++49(0)7433/9898-0
Fax: ++49(0)7433/9898-70

E-Mail: info@mf-instruments.de
Internet: www.mf-instruments.de

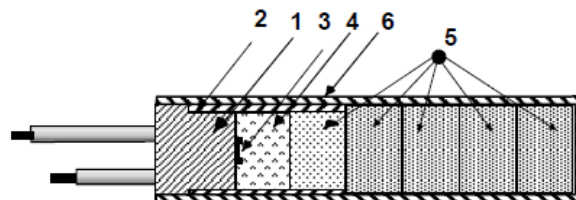
RP-83 EBW Detonator

P/N 167-8676

The RP-83 is a stretched version of the RP-80 detonator and contains over 1 gram of high density explosive in the output. The RP-83 is capable of detonating all standard explosives and many blasting explosives.



RP-83 Explosive Train



1. Plastic molded head
2. Brass sleeve
3. Bridgewire (Gold)
4. Initiating explosive: 80 mg PETN
5. Output explosive: 1,031 mg RDX with binder
6. Aluminum cup 0.007 " thick

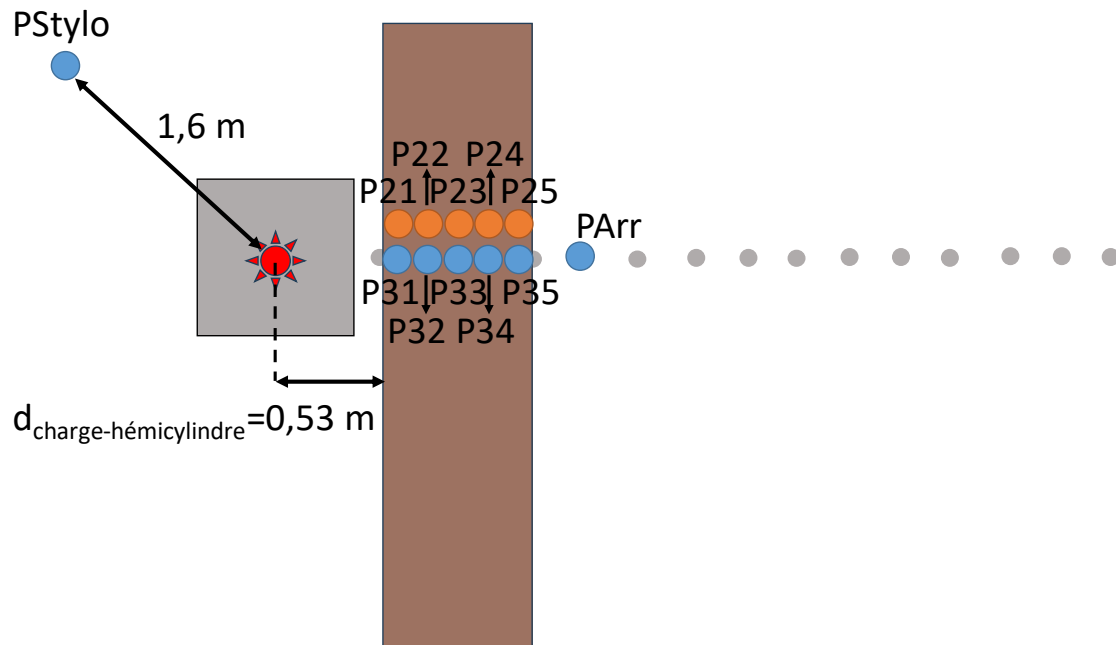
RP-83 Firing Parameters

- Threshold Burst Current: 180 amps
- Threshold Voltage: Approx. 500 volts
- Threshold Voltage Std. Deviation: 75 volts maximum
- Function Time: 5.38 μ sec. typical
- Function Time Simultaneity Standard Deviation: 0.125 μ sec Max.

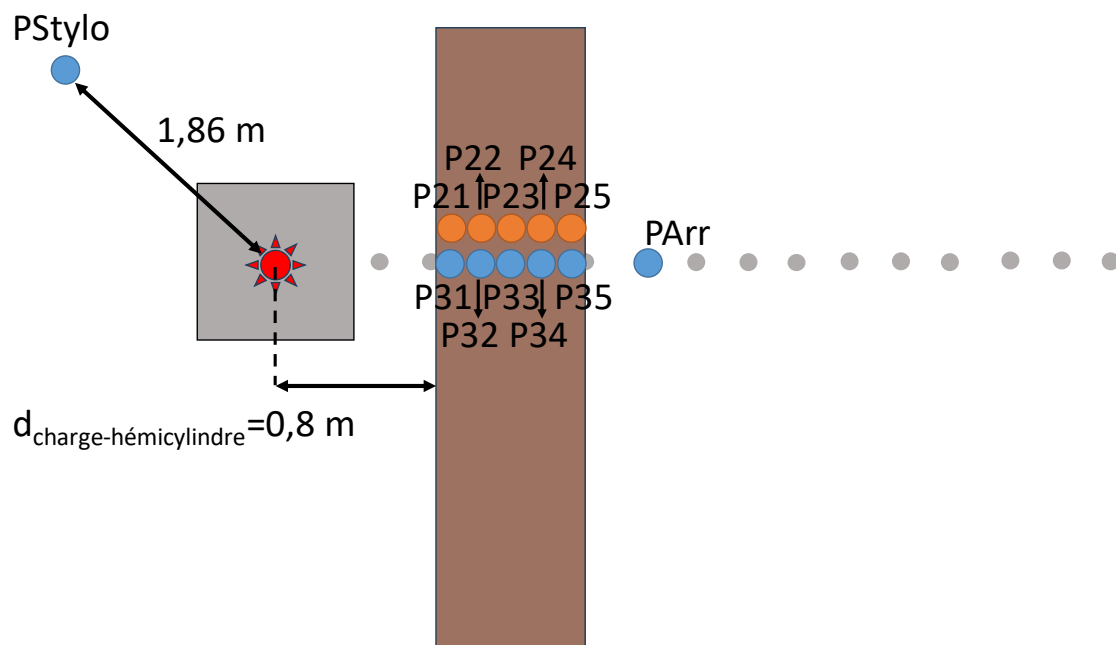
Caution: While EBW and EFI Initiators are inherently less susceptible to accidental detonation during handling and set-up than devices containing primary explosives, electrical and electronic firing systems are sensitive to transient electrical energies which could cause premature triggering or firing. The blasting area must be clear of personnel and equipment before the detonator leads are connected to any RISI Firing System. Only approved RISI Firing Systems should ever be used to initiate or detonate any explosive product manufactured and authorized for sale by RISI.

D. Annexe : Schémas des configurations étudiées à l'ISL

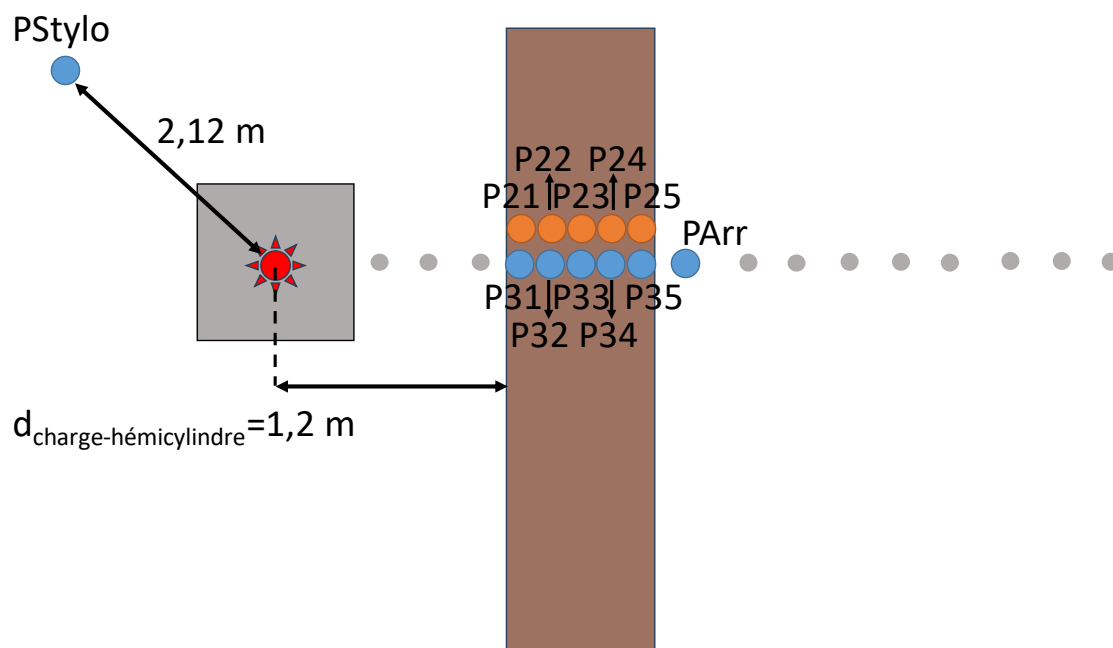
Campagne avec l'hémicylindre à 0,53 m de la charge – juin 2020



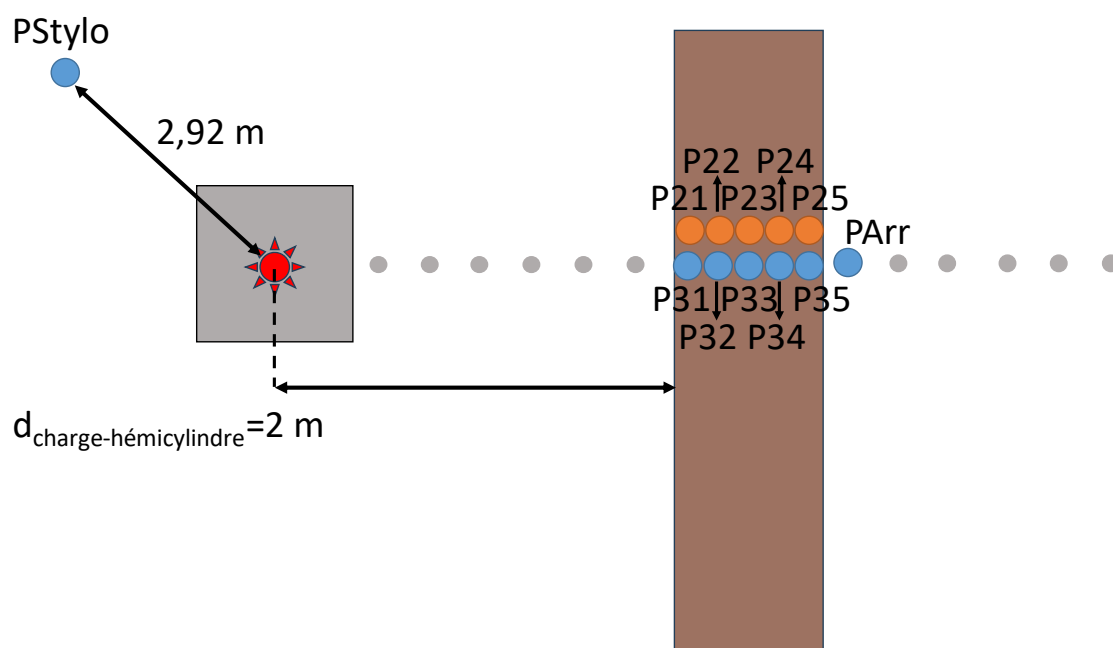
Campagne avec l'hémicylindre à 0,8 m de la charge – août 2020



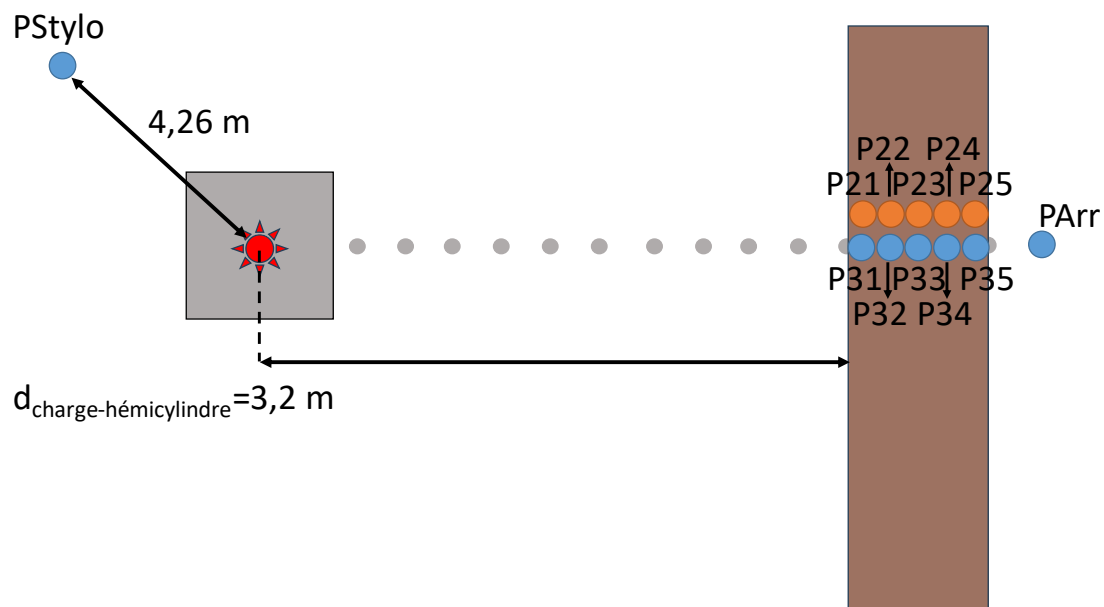
Campagne avec l'hémicylindre à 1,2 m de la charge – mars 2021



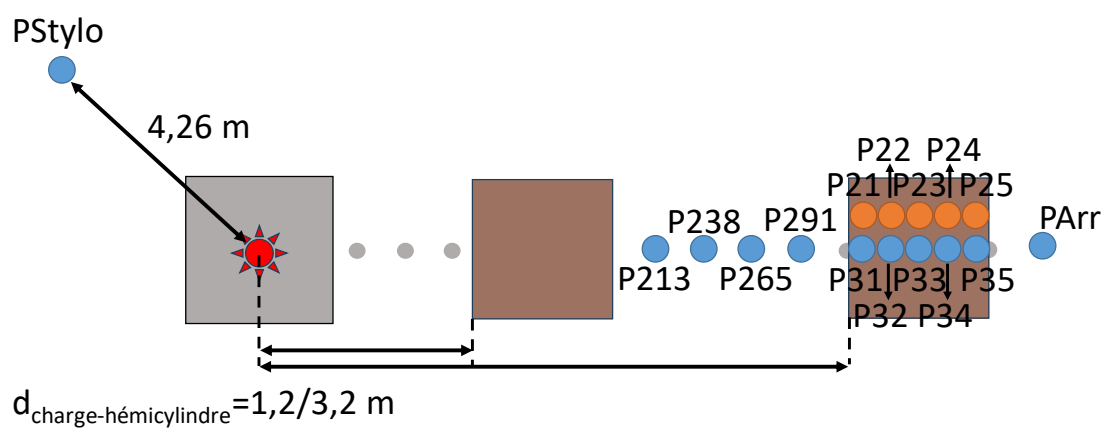
Campagne avec l'hémicylindre à 200 cm de la charge – mai-juin 2021



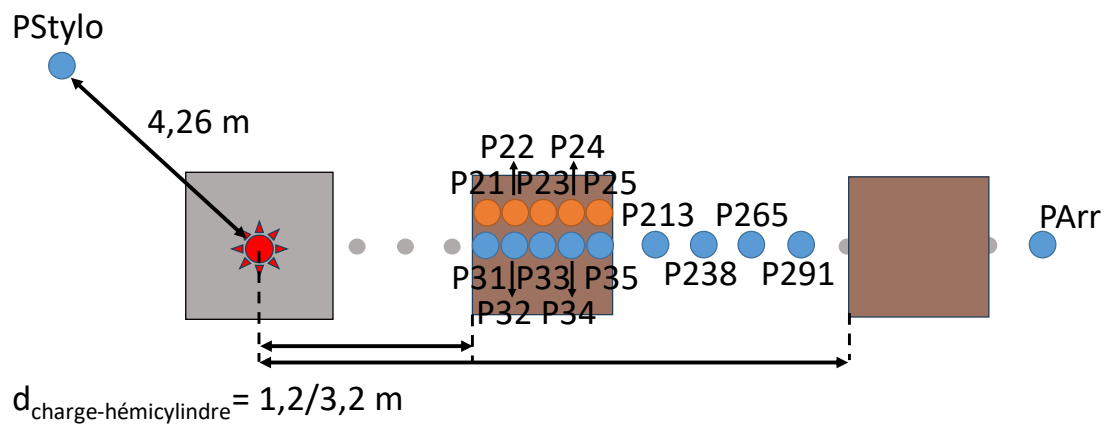
Campagne avec l'hémicylindre à 3,2 m de la charge – juin-juillet 2021



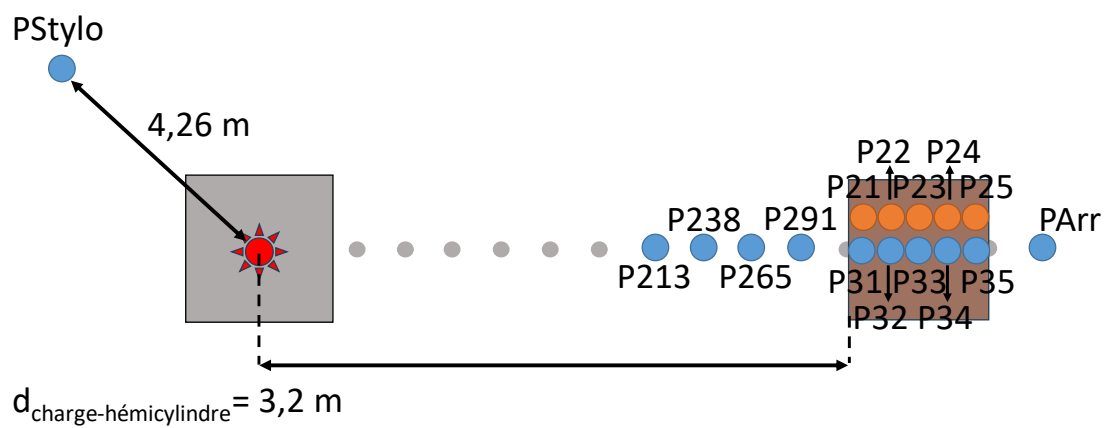
Campagne avec deux tronçons d'hémicylindre à 1,2 et 3,2 m de la charge – juillet-août 2021



Seconde campagne avec deux tronçons d'hémicylindre à 1,2 et 3,2 m de la charge – octobre novembre 2021



Campagne avec un hémicylindre court à 3,2 m de la charge – novembre 2021



E. Annexe : Organisation des campagnes expérimentales

Durant la thèse, neuf campagnes expérimentales ont été réalisées à l'ISL (pour un total de 167 tirs) et deux à l'IRSN (pour un total de 39 tirs), afin d'étudier différentes configurations charge-hémicylindre. Cette section vise à présenter la liste des configurations étudiées et leur coordination dans le temps.

Tableau 3-13 : Configurations restant à étudier aux deux échelles.

Distance réduite (m.kg ^{-1/3})	Distance IRSN (m)	IRSN	Distance ISL (m)	ISL				
		41.5g Hexomax		66.5g Hexomax	166.5g Hexomax	333g Hexomax	50g TNT	400g TNT
0.573	0.27		0.533					
0.862	0.4	2017	0.8					
1.293	0.6		1.2					
1.293 - obstacle court	0.6							
2.154	1		2					
3.447	1.6		3.2					
3.447 - obstacle court	1.6	2018	3.2					
1.293/3.447 - 2 tronçons	0.6/1.6		1.2/3.2					
		Essais à réaliser	Essais réalisés					

Les premières campagnes qui sont traitées ici ont été organisées dans le cadre de mon projet de fin d'études [183], qui s'est déroulé de mars à août 2020 : une campagne initialement prévue à l'IRSN en mai 2020 a dû être reportée à septembre à cause de l'épidémie du Covid-19, et deux autres ont pu être réalisées à l'ISL en juin et août, comme résumé dans le Tableau 3-14. La première campagne à l'IRSN a concerné 4 configurations : 4 essais ont été réalisés en champ libre, puis trois essais avec des distances charge-hémicylindre de 0,27, 1,00 et 1,60 m, soit un total de treize essais⁸. Les essais réalisés en juin et août à l'ISL avec les cinq tailles de charges mentionnées précédemment ont étudié des distances charge-hémicylindre de 0,53 et 0,80 m, pour un total de 41 essais.

Tableau 3-14 : Organisation des campagnes expérimentales de 2020.

Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre		
	X	X												

⁸ Deux campagnes expérimentales avaient déjà été réalisées à l'IRSN en 2017 et 2018 (Tableau 3-13), dont les résultats ont servi à établir le modèle présenté dans [187].

	Campagne IRSN		Campagne ISL		PFE
---	---------------	---	--------------	--	-----

La première partie de la thèse s'étant déroulée à l'ISL, les essais de 2021 ont eu lieu avec l'installation à échelle double du terrain d'essais. Les premières campagnes ont permis de continuer les essais avec l'obstacle long, en étudiant de nouvelles distances à la charge ; des essais ont ainsi été réalisés avec des distances charge-hémicylindre de 1,20, 2,00 et 3,20 m. Par la suite, des essais ont été menés avec deux tronçons d'hémicylindre successifs placés à 0,60 et 1,60 m de la charge, et nous ont amenés à ajouter la caméra Phantom V311 pour filmer le deuxième obstacle et la propagation de l'onde de souffle entre les deux tronçons. Enfin, l'interaction de l'onde de souffle avec un obstacle hémicylindrique court, composé d'un seul tronçon, a été étudiée, mais seulement lors de 4 essais avec des charges d'Hexomax® de 333 g. Au total, 151 essais ont été réalisés à l'ISL au cours de l'année 2021.

Tableau 3-15 : Organisation des campagnes expérimentales en 2021 à l'ISL.

Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre
								
Hémicylindre long			Deux tronçons		Hémicylindre court			

La dernière campagne expérimentale de cette thèse a eu lieu en septembre 2022 à l'IRSN. Cette campagne a été organisée en région parisienne et a permis d'étudier six configurations différentes : deux configurations en champ libre, deux configurations avec deux tronçons d'hémicylindre consécutifs et deux configurations avec un obstacle court (placé à 0,60 ou 1,60 m de la charge). 4 essais ont été exécutés dans chaque configuration, portant leur nombre à 24. L'ensemble des configurations étudiées est résumé dans le Tableau 3-16.

Tableau 3-16 : Configurations étudiées aux deux échelles.

Distance réduite (m.kg ^{-1/3})	Distance IRSN (m)	IRSN		ISL				
		41.5g Hexomax	Distance ISL (m)	66.5g Hexomax	166.5g Hexomax	333g Hexomax	50g TNT	400g TNT
0.573	0.27	2020	0.533	2020				
0.862	0.4	2017	0.8					
1.293	0.6	2022	1.2	2021				
1.293 - obstacle court	0.6		1.2	2021				
2.154	1		2					
3.447	1.6	2020	3.2	2021				
3.447 - obstacle court	1.6	2018	3.2	2021				
1.293/3.447 - 2 tronçons	0.6/1.6	2022	1.2/3.2	2021				
		Essais à réaliser		Essais réalisés				

F. Annexe : Installation du CNRS

ICARE dispose d'un tube à choc qui permet de générer des ondes de choc planes dont la vitesse de propagation peut être mesurée avec une grande précision. Aussi, sera-t-il utilisé afin de déterminer le comportement des capteurs de pression lorsqu'ils sont soumis à un profil de pression parfaitement maîtrisé. Cette campagne permet donc d'étudier le comportement de capteurs de technologies différentes soumis à une même sollicitation contrôlée.

Description du tube à choc

Le tube à détonation employé au CNRS est un tube en acier d'un diamètre intérieur de 78mm, composé d'une section motrice, d'un diaphragme (en orange), et d'une section d'étude d'une longueur de 4,372m (Figure 3-61).

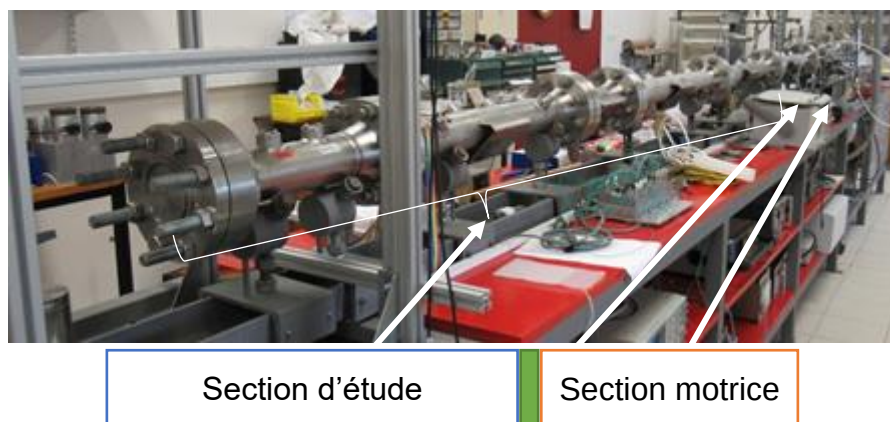


Figure 3-61 : Schéma du tube à choc.

Le diaphragme est un système à double membrane : (i) une première membrane sépare la section d'étude du diaphragme, (ii) et une seconde membrane sépare le diaphragme de la section motrice. Ce dispositif à double membrane permet la mise en œuvre de configurations avec des valeurs de pressions motrices plus précises. Les membranes utilisées sont en Mylar®, un composé de Polyéthylène Téréphtalate (PET) qui présente une grande résistance mécanique. L'épaisseur de la membrane à utiliser est choisie selon la pression motrice souhaitée, de 23 à 190 μm pour des pressions motrices variant de 2 à 19 bar. Pour une étude avec une pression motrice P_4 dans le

compartiment moteur, en remplissant le diaphragme à la pression $P_4/2$, les membranes sont ainsi maintenues en-dessous de leur limite de rupture, ce qui leur permet de ne pas rompre avant que la pression désirée ne soit atteinte dans la chambre moteur. Cette rupture est amorcée en vidant soudainement l'espace compris entre les deux membranes, ce qui expose subitement les deux membranes à une différence de pression importante ; cela permet également de faire en sorte que la section d'étude (à la pression P_1) ne détecte que la pression moteur finale, et donc d'avoir le ratio P_4/P_1 désiré. Les gaz employés dans la section d'étude du tube peuvent également être réactifs, ce qui permet de réaliser des essais de détonation.

Dans le tube, la rupture de la membrane va entraîner la naissance d'une onde de choc droite se propageant dans la section d'étude et la formation d'un éventail d'ondes de détente qui se propagent en sens inverse vers la section motrice. La pression derrière le choc dépend de sa vitesse, qui est fonction des conditions initiales régnant dans le tube, car cette vitesse est directement liée aux vitesses du son dans le tube moteur et le tube d'étude par la relation (48) :

$$M_1 = \frac{1}{2} \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_4 - 1} \frac{a_4}{a_1} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2} \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_4 - 1} \frac{a_4}{a_1} \right)^2} \quad (48)$$

Où M_1 est le nombre de Mach de l'onde de choc dans le gaz d'étude, γ_1 et a_1 le coefficient polytropique et la vitesse du son dans le gaz d'étude, γ_4 et a_4 ceux dans le gaz moteur

Ainsi, la vitesse du choc, et donc la pression derrière lui, est d'autant plus grande que le rapport des célérités du son $\frac{a_4}{a_0}$ est grand, c'est-à-dire quand le rapport des masses molaires $\frac{\mathcal{M}_0}{\mathcal{M}_4}$ est grand ; c'est pour cette raison que l'hélium est utilisé comme gaz moteur lors de ces essais.

Diagnostiques associés

4 types de capteurs ont été testés, un capteur piézo-électrique de la marque Kistler, un piézo-électrique de la marque PCB, un piézorésistif de la marque Kulite, et un piézorésistif de la marque Endevco.

Le capteur de l'IRSN est donc un capteur piézo-électrique Kistler de type 603CAA. Ce capteur délivre des charges électriques et doit donc être utilisé avec un amplificateur de charge, dans notre cas un Kistler 5018A. Il délivre $-4,36\text{pC/bar}$ et peut mesurer des pressions jusqu'à 1000 bar. Avec sa fréquence naturelle supérieure à 500kHz et son temps de montée inférieur à $0,4\mu\text{s}$, ce capteur est particulièrement adapté aux mesures dynamiques rapides.

Le capteur piézo-électrique PCB de l'ISL est un modèle M102A06 dont la plage de mesure s'étend jusqu'à 35bar. Il délivre 1465mV/MPa , avec un temps de montée inférieur à la microseconde. Sa fréquence de résonance est supérieure à 500kHz. Il s'utilise avec un conditionneur de signal PCB modèle 482A22.

Le capteur Kulite est un XT-190S(M), avec une gamme de pression mesurable de 0 à 35bar. Sa fréquence naturelle est de 700kHz et sa résolution est infinitésimale (donnée du constructeur).

Le capteur Endevco, modèle 8530C-100, peut lui mesurer jusqu'à 100psi (soit 6,9bar), avec une sensibilité de $2,25\text{mV/psi}$ (soit $0,237\text{mV/kPa}$). Sa fréquence de résonance est de 500kHz.

Ces deux derniers capteurs sont utilisés avec un conditionneur de signal Endevco Model 136, conçu pour être utilisé avec des capteurs piézorésistifs.

But de l'expérience

Durant les campagnes expérimentales, ces capteurs sont soumis à des conditions de pression et de température inhabituelles, notamment lors des essais en champ proche durant lesquels ces capteurs peuvent se retrouver dans la boule de feu générée par l'explosif. La détonation d'un explosif condensé entraîne la formation d'une onde de souffle évanescence caractérisée par une surpression élevée, avec un profil de pression présentant une décroissance exponentielle. La mesure précise de ce profil de pression est très importante, et c'est pourquoi il est essentiel de s'assurer que le capteur est efficace sur toute la durée du phénomène ; en effet, les étalonnages de capteurs de pression piézo-électriques sont généralement réalisés en statique ou quasi statique [189], et ne préjugent donc pas toujours de la capacité d'un capteur à restituer correctement un phénomène dynamique [190]. De même, la boule de feu

s'accompagne de phénomènes radiatifs susceptibles eux aussi de perturber le capteur [147], et il est donc important de connaître le comportement de celui-ci dans ces conditions. En effet, de nombreux matériaux piézo-électriques sont également pyroélectriques [191] et libèrent donc des charges électriques additionnelles lorsqu'ils sont soumis à des effets thermiques ; de plus, les variations de température peuvent entraîner une dilatation des matériaux composant le capteur et enserrant le cristal, modifiant ainsi la précontrainte interne, mais ces effets sont lents par rapport au temps caractéristique du choc et n'influent donc pas sur sa face positive. Ces effets peuvent varier selon la position du capteur par rapport à la boule de feu :

- Pour un capteur situé dans le rayon de la boule de feu : effets radiatifs sur la pression maximale mesurée et l'évolution post-choc, effets de conduction et convection sur l'évolution post-choc ;
- Pour un capteur situé proche de la boule de feu : effets radiatifs sur la pression maximale et l'évolution post-choc ;
- Pour un capteur situé à distance de la boule de feu : potentiels effets de convection et conduction influençant l'évolution post-choc suivant l'intensité du choc, effets radiatifs moins importants.

Afin d'étudier cela, il a été décidé de tester plus tard les capteurs utilisés dans un tube à choc, afin d'avoir des niveaux et profils de pression parfaitement connus, ce qui permet de mieux connaître la réponse des capteurs à ces sollicitations ; et notamment de caractériser leur fréquence propre de vibration et ainsi proposer un filtrage adapté des signaux obtenus. De plus, des essais pourraient être réalisés avec un mélange de gaz réactifs, entraînant une détonation, afin d'étudier le comportement du capteur en présence d'une hausse de température brutale.

À la suite de l'étude du comportement du capteur dans les situations susmentionnées, il sera également possible de proposer et valider des solutions techniques pour mieux isoler et protéger les capteurs de ces effets thermiques, physiques et radiatifs.

Par ailleurs, deux technologies de capteurs étant utilisées lors de ces essais, les résultats obtenus permettront également d'observer les différences de réponse de ces deux technologies face à une contrainte identique.

Modalités de l'expérience

Afin d'étudier la réponse de ces capteurs sous choc, ils ont été montés au fond du tube à choc, vissés dans la bride en acier qui le ferme (Figure 3-62).

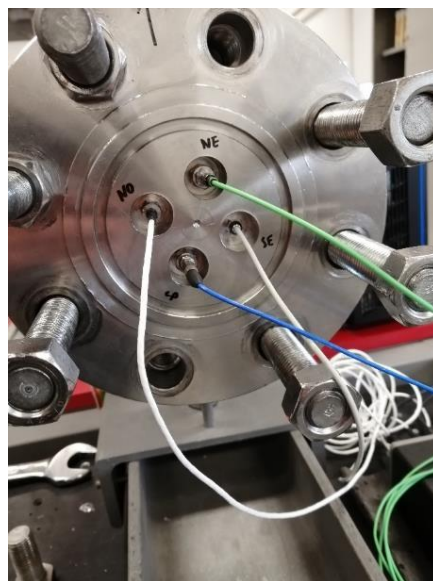


Figure 3-62 : Vue des capteurs montés au fond du tube à choc.

Ces capteurs sont reliés aux différents amplificateurs mentionnés précédemment. Ainsi, le capteur Kistler est connecté à l'amplificateur Kistler par le biais d'un câble à haute impédance ($10^{13}\Omega$). Cet amplificateur est réglé selon la sensibilité du capteur, à savoir une entrée de $-4,36\text{pC/bar}$, et sa tension de sortie est réglée de manière à avoir 5bar/V . Le capteur PCB est lui relié à son conditionneur PCB et produit donc une sortie de 1465mV/bar . Le capteur Endevco est quant à lui branché au conditionneur 136, dont l'entrée est réglée sur $23,7\text{mV/bar}$, et la sortie sur 200mV/bar . De la même façon, le capteur Kulite était également connecté à ce conditionneur, avec une entrée fixée à $2,874\text{mV/bar}$ et une sortie fixée à 200mV/bar . Ces 4 capteurs étaient par la suite reliés à un même oscilloscope Teledyne Lecroy, modèle Wavesurfer 3024.

Le fait de monter les capteurs en fond de tube leur permet de n'observer qu'un créneau de pression, à savoir la pression réfléchie, dont l'intensité est connue (théoriquement, ou encore par simulation avec CosilabTM).

Par ailleurs, le tube à choc est instrumenté avec 20 capteurs de pression supplémentaires (8 PCB et 12 Chimie-Métal, notés SD). La distance entre ces capteurs étant connue précisément, grâce aux signaux obtenus de ces capteurs lors des essais, il est possible de remonter à la vitesse de l'onde dans le tube et ainsi de

prédire plus finement les niveaux de pression observés derrière l'onde de choc. Ces capteurs sont reliés à une série de sept oscilloscopes déclenchés en chaîne, chaque oscilloscope étant déclenché sur son premier canal par le dernier canal de l'oscilloscope précédent (*daisy chain*), comme illustré sur la Figure 3-63.

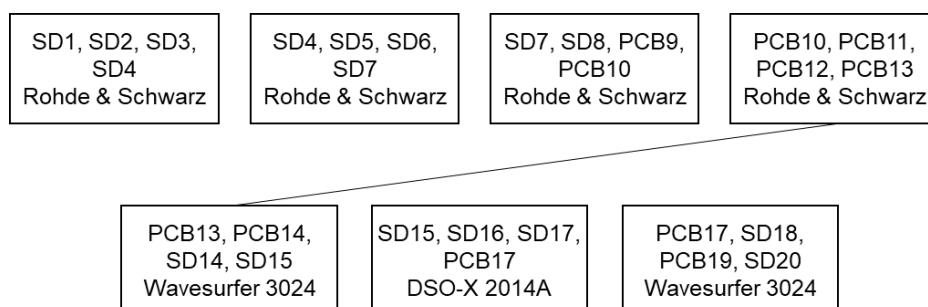


Figure 3-63 : Chaîne d'oscilloscopes pour l'acquisition des résultats de la campagne de calibration.

Les essais ont été réalisés avec une pression d'étude P_1 égale à la pression atmosphérique, afin d'éviter toute fuite indésirable, ce qui a été rendu possible par la non-réactivité des gaz utilisés pour ces tests.

En effet, ces essais ont été réalisés en utilisant de l'air comme gaz d'étude et de l'hélium comme gaz moteur. Pour certains tests, la partie motrice a été adaptée, c'est-à-dire que de l'argon a été ajouté à l'hélium ; cela permet d'alourdir le gaz moteur, baissant la vitesse du son dans celui-ci, et ainsi d'observer un plateau de pression constant plus longtemps dans le tube. Ces paramètres d'essais sont présentés dans le Tableau 3-17.

Tableau 3-17 : Paramètres des essais réalisés au CNRS.

TEST N°	P_4 (bar)	ÉPAISSEUR DE MEMBRANE (μm)	P_1 (bar)	T_0 (K)
M004	4	36	1,0149	293,15
M005	4	36	1,0146	292,15
M006	3	23	1,0146	292,15
M007	4 dont 0,5 d'Argon	36	1,0128	292,15
M009	3 dont 0,5 d'Argon	23	1,0076	292,15
M010	4	36	1,0022	293,15
M011	4 dont 0,5 d'Argon	36	1,0018	293,15

Raphaël GAVART

Mesure des combinaisons, focalisation et diffraction d'ondes de choc autour de structures type

Résumé

De nos jours, les conflits armés, le terrorisme et les accidents industriels sont des préoccupations importantes pour les États et les personnes. Ainsi, plusieurs entreprises et institutions, publiques ou privées, travaillent au développement d'outils analytiques et numériques pour évaluer les conséquences des actions malveillantes sur les structures et les personnes. Les activités de R&D développées par l'IRSN, au sein du bureau BMAX, visent, entre autres, à améliorer la connaissance des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle tridimensionnelle consécutive à une forte explosion et des obstacles de formes variées, et des chargements mécaniques résultants dans le but de développer des modèles simplifiés utiles aux ingénieurs en charge des expertises. Cette thèse rentre dans le cadre de la coopération scientifique avec l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL), dont les recherches comprennent le développement d'équipements de protection pour les personnels, véhicules et infrastructures. Les travaux de thèse ont pour objectifs (i) de développer des outils simples de prédiction des phénomènes régissant l'interaction entre une onde de souffle et un ou plusieurs obstacles indéformables, et (ii) d'en évaluer les profils temporels de pression à l'aide de diagnostics expérimentaux précis. Les expériences sont menées dans des installations à deux échelles distinctes : (i) échelle réduite sur la table à détonation de l'IRSN, (ii) échelle double sur la dalle d'essai à l'ISL. Au cours de ces trois années, l'interaction entre l'onde de choc générée par des charges Hexomax® et une cible hémicylindrique rigide a été étudiée aux deux échelles. Les résultats de surpression à la surface de l'obstacle ont permis d'étendre l'approche du modèle S décrit par Trélat et al. (2020) à des expériences à plus grande échelle (Gavart et al., 2023), et de développer de nouveaux modèles décrivant l'évolution des paramètres de l'onde de souffle à la surface d'un obstacle hémicylindrique. Les phénomènes de réflexion d'onde ayant lieu autour d'un hémicylindre ont également été étudiés, ainsi que la recombinaison des ondes de choc derrière des hémicylindres courts ou longs. Enfin, l'impact de la présence d'obstacles sur le développement des ondes latérales a pu être étudié à l'échelle IRSN.

Mots clés : contournement d'obstacle, ondes de souffle, mesures de pression

Blast waves interaction with reference structures: combination, focalization and diffraction

Summary

Nowadays, armed conflicts, terrorism and industrial accidents are important concerns for States and individuals. Thus, several companies and institutions, public or private, are working on the development of analytical and digital tools to assess the consequences of malicious actions on structures and people. The R&D activities developed by IRSN, within the BMAX office, aim, among other things, at improving knowledge of the phenomena governing the interaction between a three-dimensional blast wave following a strong explosion and obstacles of various shapes, and the resulting mechanical loads with the aim of developing simplified models useful to engineers in charge of expertise. This thesis is part of scientific cooperation with the Franco-German Research Institute of Saint-Louis (ISL), whose research includes the development of protective equipment for personnel, vehicles and infrastructures. The objectives of the thesis work are (i) to develop simple tools for predicting the phenomena governing the interaction between a blast wave and one or more non-deformable obstacles, and (ii) to evaluate the temporal pressure profiles using precise experimental diagnostics. The experiments are conducted in facilities at two distinct scales: (i) reduced scale on the IRSN detonation table, (ii) double scale on ISL blast pad. During these three years, the interaction between the shock wave generated by Hexomax® charges and a rigid hemicylindrical target was studied at both scales. The results of overpressure at the surface of the obstacle have made it possible to extend the S model approach described by Trélat et al. (2020) to larger-scale experiments (Gavart et al., 2023), and to develop new models describing the evolution of the parameters of the blast wave at the surface of a hemicylindrical obstacle. Wave reflection phenomena taking place around a hemicylinder were also studied, as well as the recombination of shock waves behind short or long hemicylinders. Finally, the impact of the presence of obstacles on the development of side waves could be studied at IRSN scale.

Keywords: obstacle circumvention, blast waves, pressure measurements