

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Dynamique des fluides

Présentée et soutenue par :

Mme EMMANUELLE TINON

le jeudi 12 avril 2018

Titre :

Etude expérimentale des mécanismes d'atomisation effervescente. Application à la sécurité incendie dans les moteurs aéronautiques.

Ecole doctorale :

Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (I.M.F.T.)

Directeur(s) de Thèse :

M. RUDY BAZILE

Rapporteurs :

M. JEAN-CHARLES SAUTET, UNIVERSITE DE ROUEN

M. PATRICK GASTALDI, SOCIETE RENAULT

Membre(s) du jury :

M. ALAIN LINE, INSA TOULOUSE, Président

M. RUDY BAZILE, INP TOULOUSE, Membre

À mon grand-père,
À mes parents.

Remerciements

Ce manuscrit de thèse s'inscrit dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société Airbus Operations SAS et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Durant ces trois années, j'ai eu l'opportunité de rencontrer des personnes qui m'ont apporté leur aide et sans qui l'accomplissement de ce travail n'aurait pas été possible.

Je tiens avant tout à exprimer toute ma reconnaissance à mes encadrants de thèse Rudy Bazile et Laurent Selle à l'IMFT, ainsi qu'à Stéphane Pugliese à Airbus. Un grand merci pour votre accompagnement jusqu'au bout. Stéphane, merci pour ton expertise, ta disponibilité et ta confiance.

Mes sincères remerciements à Messieurs Patrick Gastaldi et Jean-Charles Sautet qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ce travail. Je remercie également Monsieur Alain Liné pour sa participation au jury.

J'aimerais remercier le directeur Eric Climent pour son accueil au sein de l'IMFT et en particulier au sein du groupe Particules, Spray et Combustion (PSC). Un grand merci à Sébastien Cazin et Moïse Marchal, les ingénieurs diagnostics du laboratoire avec qui la réalisation des campagnes d'essais a été un réel plaisir. Merci pour votre aide, votre gentillesse, et vos conseils. Merci à Ilyass le technicien du groupe et à l'atelier pour la conception de pièces et pour l'aide apportée sur le banc d'essais.

Au sein d'Airbus, un grand merci à la *Fire Brigade*, avec qui j'ai partagé tant de bons moments. C'est avec un pincement au coeur que je vous quitte ! Merci à Thibault Pelletier avec qui j'ai travaillé sur ce projet, pour son écoute et ses conseils. Merci à Charles-Etienne Martin pour son soutien technique et son aide, ce fût un réel plaisir de travailler et d'apprendre avec toi.

Enfin, je terminerai en remerciant les personnes qui me sont les plus chères, mes parents. Merci pour votre soutien depuis toujours. Je ne serai jamais arrivée jusque là sans vous. Mes derniers remerciements sont pour toi Julien, pour ton soutien et le bonheur que tu m'apportes. Cette thèse est l'accomplissement de tous ceux qui m'ont éduqué, encouragé, encadré, enseigné et entouré. Mes plus sincères et profonds remerciements vous sont donc à tous adressés.

Résumé

Les incendies font partie des risques les plus redoutables en aéronautique, en raison des difficultés à les combattre, comme par exemple dans les espaces confinés où la propagation peut être très rapide. Le Halon1301 est utilisé depuis plus de 50 ans comme agent extincteur pour les moteurs d'avions, l'APU (Auxiliary Power Unit) et les applications de protection feux cargo. Le Halon1301 possède des propriétés spécifiques pour les systèmes de protection feux des moteurs. Il possède un point d'ébullition bas et une pression vapeur élevée, ce qui facilite le mélange de l'agent avec l'air de la ventilation dans les zones feux. De plus, son point d'ébullition à -57,8°C et sa capacité à se vaporiser à chaque point de décharge sont des propriétés physiques désirables.

Suite à des changements de la réglementation environnementale, il est nécessaire de remplacer le Halon1301, l'agent extincteur actuellement présent sur les systèmes de protection feux des moteurs d'avions. L'utilisation de cet agent a été bannie dans l'industrie par les protocoles de Montréal (1994) et de Kyoto (1998) qui visent à réduire les substances qui appauvrissent la couche d'ozone ainsi que les gaz à effet de serre. Des dérogations établies par la Commission Environnementale Européenne existent et sont appliquées au domaine de l'aéronautique à cause du manque de solutions alternatives. Depuis plusieurs années, Airbus travaille sur le projet de remplacement du Halon1301, appliqué notamment aux systèmes de protection feux des zones moteurs et APU. Depuis 2003, plusieurs agents alternatifs au Halon1301 ont été identifiés. Dans notre cas, on s'intéresse à un candidat qui apparait comme une alternative intéressante respectueuse de l'environnement : le Novec1230™. La différence la plus importante entre le Halon1301 et le Novec1230™est leur phase physique. En effet, le Halon1301 est un gaz, alors que le Novec1230™est liquide en conditions ambiantes (il est liquide en dessous de +49,2°C). Que ce soit à la température de ventilation froide (température négative) ou à l'ambiant (+25°C), l'agent sera liquide. Les caractéristiques d'évaporation (courbe de saturation) indiquent que pour ces applications, nous sommes dans un état diphasique avec la présence de gouttes et de gaz : plus le mélange sera froid et plus l'équilibre sera déplacé vers la phase liquide. En phase gazeuse, le transport de l'agent dans chaque recoin du moteur ne pose pas de problème car il sera transporté par l'écoulement d'air de la ventilation. Or, en phase liquide, le transport efficace de l'agent sous forme de gouttes est plus complexe : si les gouttes sont trop grosses, elles tendront à avoir une trajectoire balistique et n'atteindront pas toutes les zones feux du moteur. Par consé-

quent, l'optimisation de l'atomisation de l'agent devient un paramètre central pour la conception du système de protection des incendies.

Dans le contexte du projet, on étudie une technologie appelée atomisation effervescente. Le principe est de venir dissoudre un gaz (dans notre cas du dioxyde de carbone, CO_2), dans l'agent liquide Novec1230^{TM}. Plusieurs adaptations de cette technologie sont requises pour améliorer les performances de l'agent tel que son atomisation et son transport. Le processus d'atomisation effervescente est une technique d'atomisation diphasique prometteuse qui offre des améliorations potentielles en termes de qualité d'atomisation du fluide et de réduction de pression d'utilisation. L'objectif de ce projet est de conduire des recherches expérimentales sur le processus d'atomisation effervescente afin de prédire quels sont les paramètres clés qui influencent l'atomisation.

Mots-clés : Atomisation, effervescence, expérimental.

Abstract

Fires are one of the most formidable risks in aviation because of the difficulties to fight them once airbone, as for example in confined spaces where the spread can be very fast. Halon1301 has been used for more than 50 years as extinguishing agent for aircraft engines, APU (Auxiliary Power Unit) and cargo fire protection. Halon1301 has specific properties for systems of fires engines protection. It has a low boiling point and high vapor pressure, which facilitates the mixture of the agent with the ventilation air in fire areas. In addition, its boiling point at -57,8°C and its ability to vaporize throughout the discharge are desirable physical properties.

Because of changes in environmental regulation, it is necessary to replace Halon1301, the extinguishing agent currently present on aircraft engines fire protection systems. The use of this fluid has been banned by the Montreal (1994) and Kyoto (1998) protocols in industry, with the intent to reduce substances that deplete the ozone layer as well as greenhouse gases. Exemptions established by the European environmental Commission exist and are applied to the aeronautics field due to the lack of alternatives. For several years, Airbus has been working on the replacement of Halon1301 for engines and APU fire protection systems. Since 2003, several alternative agents to the Halon1301 have been identified. This study is dedicated to a fluid that appears as an environmentally friendly alternative : Novec1230™. The most important difference between Halon1301 and Novec1230™is their physical phase. Indeed, Halon1301 is in gaseous state at all relevant conditions, while Novec1230™is a liquid below +49,2°C. At the cold temperature ventilation (negative temperature) or at ambient (+25°C), the agent will be liquid. The characteristics of evaporation (saturation curve) show that for these applications, we are in a two-phase flow with the presence of drops and gas. Gas-phase transport agent in every engine area is not a problem because it will be transported by the ventilation air flow. However, in the liquid phase, the efficient transport of the agent in the form of drops is more complex : If the drops are too large, they will tend to have a ballistic trajectory and will not reach all areas the engine. Therefore, the optimization of atomization of the agent becomes a central parameter for the design of the fire protection system.

In the context of this project, a technology called effervescent atomization was considered. The principle is to dissolve a gas (in our case carbon dioxide, CO_2), in the liquid

agent Novec1230™. Many adaptations of this technology are required to improve the performance of the atomization and subsequently the transport of the fire-extinguishing agent. The effervescent atomization process is a promising technology that offers potential improvements in terms of quality of atomization of the fluid and reduction of operating pressure. The goal of this project is to conduct theoretical and experimental research on the effervescent atomization process to identify the key parameters that influence the atomization.

Key words : Atomization, effervescence, experimental.

Table des matières

Résumé **5**

Abstract **7**

Contexte et introduction **15**

1 Etude bibliographie **19**
1.1 Le processus d'atomisation 19
1.1.1 Les buses mono-fluide 19
1.1.2 Les buses double-fluides ou assistées par air 20
1.1.3 L'atomisation flash 21
1.1.4 L'atomisation aérée 21
1.1.5 L'atomisation effervescente 22
1.1.6 Autres types d'atomiseurs 22
1.2 L'atomisation effervescente 25
1.2.1 Dans la littérature 25
1.2.2 Dans les systèmes protection feux des moteurs 35
1.3 Caractérisation des sprays 44
1.3.1 Régimes de fractionnement d'un jet liquide 44
1.3.2 La distribution des tailles de gouttes dans un spray 47
1.4 Structures des écoulements diphasiques liquide-gaz 48
1.4.1 Écoulements dans une conduite horizontale 48
1.4.2 Écoulements dans une conduite verticale 53
1.5 La solubilité des gaz dans les liquides 55
1.5.1 La polarité des molécules 58
1.5.2 La Théorie Classique de la Nucléation (Classical Nucleation Theory (CNT)) 58
1.6 Conclusion 62

2 Mise en place du banc d'essais et des moyens d'analyse **64**
2.1 Le banc expérimental 65
2.1.1 La bouteille de décharge 66
2.1.2 Pressurisation du système 68

2.1.3 La veine transparente . . . 70
2.1.4 L'électrovanne . . . 72
2.1.5 La buse . . . 73
2.1.6 Les conditions expérimentales . . . 73
2.1.7 Répétabilité et précision . . . 75
2.2 Imagerie par caméra rapide . . . 76
2.2.1 Objectifs . . . 76
2.2.2 Caractéristiques de la caméra rapide Phantom v2012 . . . 76
2.2.3 Rétro-éclairage Backlight haute-cadence . . . 77
2.3 Mesure des tailles de gouttes dans le spray par granulométrie à diffraction laser . . . 78
2.3.1 Objectifs . . . 78
2.3.2 Principe de fonctionnement du Spraytec . . . 78
2.3.3 Résultats obtenus et difficultés rencontrées . . . 81
2.3.4 Conclusion . . . 92
2.4 Automatisation du banc expérimental via LabVIEW . . . 92
2.4.1 Le système CompactDAQ . . . 93
2.4.2 Système de synchronisation et acquisition des données expérimentales . . . 93
2.5 Modélisation Thermodynamique avec ProSim . . . 96
2.5.1 Objectifs et fonctionnement du logiciel . . . 96
2.5.2 Propriétés thermodynamiques d'un constituant pur . . . 97
2.5.3 Propriétés thermodynamiques d'un système binaire et ternaire . 100
2.6 Conclusion . . . 103

3 Décharge de liquide pressurisé à l'azote, gaz propulsif très faiblement soluble 104
3.1 Objectifs . . . 104
3.2 Décharge à température ambiante . . . 105
3.2.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge . . . 105
3.2.2 Imagerie par caméra rapide . . . 106
3.3 Influence de la température du système . . . 118
3.3.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge . . . 119
3.3.2 Visualisation du spray . . . 120
3.3.3 Visualisation de l'écoulement en amont de la buse . . . 124
3.4 Modélisation de l'évolution de la pression au cours d'une décharge . . . 126
3.4.1 Modèle d'une détente de gaz pur . . . 126
3.4.2 Modèle d'une décharge de liquide pressurisé avec un gaz propulsif 129
3.5 Conclusion . . . 134

4 Effet du dioxyde de carbone, un gaz hautement soluble, sur le processus d'atomisation 137
4.1 Objectifs . . . 137

4.2 Influence du dioxyde de carbone à concentration modérée 138
4.2.1 Décharge d'eau pressurisée à concentration modérée de CO_2 . . 139
4.2.2 Décharge de Novec1230™ pressurisé à concentration modérée de CO_2 149
4.3 Influence de la quantité de dioxyde de carbone sur l'atomisation du Novec1230™ 159
4.3.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge 160
4.3.2 Imagerie par caméra rapide 164
4.4 Influence de la température du système 173
4.4.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge 175
4.4.2 Imagerie par caméra rapide 178
4.5 Conclusion 185

Conclusion et perspectives **187**

Références **196**

Table des figures

1.1 Schéma de principe pour des buses mono-fluide (source : Lefebvre [1]). . 20
1.2 Schémas des buses double-fluides (source : Lefebvre [1]). 21
1.3 Schéma d'un atomiseur aéré (source : Lefebvre [1]). 22
1.4 Schéma d'un atomiseur à ultrasons (source : Sonaer). 23
1.5 Schéma d'un atomiseur électrostatique (source : Fallem). 23
1.6 Schéma de la buse *flashing-swirl* (source : Rashkovan et al. [2]). 26
1.7 Fonction de distribution volumique des gouttes pour différentes quantités de CO_2 en fonction du diamètre de gouttes pour deux pressions, 30 et 45 bar (source : Rashkovan et al. [2]). 27
1.8 SMD en fonction de la pression et de la quantité de CO_2 (L/D = 2,32, $d_i = 0,5\ mm$ et $d_d = 0,86\ mm$) et D_{90} en fonction du pourcentage de CO_2 pour une pression de 47 bar (source : Rashkovan et al. [2]). 28
1.9 Le SMD et l'angle du spray θ en fonction de la pression (source : Zhen et al. [3]). 30
1.10 Le coefficient de décharge C_d en fonction de la pression (source : Zhen et al. [3]). 31
1.11 Le SMD mesuré à 1 m de la sortie de la buse en fonction du rapport L/D pour une concentration volumique de 66,21. Pression = 50 bar et D = 0,3 mm. (source : Zhen et al. [3]). 32
1.12 Diagramme d'équilibre de phases du système binaire Eau-CO_2 à 80°C (source : Caputo et al. [4]). 33
1.13 SMD en fonction du GLR pour différentes pressions (source : Caputo et al. [4]). 34
1.14 Mât d'un réacteur d'A320. 38
1.15 Évolution temporelle adimensionnée de la pression pour une décharge de Halon1301 pressurisé à l'azote (Électrovanne : Marotta) (source : Yang et al. [5]). 41
1.16 Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Faeth [6]). 45
1.17 Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]). 47
1.18 Schéma des structures d'écoulements diphasiques obtenues en conduite horizontale. Le gris correspond à la phase liquide et le blanc à la phase vapeur (source : Cheng et al. [8]). 49

1.19 Diagramme de Baker (1954) des régimes d'écoulement en conduite horizontale (source : Cheng et al. [8]). 51
1.20 Diagramme de Taitel et Dukler (1976) des régimes d'écoulement en conduite horizontale (source : Thome [9]). 52
1.21 Schéma des structures d'écoulements diphasiques obtenues en conduite verticale. Le gris correspond à la phase liquide et le blanc à la phase vapeur (source : Cheng et al. [8]). 53
1.22 Diagramme de Herwitt et Roberts (1969) des régimes d'écoulement en conduite verticale (source : Cheng et al. [8]). 55
1.23 Solubilité du CO_2 dans l'eau à différentes pressions en fonction de la température (source : Dodds et al. [10]). 57
1.24 Variation de l'énergie libre lors de la formation d'une bulle dans un liquide supercritique, en fonction de son rayon critique (source : [11]). 59
1.25 La nucléation homogène classique produisant des bulles de gaz dans le liquide à un niveau élevé de sursaturation de l'ordre de 100 ou plus (source : Jones et al. [12]). 60
1.26 La nucléation hétérogène classique (source : Jones et al. [12]). 61
1.27 La nucléation pseudo-classique (type III) et la nucléation non-classique (type IV) (source : Jones et al. [12]). 62

2.1 Les différentes configurations du banc expérimental. 66
2.2 Schéma et photographie du banc expérimental. 67
2.3 Refroidissement de la bouteille avec la neige carbonique. 68
2.4 Méthode de carbonatation (source : Steen [13]). 69
2.5 Représentation des aberrations géométriques pour la visualisation de l'écoulement en amont de la buse. 71
2.6 Schéma de l'électrovanne. 73
2.7 Photographie du rétro-éclairage Backlight utilisé. 78
2.8 Schéma du Spraytec de Malvern : 1. La source laser HeNe ; 2. Optique collimatée ; 3. Zone de mesure ; 4. Optique de Fourier (lentille de 300 mm ou 750 mm) ; 5. Série de détecteurs photodiodes ; 6. Système d'acquisition de données rapide. Source : Malvern Instruments. 79
2.9 Schéma de principe de la diffusion de la lumière par une particule. . . . 81
2.10 Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 25 bar d'azote. 82
2.11 Graphique type de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur. . . 82
2.12 Graphique de la distribution des tailles des particules pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 25 bar d'azote. La ligne rouge représente la répartition "pourcentage de volume plus petit que". 83
2.13 Graphique type de la distribution des tailles des particules. 83
2.14 En haut : Photographie de l'atomiseur à ultrasons Sonaer. En bas : Schéma de principe de l'atomiseur à ultrasons. Source : Sonaer. 85

2.15 Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray d'eau avec l'atomiseur à ultrasons Sonaer. 85
2.16 Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray de Novec1230™ avec l'atomiseur à ultrasons Sonaer. 86
2.17 Schéma explicatif de l'effet de variation du gradient de vapeur du Novec1230™ lors d'un spray. 87
2.18 Photographie de l'enceinte saturée. 88
2.19 À gauche : image du spray sans l'enceinte étanche. À droite : image du spray à l'intérieur de l'enceinte étanche. 88
2.20 À gauche : Schéma de l'installation de la sonde optique. À droite : Photographie de l'installation de la sonde optique avec l'atomiseur à ultrasons. 89
2.21 Schéma du principe de mesure de la sonde optique. 89
2.22 Principe de mesure de corde avec la sonde optique. 90
2.23 Schéma explicatif de l'analyse des signaux enregistrés par la sonde optique. 90
2.24 Schéma du système de synchronisation et d'acquisition des données LabVIEW. 94
2.25 Structures des boucles cadencées. 95
2.26 Principe de synchronisation des signaux générés. 96
2.27 Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du CO_2. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide Lee-Kesler-Plocker. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST. 99
2.28 Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du N_2. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide Lee-Kesler-Plocker. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST. 99
2.29 Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique de l'eau. Modèle Eau Pure. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST. 100
2.30 Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du Novec1230™. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide équation d'état. Courbe de saturation expérimentale fournie par 3M. 100

3.1 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 106
3.2 Visualisations du spray pour les décharges d'eau (a) et de Novec1230™ (b) pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante. 108

3.3 Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]) (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1). Le point rouge plein et creux représentant le régime rencontré dans le cadre de notre étude. 111
3.4 Image moyenne de 5 000 images instantanées prises entre 80 et 95% de la décharge. 112
3.5 Critère pour la mesure de l'angle du spray, fixé à 20% du niveau de gris. 113
3.6 Niveaux de gris sur l'axe du spray ($x = 0$) pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante. Échelle des niveaux de gris : 0 (noir) à 255 (blanc). 114
3.7 Visualisations de l'écoulement dans la veine transparente en amont de la buse pour les décharges d'eau (a) et Novec1230™ (b) pressurisés à l'azote, en condition de température ambiante. 116
3.8 Séquence de fin de la décharge Nov00CO_2Hot. (a) écoulement diphasique, (b) transition et (c) écoulement annulaire. 118
3.9 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C) et froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 119
3.10 Comparaison des visualisations expérimentales du spray pour les décharges de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C) (a) et froid (-20°) (b). 121
3.11 (a) Image moyenne de 5 000 images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge pour le cas à l'ambiant. (b) Image moyenne de 10 000 images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge pour le cas à froid. 122
3.12 Niveaux de gris sur l'axe du spray ($y = 0$) pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante et froide. Échelle des niveaux de gris : 0 (noir) à 255 (blanc). 122
3.13 Visualisations de l'écoulement dans la veine transparente en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (a) et à froid (b) pressurisé à l'azote. 124
3.14 Visualisation de l'écoulement dans la veine transparente à 1% du temps de décharge pour le cas Nov00CO_2Cold. 125
3.15 Comparaison des visualisations expérimentales pour les trois cas à 80% du temps de décharge. 126
3.16 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une détente d'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$, $c_{N2} = 350,7\ m/s$ et $\gamma = 1,4$. 130
3.17 Évolution temporelle de la pression pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$. 132

3.18 Évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$. 133
3.19 Évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote à froid (-20°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$. 134

4.1 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge d'eau pressurisé à l'azote (Wat00CO_2Hot) et d'une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone (Wat21CO_2Hot) en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 140
4.2 Évolution temporelle théorique et expérimentale de la pression dans la bouteille au cours des décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C). Pression : 40 bar, $C_d = 0,61$. 141
4.3 Visualisations expérimentales pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote, en conditions de température ambiante (+23°C). 143
4.4 Visualisations expérimentales de l'écoulement en amont de la buse pour une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante (+23°C). 145
4.5 Histogrammes des niveaux de gris (noir 0 à blanc 255) pour les visualisations de l'écoulement dans la veine transparente pour une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante (+23°C). 147
4.6 Images moyennes de 5 000 images instantanées des décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C), prises entre 80 et 95% du temps de décharge. 148
4.7 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 149
4.8 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). 151
4.9 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 152
4.10 Images moyennes des décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C). 154
4.11 SMD en fonction de la pression et de la quantité de CO_2 et D_{90} en fonction de la fraction massique de CO_2 pour une pression de 47 bar. Buse *pressure-swirl*, $L/D = 2,32$. (Source : Rashkovan et al. [2]). La ligne rouge correspond à notre étude. 155
4.12 SMD en fonction de la pression (et donc de la quantité de CO_2) pour un L/D = 1,9. La ligne rouge correspond à notre étude. (Source : Rashkovan et al. [2]). 156

4.13 Le SMD et l'angle du spray θ en fonction de la pression. Le point rouge correspondant à notre cas à 17% en masse de CO_2. (Source : Zhen et al. [3]). 157
4.14 Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]) (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1). Le point rouge représentant le régime dans lequel se situe l'étude de Zhen et al. [3]. 158
4.15 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante. Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 160
4.16 Évolution temporelle adimensionnée de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante. t_{dis} le temps de décharge. Pression (P_i = 40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 161
4.17 Schéma de principe des étapes qui interviennent lors d'un fort dégazage au cours d'une décharge de Novec1230™. 163
4.18 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 33% en masse de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 165
4.19 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 33% en masse de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 166
4.20 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 50% en masse de CO_2, à une température de +11°C, à 0,2% du temps de décharge et à 0,4% du temps de décharge (avec augmentation de la luminosité). 168
4.21 Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 50% en masse de CO_2, à une température de +11°C. 169
4.22 Visualisations expérimentales de l'écoulement dans la veine pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à +11°C. 170
4.23 Visualisations expérimentales du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à 11°C. 171
4.24 Images moyennes des décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à 11°C. 172
4.25 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. . . 176
4.26 Évolution temporelle adimensionnée de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C). t_{dis} le temps de décharge. Pression (P_i = 40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 177

4.27 Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C), ambiante (23°C) et à 11°C. Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 178
4.28 Visualisations expérimentales des décharges au Novec1230™ à froid à 0% (a) et 17% (b) en masse de CO_2 comparées au décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante à 0% (c) et 17% (d) en masse de CO_2. 180
4.29 Visualisations expérimentales des décharges au Novec1230™ à froid à 33% (a) et 50% (b) en masse de CO_2 comparées au décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante à 33% (c) et +11°C à 50% (d) en masse de CO_2. 182
4.30 Images moyennes des décharges de Novec1230™ à froid (-20°C). 183
4.31 Évolution de l'angle du spray en fonction de la quantité de CO_2 en conditions de température ambiante et à froid. 184

Liste des tableaux

1.1 Synthèse des différents types d'atomiseurs. 24
1.2 Angle du spray [°] pour différentes pressions et quantité de CO_2 (source : Rashkovan et al. [2]). 29
1.3 Les propriétés clés du Novec1230™ et du Halon1301. 37

2.1 Propriétés thermo-physiques de l'eau et du Novec1230™. 65
2.2 Caractéristiques du thermocouple de la bouteille de décharge. 67
2.3 Caractéristiques du capteur de pression de la bouteille de décharge. . . 68
2.4 Caractéristiques manomètre numérique du cylindre intermédiaire. . . . 70
2.5 Caractéristiques du tube en verre borosilicate. 70
2.6 Caractéristiques de l'électrovanne. 73
2.7 Résumé des conditions expérimentales. 74
2.8 Caractéristiques du Spraytec de Malvern. 80
2.9 Caractéristiques de l'atomiseur à ultrasons Sonaer. 84
2.10 Résultats obtenus de l'analyse des sprays d'eau et de Novec1230™ produit par l'atomiseur à ultrasons. 91
2.11 Systèmes binaires et ternaires étudiés. 101
2.12 Compositions des phases des systèmes binaires étudiés. 102

3.1 Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote. 104
3.2 Nombre de Reynolds (Re), nombre de Weber (We) et nombre de Ohnesorge (Oh) pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante. 110
3.3 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 115
3.4 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (23°C) et froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques. 119

4.1 Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés au dioxyde de carbone et à l'azote. 138
4.2 Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à concentration modérée de dioxyde de carbone. 139
4.3 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C). Pression : 40 bar. 140
4.4 Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges d'eau pressurisée au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 142
4.5 Durées des décharges à l'eau et au Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C). 150
4.6 Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges d'eau pressurisée au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 150
4.7 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C). 153
4.8 Angles d'ouverture du spray pour les décharges d'eau et de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C). 155
4.9 Conditions expérimentales pour les décharges de Novec1230™ pressurisé au dioxyde de carbone et à l'azote. 160
4.10 Durée des décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante. 161
4.11 Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ pressurisé à différentes concentrations de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C). 164
4.12 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C) sauf pour le cas à 50% en masse (11°C). 170
4.13 Angles du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à +11°C. 172
4.14 Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C). 174
4.15 Rappel de la composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C) et à +11°C. 174
4.16 Conditions expérimentales pour les décharges de Novec1230™ pressurisé au dioxyde de carbone et à l'azote. 175
4.17 Temps décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante et froide. 178

4.18 Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ pressurisé à différentes concentrations de CO_2, en conditions de température froide (-20°C). 179
4.19 Angles d'ouverture du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante et froide. 184

Contexte et introduction

Les incendies font partie des risques les plus redoutables en aéronautique, en raison des difficultés à les combattre, comme par exemple dans les espaces confinés où la propagation peut être très rapide. Le Halon1301 est utilisé depuis plus de 50 ans comme agent extincteur pour les moteurs d'avions, l'APU (Auxiliary Power Unit) et les applications de protection feux cargo. Le Halon1301 possède des propriétés spécifiques pour les systèmes de protection feux des moteurs. Il possède un point d'ébullition bas et une pression vapeur élevée, ce qui facilite le mélange de l'agent avec l'air de la ventilation dans les zones feux. De plus, son point d'ébullition à -57,8°C et sa capacité à se vaporiser à chaque point de décharge sont des propriétés physiques désirables.

Suite à des changements de la réglementation environnementale, il est nécessaire de remplacer le Halon1301, l'agent extincteur actuellement présent sur les systèmes de protection feux des moteurs d'avions. L'utilisation de cet agent a été banni dans l'industrie par le protocole de Montréal (1994) et de Kyoto (1998) qui vise à réduire les substances qui appauvrissent la couche d'ozone ainsi que les gaz à effet de serre. Des dérogations établies par la Commission Environnementale Européenne existent et sont appliquées au domaine de l'aéronautique à cause du manque de solutions alternatives. En ce qui concerne le système d'extinction feux des zones moteurs et APU dans la conception de nouveaux avions, les dérogations sont arrivées à terme fin 2014. Les dérogations concernant l'utilisation du Halon1301 dans les avions en service arriveront à terme fin 2040.

Depuis plusieurs années, Airbus travaille sur le projet de remplacement du Halon1301, appliqué notamment aux systèmes de protection feux des zones moteurs et APU. Depuis 2003, plusieurs agents alternatifs au Halon1301 ont été identifiés. Dans notre cas, on s'intéresse à un candidat qui apparait comme une alternative intéressante respectueuse de l'environnement : le Novec1230™. En 2011, dans le cadre du programme A350, le Novec1230™ n'a pas passé un test de certification de la FAA (Federal Aviation Administration) en condition froide. L'analyse de cet échec montre le manque de compréhension de plusieurs phénomènes physique tel que son atomisation et son transport. Pour améliorer les performances de l'agent, des améliorations de la technologie sont requises : atomisation, transport, composition, etc.

Le système de protection feux des zones moteurs conventionnel est constitué de

deux bouteilles de décharge et d'un système de distribution qui se termine par des buses simples évasées. Chaque bouteille de décharge, fortement pressurisée, est équipée d'une cartouche pyrotechnique, et d'une sortie fermée par un opercule. Les deux bouteilles sont reliées au système de distribution par une connexion en Y. L'opercule est rompu par l'onde de choc créée par l'activation de la cartouche pyrotechnique et l'agent est ensuite acheminé puis dispersé dans les différentes zones du moteur. Les systèmes de protection feux sont conçus en se basant sur l'agent requis, pour une concentration d'agent volumétrique minimum spécifique dans toutes les zones feux du moteur immédiatement après une décharge, afin d'assurer une extinction efficace en cas d'incendie. La différence la plus importante entre le Halon1301 et le Novec1230™est leur phase physique. En effet, le Halon1301 est un gaz, alors que le Novec1230™est liquide en conditions ambiantes (il est liquide en dessous de +49,2°C). Que ce soit à la température de ventilation froide (température négative) ou à l'ambiant (+25°C), l'agent sera liquide. Les caractéristiques d'évaporation (courbe de saturation) indiquent que pour ces applications, nous sommes dans un état diphasique avec la présence de gouttes et de gaz : plus le mélange sera froid et plus l'équilibre sera déplacé vers la phase liquide.

En phase gazeuse, le transport de l'agent dans chaque recoin du moteur ne pose pas de problème car il sera transporté par l'écoulement d'air de la ventilation. Or, en phase liquide, le transport efficace de l'agent sous forme de gouttes est plus complexe : si les gouttes sont trop grosses, elles tendront à avoir une trajectoire balistique et n'atteindront pas toutes les zones feux du moteur. Par conséquent, l'optimisation de l'atomisation de l'agent devient un paramètre central pour la conception du système de protection des incendies.

On peut classer les régimes d'atomisation en deux catégories : l'atomisation dynamique et l'atomisation thermodynamique.

1. L'atomisation dynamique consiste à utiliser des atomiseurs spécifiques : la taille des gouttes est caractérisée par la géométrie des buses utilisées qui sont plus ou moins complexes, la pression en amont et la température du fluide. De manière classique, pour atomiser, on utilise soit les forces d'inertie (cisaillement), soit la géométrie de la buse (swirl, impact, etc.). Par exemple, dans l'atomisation aérée, le principe consiste à injecter du gaz à quelques centimètres en amont de la buse : l'interface liquide-gaz est déstabilisée par la force de cisaillement engendrée par la vitesse relative existante entre les deux phases.

2. L'atomisation thermodynamique consiste à utiliser les propriétés thermodynamiques du fluide. Dans cette catégorie, on peut distinguer deux technologies :

— L'atomisation flash, exploitant l'instabilité thermodynamique du fluide : c'est le phénomène qui intervient lors des décharges au Halon1301, la pression extérieure est très inférieure à la pression vapeur saturante du fluide en amont de la buse.

— L'atomisation effervescente, qui consiste à dissoudre un gaz hautement soluble dans un liquide, pour créer un écoulement diphasique contenant des bulles et des poches de gaz au cours d'une décharge, augmentant ainsi les forces de cisaillement.

C'est cette dernière technologie qui est considérée dans le contexte du projet. Le principe est de venir dissoudre un gaz hautement soluble (dans notre cas du dioxyde de carbone, CO_2), dans l'agent liquide Novec1230^{TM}. Plusieurs adaptations de cette technologie sont requises pour améliorer les performances de l'agent tel que son atomisation et son transport. Le processus d'atomisation effervescente est une technique d'atomisation diphasique prometteuse qui offre des améliorations potentielles en terme de qualité d'atomisation du fluide et de réduction de pression d'utilisation. En effet, dans le cadre de notre étude, les critères recherchés pour une décharge optimale sont :

— Une masse d'agent déchargée le plus rapidement possible, donc un débit massique élevé. Dans le cas contraire, la ventilation engendre des pertes.
— La génération de fines gouttes avec une proportion de masse d'agent la plus grande possible. De l'agent non-atomisé correspond à une perte.
— Un spray dont l'angle d'ouverture est large.
— Un système de masse faible.
— Une configuration de système la plus simple possible est un facteur de robustesse évitant les cas de pannes et d'usure liés aux systèmes plus complexes, et simplifiant la maintenance.

L'objectif de ce projet est de conduire des recherches expérimentales sur le processus d'atomisation effervescente afin de prédire quels sont les paramètres clés qui influencent l'atomisation. Une revue de la littérature des types d'atomisation et de l'état actuel de la technologie d'atomisation effervescente a été menée et est présentée Chapitre 1. Les types d'écoulements diphasiques obtenus et leurs impacts sur le spray en sortie, ainsi que le système d'extinction feux type sont également présentés dans ce chapitre.

Un banc d'essais a été conçu et mis en place au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Les éléments qui composent ce banc expérimental ainsi que les moyens d'analyse utilisés pour interpréter les résultats des campagnes d'essais sont présentés Chapitre 2. Un système d'acquisition de données dans la bouteille de décharge et de synchronisation du banc via LabVIEW facilite l'interprétation

et la compréhension des événements qui interviennent lors d'une décharge. Une caméra haute cadence Phantom v2012 permet de visualiser l'écoulement en amont de la buse ou le spray lors d'une décharge. Elle permet également un suivi temporel en lien avec les mesures de pressions et de températures acquises dans la bouteille de décharge, pour la compréhension physique d'une décharge. Des campagnes d'essais sont réalisées en conditions de température ambiante (+23°C) ainsi qu'à basse température (-20°C).

Dans un premier temps, des décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés avec un gaz propulsif, ici l'azote, sont étudiées et présentées Chapitre 3. L'eau permet d'avoir une décharge de référence et donc un point de comparaison avec les résultats obtenus lors de décharges au Novec1230™. En conditions de température ambiante, l'eau ne s'évapore pas contrairement au Novec1230™ qui s'évapore très rapidement. Il est donc difficile dans le cas du Novec1230™ de distinguer sur le processus d'atomisation quel est le phénomène prépondérant pour cet agent : son taux d'évaporation ou son efficacité d'atomisation.

Un modèle du banc de décharge est mis en place. Ce modèle (effet de la pression et de la température initiale), basé sur les équations thermodynamiques, permet d'obtenir l'évolution de la pression dans la bouteille de décharge en fonction des conditions initiales. Ce modèle nous permet d'obtenir une bonne approximation de l'évolution de la pression dans la bouteille en fonction du temps lors d'une décharge de liquide pressurisé avec un gaz propulsif comme c'est le cas pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote. Cependant, dans le cas d'une décharge au Novec1230™, nous n'avons pas pu fournir de modèle. Ces difficultés sont expliquées Chapitre 3.

Une variation de la composition de l'agent dans la bouteille de décharge permet d'observer l'influence du gaz dissous sur le processus d'atomisation (phénomène intervenant dans la bouteille, écoulement en amont de la buse, structure du spray). C'est le sujet abordé Chapitre 4.

Chapitre 1

Etude bibliographie

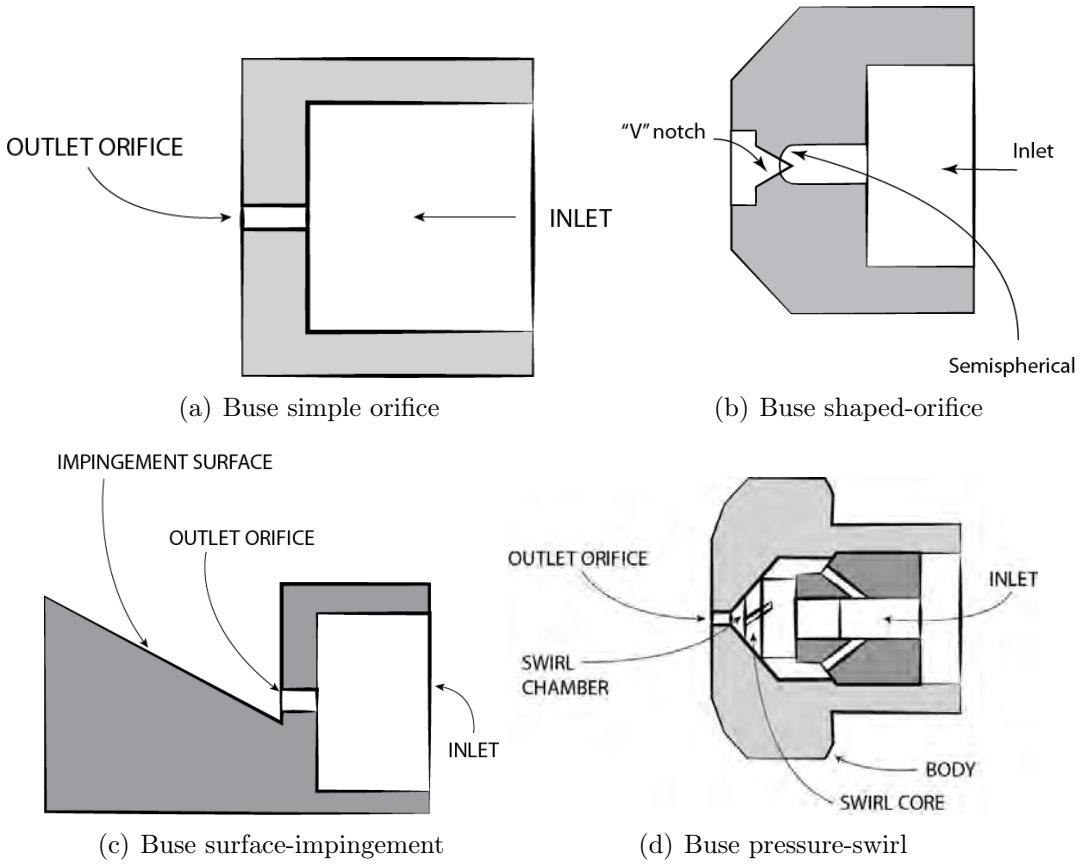
1.1 Le processus d'atomisation

La fragmentation d'un liquide sous forme de spray, autrement dit sous la forme d'un nuage de fines gouttelettes est un processus utilisé dans diverses applications industrielles. La sélection d'une méthode particulière d'atomisation prend en compte plusieurs facteurs : économique, échelle de production, propriétés physique et chimique des gouttes/particules à produire, tailles des gouttes désirées. Le mode d'atomisation est strictement relatif à l'application du processus de spray et à la gamme de diamètre de goutte désirée. Par exemple, dans l'industrie automobile, le processus d'atomisation est utilisé dans les chambres à combustion des moteurs à injection directe afin de pulvériser le jet de carburant en fines gouttelettes pour l'évaporer et le brûler plus efficacement. Dans les centrales nucléaires, l'atomisation est utilisée pour le refroidissement des coeurs en pulvérisant des liquides de refroidissement. On retrouve également l'atomisation dans d'autres domaines comme l'agriculture, la peinture, la métallurgie, les systèmes de protections feux, etc. Pour chacune de ces applications, différentes méthodes d'atomisation dynamique ont été développées : par interaction aérodynamique, mécanique, électrostatique, thermodynamique ou même par ultrasons. Pour ce faire, il existe une grande variété de types d'atomiseurs, aussi appelés "buses". On peut également pulvériser un liquide en utilisant ses propriétés thermodynamiques. C'est le principe, par exemple, de l'atomisation flash ou par cavitation. Dans le cadre de notre projet, on s'intéresse à une technologie appelée *atomisation effervescente*, présentée Section 1.2. Cette technique couple la méthode dite *dynamique* et la méthode *thermodynamique* et présente un fort potentiel pour la génération de petites gouttes, critère important dans le contexte industriel de cette étude.

1.1.1 Les buses mono-fluide

Les buses mono-fluide utilisent l'énergie cinétique du fluide pour le pulvériser en fines gouttes. Plusieurs configurations existent pour ce type d'atomiseur. Le choix de

la buse dépend des caractéristiques du spray désirées. L'atomiseur le plus simple est la buse simple orifice (cf. Figure 1.1 (a)). Elle n'est pas très efficace à basse pression (<25 bar) produisant un jet droit de liquide. Ensuite il existe de nombreuses buses avec des géométries plus complexes. Par exemple, une buse *shaped-orifice* comme schématisée sur la Figure 1.1 (b), produit des sprays plats et est très utilisée dans le domaine de la peinture. Il existe également des buses à impact comme la buse *surface-impingement*, schématisée sur la Figure 1.1 (c), où le jet de liquide est projeté sur une surface permettant d'obtenir une nappe liquide se pulvérisant en fines gouttes (souvent utilisées dans l'agriculture), ou encore les buses *pressure-swirl* produisant un spray creux, très efficaces pour l'obtention de fines gouttelettes (cf. Figure 1.1 (d)).



(a) Buse simple orifice

(b) Buse shaped-orifice

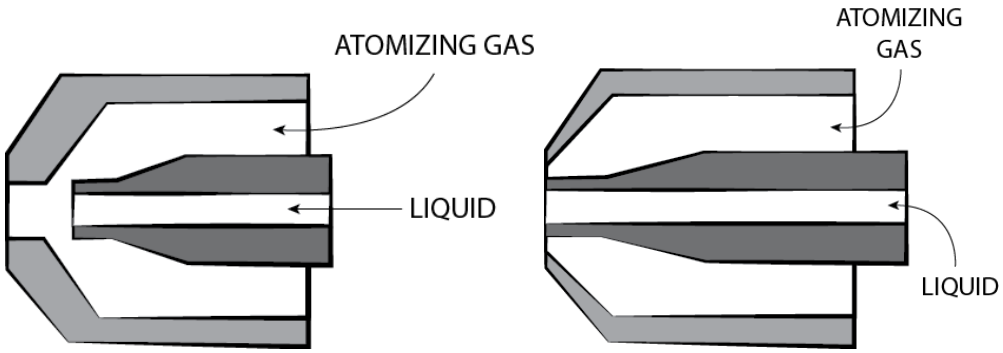
(c) Buse surface-impingement

(d) Buse pressure-swirl

FIGURE 1.1 – Schéma de principe pour des buses mono-fluide (source : Lefebvre [1]).

1.1.2 Les buses double-fluides ou assistées par air

Les buses double-fluides permettent d'atomiser un liquide en utilisant un flux secondaire de gaz. Il existe différentes configurations : à mélange interne (cf. Figure 1.2 (a)) ou à mélange externe (cf. Figure 1.2 (b)). Dans le cas des buses à mélange interne, les deux fluides sont en contact à l'intérieur de la buse. L'effet de cisaillement entre le



(a) Double-fluides à mélange interne (b) Double-fluides à mélange externe

FIGURE 1.2 – Schémas des buses double-fluides (source : Lefebvre [1]).

gaz à haute vitesse et le liquide à basse vitesse permet de pulvériser le liquide en fines gouttelettes en sortie. Dans le cas des buses à mélange externe, les deux fluides sont en contact juste à la sortie de la buse. La configuration à mélange externe est moins efficace que celle à mélange interne. En effet, pour obtenir le même niveau d'atomisation, un débit de gaz plus important est nécessaire dans un atomiseur à mélange externe. Néanmoins, elles permettent une bonne atomisation avec également des liquides dont les viscosités sont importantes.

1.1.3 L'atomisation flash

L'atomisation flash est un phénomène particulier pour lequel il y a un couplage fort entre le processus d'évaporation et le processus d'atomisation. L'atomisation flash exploite une instabilité thermodynamique pour pulvériser le liquide en fines gouttelettes. Ce phénomène intervient lorsqu'un liquide est injecté dans un environnement où la pression ambiante est inférieure à sa pression de saturation (Environ 5 bar pour le Halon1301 et 0,40 bar pour le Novec1230^{TM}à 25°C). Il en résulte une ébullition rapide et "en masse" du liquide qui provoque une fragmentation de la phase liquide en gouttelettes. C'est ce phénomène qui intervient lors de décharges de halon dans les systèmes FirEx, détaillée dans la Section 1.2.2.

1.1.4 L'atomisation aérée

Cette méthode d'atomisation, essentiellement différente des autres techniques d'atomisation double-fluides, consiste à injecter un gaz à faible vitesse (donc une quantité plus faible) dans l'écoulement de liquide en amont d'une buse simple orifice (cf. Figure 1.3). Cette technique permet d'améliorer les performances d'atomisation dans l'obtention de tailles de gouttes plus petites et/ou de pression d'injection plus faible [14, 15]. La différence de pression entre le gaz et le liquide est faible. Le gaz injecté va ainsi former des bulles et produire un écoulement diphasique juste en amont de la buse. Lorsque

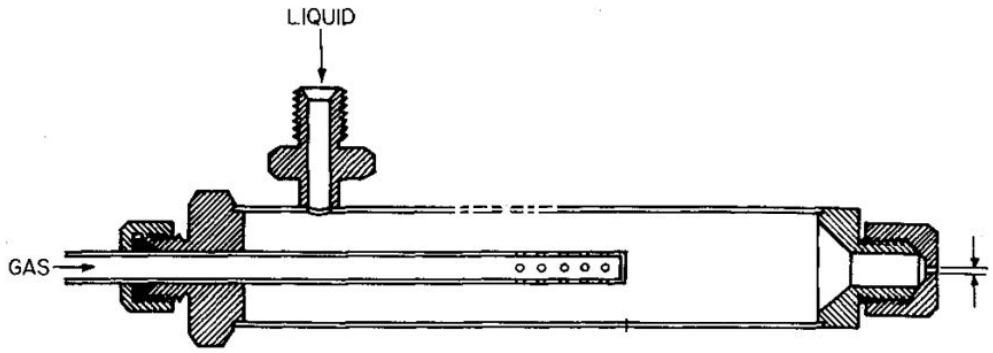


FIGURE 1.3 – Schéma d'un atomiseur aéré (source : Lefebvre [1]).

les bulles de gaz traversent la buse, elles se dilatent et se déforment fortement, ce qui a pour conséquence de rompre rapidement la phase liquide et ainsi produire de fines gouttelettes. Cette méthode permet d'obtenir une bonne atomisation même à faible pression d'injection et de débit de gaz. Les tailles de gouttes obtenues avec ce type de buse sont comparables à celles obtenues avec les buses assistées par air pour le même rapport liquide-gaz. Le seul inconvénient de cette méthode est qu'il faut un système supplémentaire permettant l'arrivée de l'alimentation en gaz, ce qui est une problématique pour certaines applications qui nécessitent de limiter le poids et la complexité de leur système, comme c'est le cas pour les avionneurs.

1.1.5 L'atomisation effervescente

Une nouvelle technologie appelée *atomisation effervescente*, couple la méthode dite *dynamique* et la méthode *thermodynamique*. Elle consiste à dissoudre un gaz dans le liquide lors de son stockage. Puis, lors de la décharge, le dégazage forme des bulles qui accélèrent le processus d'atomisation. Dans le cadre de ce travail afin de répondre aux problèmes de l'industriel, c'est cette technologie qui est étudiée. Cette méthode d'atomisation, expliquée plus en détails Section 1.2, permettrait de satisfaire les contraintes industrielles dans notre cas.

1.1.6 Autres types d'atomiseurs

Les buses ultrasoniques

Les buses à ultrasons utilisent des vibrations hautes fréquences. Le liquide entre par l'arrière de la sonde composée de céramiques piézoélectriques et, sans utiliser de pression d'air, le liquide est pompé au travers du centre de la sonde et traverse la sonde jusqu'à la pointe vibrante (cf. Figure 1.4). Le liquide est ensuite mécaniquement pulvérisé en fines particules d'un diamètre pouvant aller de 5 à 60 μm selon les modèles. Ces buses sont utilisées dans le domaine médical ou encore les processus d'humidification pour leur pulvérisation à très faibles débits.

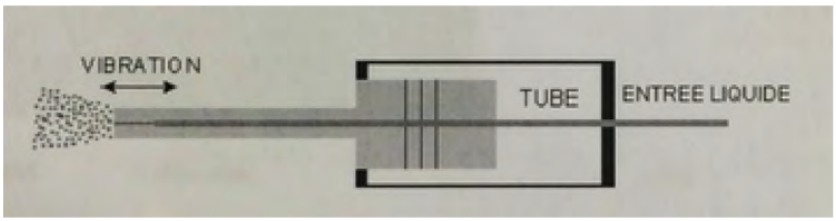


FIGURE 1.4 – Schéma d'un atomiseur à ultrasons (source : Sonaer).

Les buses électrostatiques

Les buses électrostatiques sont très utilisées pour la pulvérisation de peinture et de vernis à très faible débit et de manière précise dans le but de limiter leur émissions polluantes dans l'atmosphère. Le principe consiste à charger électriquement le fluide à pulvériser et de créer une tension électrique continue entre l'objet mis à la terre et l'extrémité de l'atomiseur, ce qui génère un champ électrostatique (cf. Figure 1.5). Le champ électrostatique pilote ainsi la trajectoire des particules. Les plus petites tailles de gouttes sont obtenues à très haute tension.

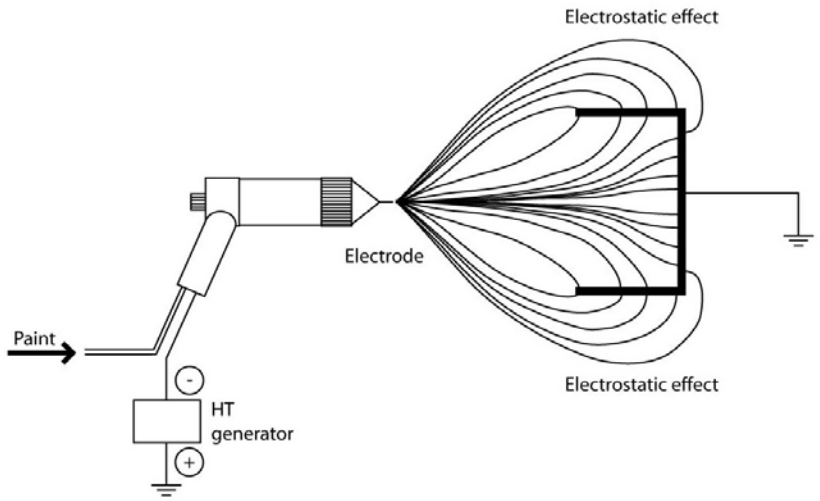


FIGURE 1.5 – Schéma d'un atomiseur électrostatique (source : Fallem).

Le Tableaux 1.1 présente une synthèse des différentes buses présentées.

Synthèse		
Type	Avantages	Inconvénients
Mono-fluide 1. Simple-orifice 2. Autres (shaped-orifice, pressure-swirl...)	1. Configuration simple, robuste 2. Angle de spray large, haute pression	1. Jet droit, angle de spray étroit 2. Complexité mécanique, masse
Double-fluides — Mélange interne — Mélange externe	1. Bonne atomization 2. Adaptées aux liquides visqueux	1. Nécessite une arrivée secondaire de gaz 2. Pas adaptées au GLR [1] élevé
Flash	— Exploitent une instabilité thermodynamique — Bonne atomisation	Pour une gamme de fluide dont la pression de saturation est supérieure à celle du gaz environnant
Aérée	Très bonne atomisation même à faible pression d'injection de gaz	1. Nécessite une arrivée secondaire de gaz 2. Complexité mécanique
Ultrasonique et électrostatique	1. Fine atomisation 2. Vitesse de spray faible	Débit très faible

TABLE 1.1 – Synthèse des différents types d'atomiseurs.

Pour rappel, dans le cadre du projet, les critères recherchés pour une décharge optimale sont :

— Une masse d'agent déchargée le plus rapidement possible donc un débit massique élevé.

— La génération de fines gouttes avec une proportion de masse d'agent la plus grande possible.

— Un spray dont l'angle d'ouverture est large.

— Un système de masse faible. Les configurations complexes d'atomiseur sont donc exclues.

— La robustesse qui se traduit par trois principes : la résistance au vieillissement et une configuration simple pour éviter de nombreux modes de panne et pour simplifier la maintenance du système.

1.2 L'atomisation effervescente

1.2.1 Dans la littérature

Une nouvelle technologie est apparue dans le domaine de la combustion il y a quelques années. Il s'agit de *l'atomisation effervescente*. On trouve déjà l'atomisation effervescente dans l'utilisation de sprays commerciaux tels que les aérosols, les parfums etc. Avec un intérêt grandissant de contrôler les émissions polluantes, l'injection de fuel et son atomisation est une des voies principalement explorée dans le domaine de la combustion [2, 3, 16, 17]. L'objectif étant de produire de fines gouttelettes pour qu'elles se mélangent et s'évaporent rapidement pour obtenir une combustion la plus propre possible. Des études ont également été faites sur des sprays d'eau, comme dans le domaine pharmaceutique par exemple [4], où l'objectif est d'obtenir des gouttes micrométriques. Dans le domaine de l'aviation, on remarque que ce phénomène apparaît lors de décharges de halon ou d'agents alternatifs dans les systèmes de protection feux des moteurs [5, 18, 19]. Le principe de cette technologie consiste à venir dissoudre un gaz hautement soluble directement dans le réservoir contenant le liquide à atomiser. Lors de la décharge du réservoir, la chute de pression provoque un dégazage du gaz dissous sous forme de bulles à l'intérieur du liquide dans l'écoulement. Cette dilatation des bulles en sortie de système dans le spray va également améliorer l'atomisation du liquide. L'inconvénient de cette méthode c'est qu'elle ne peut s'appliquer qu'aux liquides qui peuvent recevoir une quantité significative de gaz dissous. Cette technologie couple la méthode *dynamique*, que l'on retrouve dans l'atomisation aérée par la formation de bulles de gaz en amont de la buse, et la méthode *thermodynamique* que l'on retrouve

1. GLR : le rapport massique gaz-liquide (*Gas-to-Liquid Ratio*).

dans l'atomisation flash.

Les différentes recherches menées ces dernières années portent en particulier sur les caractéristiques des sprays obtenus. Les effets de la pression d'injection, la concentration en gaz dissous et la géométrie des buses (taille de l'orifice et rapport L/D) sont étudiés. Le rapport L/D correspond au rapport de la longueur de passage de l'orifice sur le diamètre de l'orifice). À l'aide de différents diagnostics laser, les tailles de gouttes sont mesurées dans le spray. Le diamètre moyen de Sauter (Sauter Mean Diameter (SMD)) est fréquemment utilisé pour représenter le diamètre de goutte moyen obtenu dans un spray. Il est défini comme le diamètre d'une goutte dont le rapport volume/surface est le même que celui du spray entier [1]. L'angle d'ouverture du spray est mesuré par visualisation directe avec une caméra. Les propriétés de l'écoulement sont également étudiées en évaluant le coefficient de décharge C_d. Dans le cadre de notre étude, nous étudions les effets de la concentration en gaz dissous.

Dans le contexte de l'optimisation de la combustion, Rashkovan et al. [2], Zhen et al. [3], Karaeen et al. [16] et Solomon et al. [17] ont réalisé des études expérimentales sur le processus d'atomisation de carburant contenant du dioxyde de carbone ou de l'air dissous.

Rashkovan et al. ont conçu un système d'injection produisant un spray avec un SMD plus faible que celui obtenu avec un système typique d'injection de carburant pour une même pression test (pour un système typique, le SMD est généralement de l'ordre de 15-25 μm pour des pressions allant de 50 à 130 bar). La buse utilisée, appelée *flashing-swirl*, est constituée d'un orifice d'entrée, d'une chambre d'expansion, d'un conduit torsadé et d'un orifice de sortie telle que représentée Figure 1.6. Généralement,

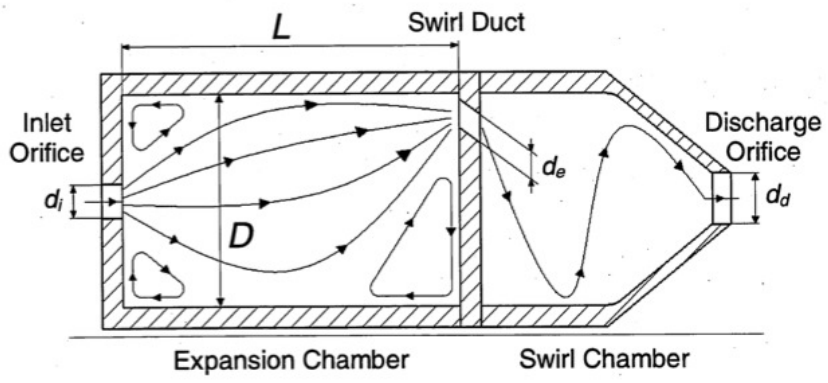


FIGURE 1.6 – Schéma de la buse *flashing-swirl* (source : Rashkovan et al. [2]).

le fluide est injecté à haute pression lors de l'utilisation de buses *pressure-swirl* pour produire de fines gouttelettes. L'objectif est donc d'étudier la combinaison d'une buse *pressure-swirl* au processus d'atomisation effervescente. Lorsque le mélange diphasique

entre dans la chambre d'expansion, une partie du gaz dissous se transforme en petites bulles. La chambre d'expansion permet à ces petites bulles de grossir. Puis lorsque l'écoulement traverse l'orifice de sortie, la dilatation des bulles consécutive à la baisse de pression provoque une désintégration rapide de la phase liquide en gouttelettes. Les pressions test vont de 23,6 à 47 bar pour quatre quantités de CO_2 : 0%, 7,6%, 12,5% et 17,3% en masse. L'installation d'une chambre d'expansion a été étudiée par Solomon et al. [17] lors de recherches expérimentales sur les caractéristiques d'un spray de carburant contenant de l'air dissous. Ils ont montré qu'une amélioration de l'atomisation pouvait être obtenue en installant une chambre d'expansion au niveau de la buse dans l'écoulement. Son utilité réside dans le taux de grossissement des bulles qui peut être relativement lent dans les systèmes à gaz dissous. Les résultats de Rashkovan et al. [2] montrent que les systèmes sans chambre d'expansion affichent un comportement instable du SMD. Pour les systèmes comportant une chambre d'expansion (combinée à la buse), l'effet du dioxyde de carbone dépend de la différence entre la pression test et la pression ambiante. Pour une différence de pression supérieure à 23 bar, un avantage considérable de l'atomisation carburant-CO_2 sur l'atomisation du carburant pur a été observé. Le CO_2 a un effet important, pas seulement sur le SMD, mesuré grâce à un laser analyseur de particules, mais également dans l'amélioration de la distribution de la fraction volumique des gouttes. À basse pression, la forme caractéristique de la courbe de distribution volumique apparait être indépendante de la quantité de CO_2 injectée. Ce qui est consistant avec les observations de Zhen et al. [3] présentées un peu plus bas. La Figure 1.7 présente la fonction de distribution volumique des gouttes pour différentes quantités de CO_2 en fonction du diamètre de gouttes pour deux pressions, 30 et 45 bar. À haute pression, plus la concentration en CO_2 augmente et plus la taille de

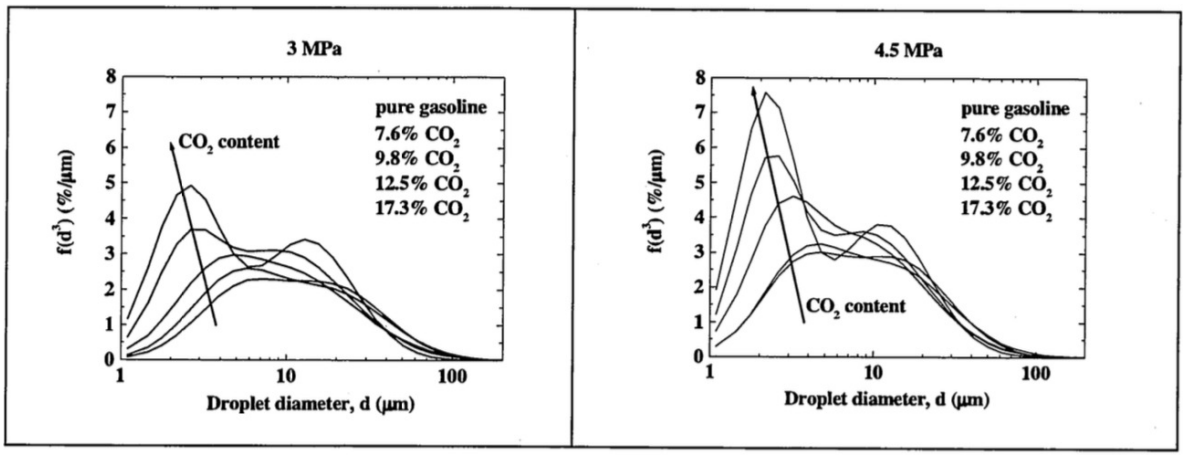


FIGURE 1.7 – Fonction de distribution volumique des gouttes pour différentes quantités de CO_2 en fonction du diamètre de gouttes pour deux pressions, 30 et 45 bar (source : Rashkovan et al. [2]).

goutte mesurée est petite. La fonction de distribution volumique combine linéairement deux fonctions de distribution volumique (distributions log-normal), chacune décrivant

la distribution volumique d'un type de population de gouttes. Soit,

$$f(d^3) = c_1\, f_1(d^3) + c_2\, f_2(d^3) \tag{1.1}$$

Où l'indice 1 et 2 correspondent aux populations de grosses et petites gouttes respectivement. c_1 et c_2 correspondent au facteurs de pondération et f la distribution récurrente de taille de goutte basée sur le volume :

$$f(d^3) = \frac{1}{d\,\sigma\sqrt{2\pi}}\, exp\left(-\frac{(ln\, d - ln\, D_{30})^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1.2}$$

Avec D_{30} le diamètre moyen de volume qui correspond au diamètre d'une goutte dont le volume, s'il est multiplié par le nombre de gouttes, est égal au volume total du liquide pulvérisé [1]. σ représente la déviation standard.

Les caractéristiques du spray (SMD et D_{90}) sont mesurées à l'aide d'un Malvern Mastersizer X (laser analyseur de taille de particules). Le D_{90} caractérise le diamètre des gouttes correspondant à 90% du volume total de liquide [1]. Une caméra numérique permet de visualiser l'angle du spray. La Figure 1.8 présente les résultats du SMD en fonction de la pression et du D_{90} en fonction de la quantité de CO_2. Les grandeurs L/D, d_i et d_d sont les valeurs géométriques de l'atomiseur (cf. Figure 1.6). L'angle

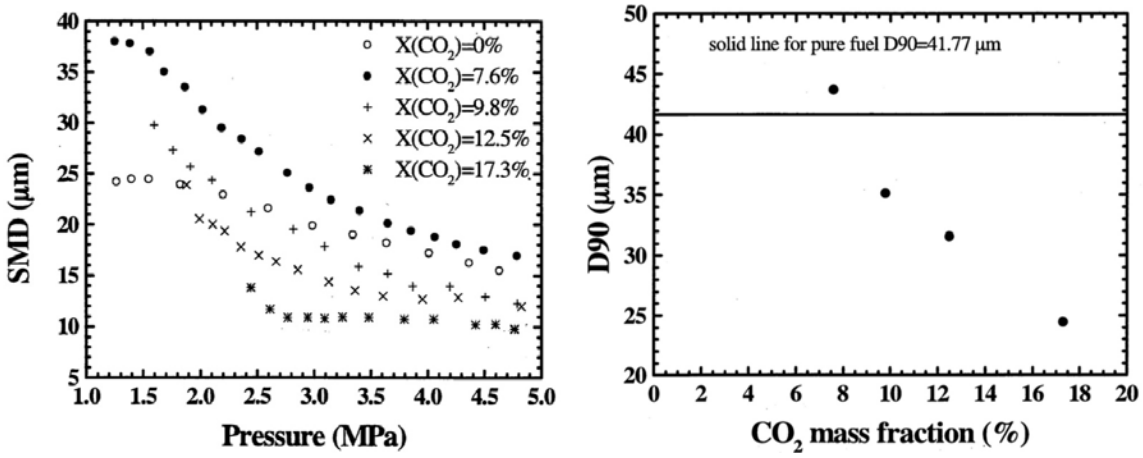


FIGURE 1.8 – SMD en fonction de la pression et de la quantité de CO_2 (L/D = 2,32, $d_i = 0,5\ mm$ et $d_d = 0,86\ mm$) et D_{90} en fonction du pourcentage de CO_2 pour une pression de 47 bar (source : Rashkovan et al. [2]).

du spray est indépendant de la pression mais dépend fortement de la quantité de CO_2 injectée. L'angle d'ouverture d'un spray de carburant pur (pressurisé à l'azote) est plutôt constant alors que pour un spray carburant-CO_2, l'angle d'ouverture du spray tend à diminuer avec une augmentation de CO_2. Ceci est attribué à la rapide évaporation des petites gouttes situées en périphérie de l'enveloppe du cône du spray lorsque la quantité de dioxyde de carbone augmente. Le Tableau 1.2 présente les résultats de l'angle du

spray en fonction de la pression et de la quantité de CO_2.

Pression [bar]	%CO_2 en masse dans le carburant			
	0%	7,6%	12,5%	17,3%
23,6	87,6	77,3	61,1	55,8
27	85,2	75,9	61,1	56,7
30,3	83,9	77,3	61,1	56,7
39	83,9	81,3	64,4	55,8
47	83,9	81,3	64,4	55,8

TABLE 1.2 – Angle du spray [°] pour différentes pressions et quantité de CO_2 (source : Rashkovan et al. [2]).

Zhen et al. [3] ont étudié expérimentalement le processus qu'ils nomment : injection de carburant contenant un gaz dissous (Injection of Fuel Containing Dissolved Gas (IFCDG)). Les expériences ont été réalisées avec du carburant contenant du dioxyde de carbone et de l'air, sous conditions atmosphériques. Une sur-pressurisation du système à l'azote est utilisée (allant de 30 à 110 bar). Ils ont utilisé un atomiseur de type *diesel-hole* de diamètre de sortie 0,3 mm et de rapport L/D = 5, ainsi que des buses simples de même diamètre de sortie 0,3 mm mais à L/D différents allant de 4 à 50. Dans cette étude, les caractéristiques du spray ont été observées et mesurées par ombroscopie et anémométrie laser Doppler (Laser Doppler Anemometry (LDA) qu'on appelle aussi vélocimétrie laser) respectivement. L'ombroscopie est une technique de visualisation des gouttes basée sur l'imagerie haute résolution en éclairage de fond pulsé et la LDA est une technique optique basée sur la mesure de la vitesse des particules. La concentration en gaz est définie comme le rapport volumique du gaz dissous sur le carburant, à 0°C et 1 bar. Les fractions volumiques en CO_2 vont de 0 à 66,21. Pour une configuration de buse donnée, il existe une concentration de transition nécessaire pour obtenir un bonne atomisation. Les résultats montrent que le SMD diminue lorsque la pression augmente avec une concentration en gaz inférieure à la concentration de transition. Puis, passé ce seuil, le SMD atteint un minimum pour tous les cas (cf. Figure 1.9). Plus la concentration en gaz dissous augmente et plus le spray subit une expansion dès la sortie de l'orifice et forme un spray avec un cône parabolique. Lorsque la pression augmente, avec une concentration en gaz inférieur à la concentration de transition, l'angle du spray augmente graduellement. Passé la concentration de transition, l'angle du spray devient large et constant (cf. Figure 1.9). Dans cette étude, la concentration de transition se situe entre 9,80 et 36,55 (cf. Figure 1.9). Ce phénomène est l'effet bénéfique de l'IFCDG et il est obtenu lorsque la concentration en gaz dissous excède la concentration de transition. Plus la concentration en gaz dissous augmente et plus le coefficient de décharge C_d diminue (cf. Figure 1.10), comme il a été observé également dans l'atomisation aérée [20]. L'augmentation de l'angle du spray et la forme parabolique

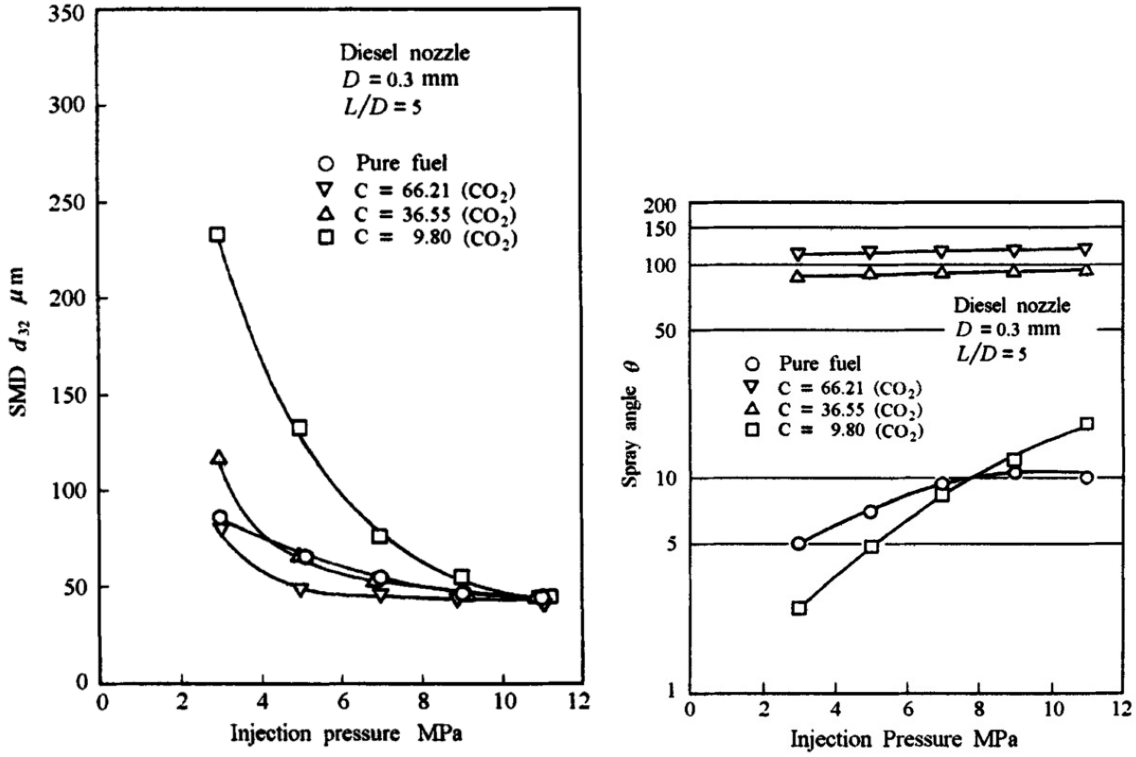


FIGURE 1.9 – Le SMD et l'angle du spray θ en fonction de la pression (source : Zhen et al. [3]).

du spray sont associés à une baisse importante du coefficient de décharge. Ceci suggère qu'une importante quantité de gaz dissous qui s'échappe du carburant à l'intérieur de la buse, crée une dilatation suffisante pour l'emporter sur la cohésion et la tension superficielle du liquide et permet de former un spray de forme parabolique. Les résultats sur la variation du rapport L/D (cf. Figure 1.11) montrent qu'un rapport élevé a un rôle important dans la séparation du gaz dissous du carburant à l'intérieur de la buse pour obtenir de fines gouttelettes. Nous sommes moins dépendant des caractéristiques mécaniques lorsque nous avons de l'atomisation effervescente.

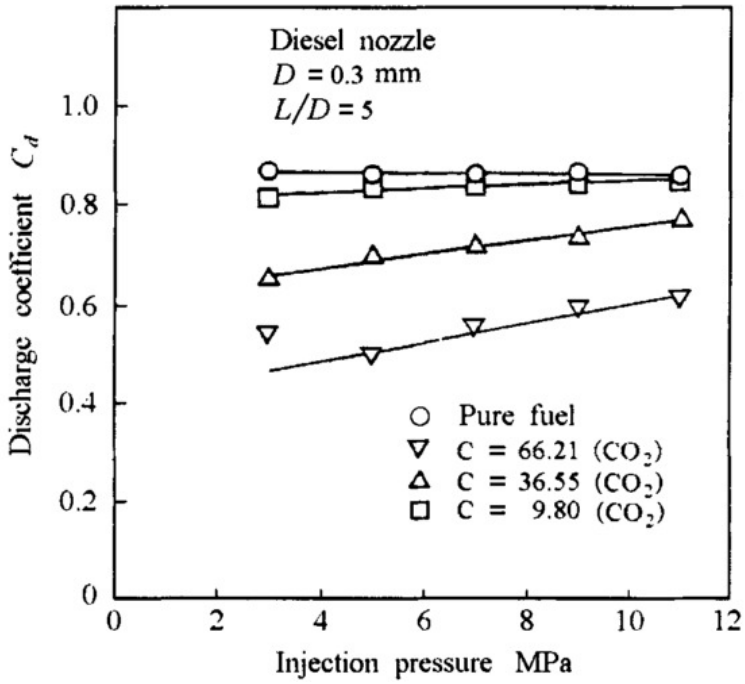


FIGURE 1.10 – Le coefficient de décharge C_d en fonction de la pression (source : Zhen et al. [3]).

D'après Karaeen et al. [16], l'atomisation effervescente permet une pulvérisation rapide du fluide avec une distribution uniforme de gouttes de faible SMD. Dans cette étude, le système est composé d'une buse avec une chambre d'expansion et un conduit sphérique. La pression test atteint 35 bar. Les tailles de gouttes sont mesurées avec un Malvern Mastersize-X System. Les résultats montrent que pour une très faible quantité de CO_2 de l'ordre de 2 à 3,4% en masse, le SMD est plus élevé que le SMD obtenu lors d'une décharge au diesel pur. Rashkovan et al. [2] ont également obtenu des résultats similaires et attribuent ce phénomène à l'équilibre entre la concentration en gaz dissous nécessaire pour vaporiser le CO_2 et la concentration en gaz dissous nécessaire pour pulvériser les ligaments de liquide.

Caputo et al. [4] ont étudié le processus d'atomisation d'un gaz dissous supercritique (Supercritical Dissolved-Gas Atomization (SDGA)). Dans leur recherche, l'atomisation d'un gaz dissous supercritique consiste à dissoudre du dioxyde de carbone à température et pression supérieures à son point critique dans de l'eau. Le gaz et le liquide sont mis en contact quelques minutes avant d'être éjectés. L'objectif est de surmonter les limitations de l'atomisation effervescente, qui ne s'appliquent qu'aux fluides dans lesquels on peut dissoudre une quantité importante de gaz. En effet, la miscibilité du dioxyde de carbone supercritique est élevée dans la plupart des liquides organiques dont les solvants et les carburants. Cette technique d'atomisation a été appliquée dans les études d'atomisation supercritique-assistée (Supercritical-Assisted Atomization (SAA)) pour développer la production de fines particules pour la pharmaceutique et les pro-

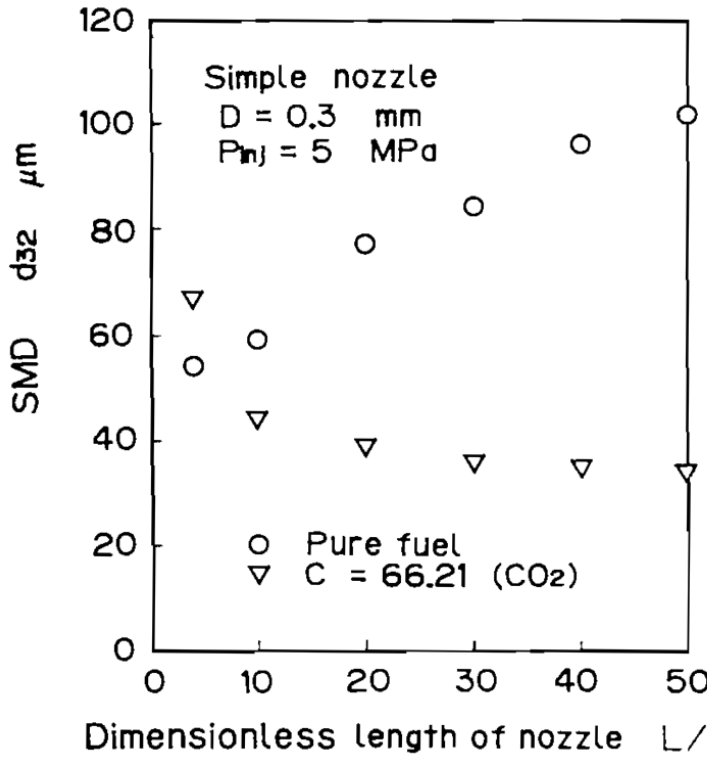


FIGURE 1.11 – Le SMD mesuré à 1 m de la sortie de la buse en fonction du rapport L/D pour une concentration volumique de 66,21. Pression = 50 bar et D = 0,3 mm. (source : Zhen et al. [3]).

duits chimiques. La solubilité du CO_2 supercritique dans l'eau est très faible comparée à la plupart des liquides organiques. Pour cette raison, le mécanisme de formation de gouttes doit inclure l'écoulement à bulles typique d'une atomisation aérée et l'expansion rapide des bulles en sortie qui est typique de l'atomisation effervescente. La pression test va de 74 à 130 bar et la concentration en dioxyde de carbone varie de 0,7 à 40 g de CO_2 par gramme de liquide. La buse utilisée est une buse simple orifice de deux diamètres différents : 100 et 120 μm et d'un rapport L/D de 8 et 6,67 respectivement. La taille des gouttes et leur distribution ont été mesurées grâce à un Malvern-Mastersizer S qui utilise une technique par diffraction laser. Les décharges ont été menées à une température de bouteille de 80°C.

Les résultats montrent que pour une décharge d'eau pure, un jet droit est obtenu en sortie. Lorsqu'on ajoute du CO_2 supercritique, le jet d'eau se transforme en un spray fin dans lequel il est impossible de distinguer visuellement la séparation entre la phase liquide et vapeur. Le spray est homogène avec une forme de cône bien définie et un régime d'atomisation pleinement développé. De plus, dans le cas d'une atomisation supercritique, les gouttes de liquide contiennent du dioxyde de carbone qui, après la phase

de séparation, peuvent contribuer à la formation de gouttes plus petites par expansion du gaz dès la sortie de l'orifice. Il en résulte un angle de spray pratiquement constant le long de l'axe du jet.

La connaissance d'équilibre entre phases est fondamentale dans l'atomisation effervescente car elle fournit une information sur la quantité maximum de gaz qui peut être dissoute dans le liquide. Les compositions des phases liquide et vapeur peuvent être déterminées grâce à un diagramme de phases thermodynamique représentant la pression en fonction de la fraction molaire par exemple (cf. Figure 1.12). Dans ce cas, l'intervalle

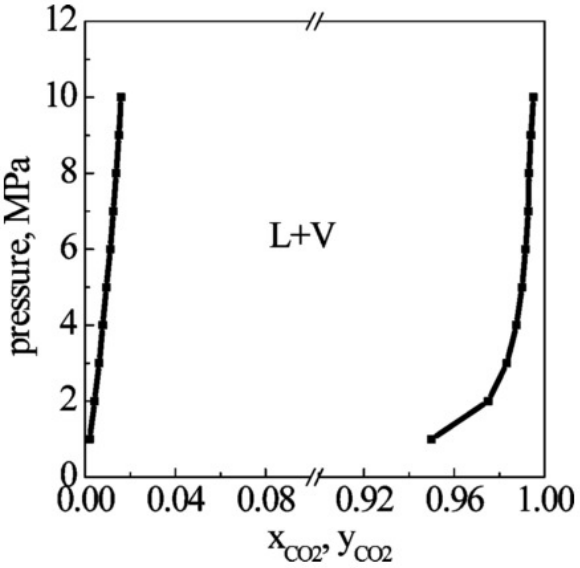


FIGURE 1.12 – Diagramme d'équilibre de phases du système binaire Eau-CO_2 à 80°C (source : Caputo et al. [4]).

de miscibilité est très large. La solubilité du CO_2 dans l'eau est relativement faible : 1,25% mol à 80 bar et 1,6% mol à 100 bar. Le rapport massique gaz-liquide (Gas-Liquid Ratio (GLR)) est un paramètre important pour l'atomisation effervescente. Il a un effet considérable sur la taille des gouttes et leur distribution. Les résultats montrent que le SMD évolue de façon non-linéaire en fonction du GLR. Les tailles de gouttes diminuent rapidement lorsque le GLR augmente autour de 2,5/3, puis, elles diminuent plus lentement jusqu'à atteindre une taille de gouttes très petite allant jusqu'à $2\ \mu m$ (cf. Figure 1.13). Les diamètres de gouttes obtenues par SDGA ne sont généralement pas atteintes par d'autres processus d'atomisation double-fluides pour des pressions comparables. Par exemple, l'atomisation aérée produit généralement des gouttes de tailles supérieures. Une comparaison des résultats obtenus par Sovani et al. [21] pour des conditions initiales très proches est établie. Sovani et al. [21] produit un spray de gasoil à une pression de 123 bar et un GLR de 0,0125 avec un SMD de 6,25 μm. Dans cette étude de Caputo et al. [4], pour un spray d'eau (qui est plus dense et plus visqueux que

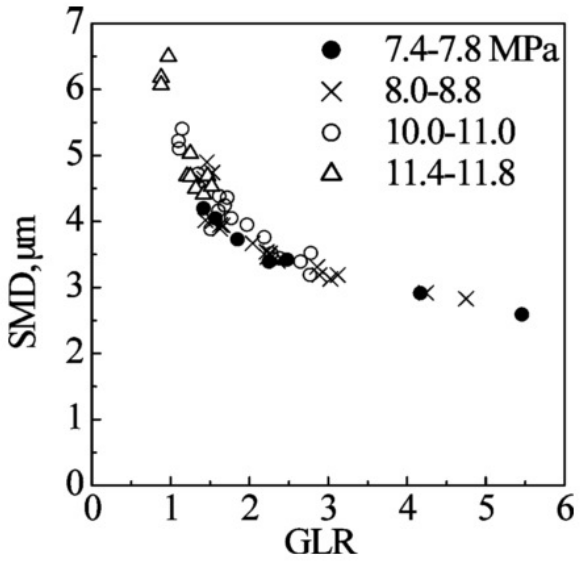


FIGURE 1.13 – SMD en fonction du GLR pour différentes pressions (source : Caputo et al. [4]).

le gasoil), un GLR de 3 et à une pression de 100 bar, le SMD est de 2 μm.

Des hypothèses sont donc émises sur le rôle joué par le dioxyde de carbone sur le mécanisme d'atomisation. Le dioxyde de carbone supercritique agit sur la pulvérisation du liquide par deux différents mécanismes : (1) en analogie avec l'atomisation aérée, il transforme le liquide en ligaments lorsque l'écoulement traverse l'orifice, (2) et en analogie avec l'atomisation flash, le gaz se dilate après le passage de l'orifice, provoquant l'éclatement du liquide en ligaments et fines gouttelettes. L'effet principal est attribué au CO_2 non dissous, donc sous forme de bulles qui transforme le liquide en ligaments. Vient ensuite l'effet relatif au CO_2 dissous qui se dilate en aval de l'orifice provoquant l'éclatement des ligaments de liquide en plus fines gouttelettes.

Les différentes études réalisées ces dernières années ont montré que cette technologie améliorait considérablement le processus d'atomisation. Le spray subit une expansion immédiatement à la sortie de l'orifice et possède une forme caractéristique dite parabolique au niveau du cône. L'angle d'ouverture du spray est modifié et les tailles de gouttes minimisées. Sur la base de ces recherches, l'objectif est de comprendre les mécanismes d'atomisation effervescente pour les problématiques industrielles. Dans le cadre de notre étude, le but est de décharger l'agent avec un débit élevé, obtenir un spray large composé de petites gouttes, tout en limitant la masse du système qui doit également être robuste (vieillissement, configuration simple pour maintenance). Jusqu'à présent, l'observation du spray en sortie de buse a été mis en avant. Dans notre étude, nous allons nous pencher également sur la visualisation de l'écoulement en amont de la buse à l'aide d'une veine transparente car les conditions thermodynamiques et les régimes

d'écoulements dans le tube ont un impact direct sur le spray en sortie.

1.2.2 Dans les systèmes protection feux des moteurs

L'utilisation du Halon1301

Le Halon 1301 est l'agent extincteur actuellement utilisé sur les systèmes et assure une protection feux adaptée dans les compartiments moteurs. Dans les années 1960, l'industrie de la protection contre les incendies a commencé à installer un nouvel agent très efficace pour les extincteurs et les systèmes de protection. L'agent, faisant partie d'une classe de produits chimiques connue sous le nom de halons, éteint et supprime une grande variété de feux, y compris les liquides inflammables, l'électronique et les combustibles communs. Le halon est idéal pour une utilisation autour de la structure et de l'équipement de l'avion car il est non corrosif, non conducteur et il ne laisse aucun résidu. Dans les espaces occupés par l'Homme tels que dans les cockpits ou en cabine, le Halon1211 est utilisé car il est très efficace en petites quantités. Dans les années 1980, la communauté scientifique a identifié le halon comme une substance appauvrissant la couche d'ozone (ODS), semblable au fréon et à d'autres chlorofluorocarbones (CFC). Les CFC sont des produits chimiques très efficaces, polyvalents et stables. Cependant, leur stabilité est un détriment car leur longue durée de vie leur permet de migrer vers la haute atmosphère où la lumière ultraviolette déclenche une réaction chimique qui peut provoquer l'épuisement de la couche d'ozone stratosphérique. En 1987, le Protocole de Montréal, un traité international, a établi l'arrêt de la production et la réduction de l'utilisation des CFC. Dans le cadre de l'amendement de Londres de 1992, les halons ont été ajoutés à l'accord. Des exemptions ont été fournies pour les applications où des solutions de rechange n'étaient pas disponibles, ce qui permettait une "utilisation essentielle" des ODS disponibles. C'est le cas dans l'industrie de l'aviation car aucun des agents extincteurs alternatifs actuellement disponibles ne pouvait satisfaire aux exigences rigoureuses de performance pour assurer la sécurité des vols. Depuis le Protocole de Montréal, l'industrie de l'aviation a continué de s'appuyer sur des halons recyclés pour soutenir ses besoins actuels. Récemment, plusieurs organisations et agences ont réévalué la continuation des exemptions pour l'utilisation du halon. En 2010, la Commission européenne a modifié son règlement ODS en adoptant des limites et des dates de fin pour les exemptions sur les avions et d'autres applications. Une date de fin s'applique à tout nouveau modèle d'avion ou dérivée majeure lors de la soumission d'une demande de certification de type. La date de fin est définie comme la date après laquelle le halon ne doit plus être utilisé dans tous les avions commerciaux, y compris les flottes existantes. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a adopté des délais de remplacement des halons en 2011 et Underwriters Laboratories (UL) retire sa norme pour les extincteurs portables à base d'halons en octobre 2014. L'industrie de l'aviation a commencé à faire des recherches sur les alternatives aux halons il y a plus de 15 ans. En raison des exigences strictes en matière de sécurité et d'ingénierie, le développement et la validation des solutions de rechange ont été un défi. Les agents alternatifs

sur les avions doivent satisfaire à de nombreuses exigences réglementaires en matière de protection contre les incendies, y compris les normes minimales de performance (MPS) de l'Administration Fédérale de l'Aviation des États-Unis (Federal Aviation Administration (FAA)) qui démontrent des performances d'extinction et de suppression feux équivalentes ou supérieures aux halons. Des agents alternatifs d'extinction et d'extinction d'incendie et des dispositifs d'extinction doivent également être fiables et efficaces à des températures extrêmes, à diverses altitudes et sous des vibrations extrêmes. Être compatible avec une large gamme de matériaux et d'équipements, y compris l'électronique, les fluides, les composites et les métaux ; Avoir une toxicité équivalente ou inférieure à celle des halons ; Et respectueux de l'environnement. Certains remplaçants potentiels sont répertoriés comme des gaz à effet de serre en vertu du Protocole de Kyoto de 1997, un traité international sur les changements climatiques. Leur utilisation et leur production font l'objet d'un examen minutieux et risquent d'être restreintes dans le futur. En plus des exigences requises sur l'agent, le système de stockage, de distribution et d'application de l'agent doit répondre aux exigences de performance spécifiques. Tous les composants du système de protection contre les incendies pour les agents alternatifs doivent être conçus et il doit être démontré qu'ils fonctionnent correctement dans toutes les conditions prévisibles. Les tests de qualification des composants doivent s'assurer que les exigences de spécification des composants sont respectées. Les tests de certification du système garantissent qu'un système exécute sa fonction prévue selon les exigences de la FAA. Les procédures de test du système et des composants incluent la validation du rendement du système, le conditionnement de l'environnement, l'intégrité structurale et les tests de cycle de vie. Les exigences opérationnelles doivent être semblables aux systèmes halon (c'est à dire aucune augmentation significative des exigences de test et de maintenance et une durée de vie équivalente). Enfin, le système et ses composants doivent être d'une taille et d'un poids qui peuvent être facilement intégrés dans l'avion. Ceci est particulièrement difficile car la plupart des agents ayant des valeurs de concentration de FAA MPS (Minimum Performance Standards) publiées nécessitent des augmentations importantes de masse et/ou de volume pour fournir une équivalence de performance à celle des halons. Le Centre technique de la FAA, en collaboration avec le groupe de travail international des systèmes aéronautiques de protection contre les incendies, a développé des Normes de Performance Minimal (MPS) pour moteurs et APU [22]. Le MPS a permis de mettre au point des exigences minimales de concentration publiées pour trois agents : HFC-125, CF_3I et Novec1230™ pour une efficacité équivalente à celle du Halon1301. Ces concentrations sont plus élevées que celle nécessaire avec du Halon1301, ce qui implique un système de protection contre les incendies plus lourd et plus volumineux. Certains de ces agents peuvent également susciter des problèmes de toxicité et d'impact sur le réchauffement de la planète.

Le Novec1230™

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à un agent en particulier qui apparait comme une alternative intéressante respectueuse de l'environnement : le

Novec1230™. Un des avantages du Novec1230™est qu'il réutilise une partie des technologies du Halon1301. La principale différence est leur phase physique. En effet, le Halon 1301 est un gaz dont le point d'ébullition est bas, alors que le Novec1230™est un liquide en conditions ambiantes (point d'ébullition haut donc il est liquide en dessous de +49,2°C). Bien qu'il soit stocké sous forme liquide, il s'évapore facilement lors d'une décharge dans un environnement ambiant, ce qui fait de lui un agent extincteur efficace sur les feux de classe A, B et C, en ne laissant aucun résidu et n'endommageant pas les équipements électroniques. La Figure 1.3 présente les propriétés clés du Novec1230™et du Halon1301.

Agent extincteur	Halon1301	Novec1230™
Formule chimique	CF_3Br	$C_6F_{12}O$
Nom chimique	Bromotrifluorométhane	Ketone fluoré
Phase à l'ambiant	Vapeur	Liquide
Point d'ébullition (à 1 bar)	-57,8°C	+49,2°C
Densité liquide à l'ambiant	1575 kg/m^3	1600 kg/m^3
Pression vapeur	2,5 bar	0,404 bar
Potentiel de destruction de l'ozone	5,1	0,0
Potentiel de réchauffement planétaire	1300	1

TABLE 1.3 – Les propriétés clés du Novec1230™et du Halon1301.

Le système FirEx

Un système FirEx équipe chaque moteur des avions Airbus et utilise actuellement le Halon1301 comme agent extincteur. Il est installé dans la structure secondaire arrière du mât du réacteur (cf. Figure 1.14). Ce système est composé de deux bouteilles de décharge et d'un système de distribution de tuyauteries qui se termine par des buses simples évasées. Chaque bouteille de décharge, généralement pressurisée à l'azote, est équipée d'une cartouche pyrotechnique, et d'une sortie fermée par un opercule. Les deux bouteilles sont reliées au système de distribution par une connexion en Y. L'opercule est rompu par l'onde de choc créée par l'activation de la cartouche pyrotechnique et l'agent est ensuite acheminé grâce au système de tuyauteries puis dispersé dans les différentes zones du moteur. Le système est conçu en se basant sur l'agent requis, pour une concentration d'agent volumétrique minimum spécifique dans toutes les zones feux du moteur, appelées Zones Désignées Feux (Designated Fire Zone (DFZ)), immédiatement après une décharge, afin d'assurer une extinction efficace en cas d'incendie. Chaque moteur est protégé par une double décharge du système FirEx. Les DFZ peuvent aller jusqu'à trois compartiment : la zone fan, la zone intermédiaire et la zone core.



FIGURE 1.14 – Mât d'un réacteur d'A320.

Décharges d'agents alternatifs

Dans l'optique de remplacer le Halon1301 sur les systèmes de protection feux, trois difficultés sont mises en avant et doivent être considérées pour l'utilisation d'un nouvel agent : le système, les propriétés thermodynamiques du mélange agent-azote, et le comportement du mélange lors d'une décharge. Dans l'étude menée par Yang et al. [5], les deux dernières problématiques sont abordées pour des décharges de différents agents alternatifs (HFC-125, FC-218, CF_3I et HFC-227ea) pressurisés à l'azote. Des décharges au Halon1301 sont également réalisées comme références. Les propriétés thermodynamiques des mélanges agent-azote ont été modélisées avec un logiciel appelé PROFISSY (Properties of Fire Suppresion Systems) qui incorpore un modèle connu sous le nom ECS (Extended Corresponding State). En plus des propriétés thermodynamiques, il permet également de modéliser le transport des différents fluides dans les systèmes. À partir du volume bouteille, des quantités d'agent et d'azote initiales chargées à température ambiante, le code PROFISSY donne la pression finale dans la bouteille ainsi que la composition des phases, pour différentes températures. Ce code a été développé dans le but d'aider les concepteurs des bouteilles extincteurs à faciliter les calculs de la relation pression-température bouteille. Dans les bouteilles extincteurs, le Halon1301 est pressurisé à l'azote à une pression supérieure à sa pression vapeur, à température ambiante (16 bar à 25°C). Lors de la pressurization, une partie de l'azote se dissous dans l'agent liquide. Un dégazage intervient dans la bouteille lors de la décharge. L'écoulement est donc diphasique. Dans cette étude, le rôle de l'azote dissous dans la dynamique de décharge de l'agent est examiné. Trois types de bouteilles sont utilisés, une bouteille cylindrique, une bouteille sphérique et une bouteille cylindrique avec une fenêtre de visualisation. Une caméra rapide (2000 images/s) est utilisée pour la visualisation du

spray en sortie et la visualisation à l'intérieur de la bouteille cylindrique équipée d'une fenêtre. Tous les essais ont été réalisés à température ambiante avec une pressurisation à l'azote de 41,2 bar. L'effet de la taille de l'orifice (23,8 mm) est évalué par l'installation d'une plaque à orifice (ou diaphragme concentrique) sur la sortie de deux différentes électrovannes (étant deux fois plus grande que la taille de l'orifice) : Marotta et HTL. Des décharges à froid ont également été menées à une température inférieure à -50°C grâce à un refroidissement avec de la neige carbonique.

Les événements qui interviennent à l'intérieure de la bouteille lors d'une décharge ont été décrits par Elliott et al. [19] sans confirmations par observations visuelles. Elliott et al. ont étudiés des décharges de Halon1301 (allant de la bouteille, en passant par la tuyauterie, jusqu'à la buse) et mis en place un modèle pour les analyser et également estimer les temps de décharge. D'après leur modèle, le temps de décharge dépend majoritairement de la taille de l'orifice de la buse et du volume de la tuyauterie, pour des conditions initiales données dans la bouteille. Basé sur les acquisitions de pression temporelle dans la bouteille au cours d'une décharge et d'un modèle théorique simple d'écoulement, Elliott et al. décrivent les différents évènements par ces hypothèses :

— Lorsque l'ouverture de vanne est enclenchée, pendant un court laps de temps, la pression diminue continuellement et le mélange agent-azote est éjecté comme un liquide surchauffé à travers l'orifice de sortie.

— Pendant ce laps de temps, l'azote reste dissous dans l'agent liquide comme une solution saturée hors-équilibre, et l'écoulement du mélange agent-azote reste visuellement clair.

— Comme la pression continue de chuter, le dégazage de l'azote intervient, et des bulles d'azote commencent à se former dans le liquide. Les bulles vont grossir et due à l'expansion rapide des bulles, le niveau de la phase liquide va augmenter, ce qui va compresser le ciel gazeux. Cet évènement est marqué par une augmentation de la pression au cours de la décharge sur les courbes pression-temps.

— La pression va continuer de chuter, puis une rupture de pente sur la courbe marque la fin de la décharge de la phase liquide.

— Commence alors la purge du ciel gazeux.

— La pente de la courbe correspondant à la purge gaz augmente car le mélange de gaz est moins dense que l'écoulement à bulles, ce qui confirme un taux volumétrique de décharge plus élevé.

Les observations faites par Yang et al. [5] dans la bouteille cylindrique révèlent de légères différences. Le laps de temps au début de la décharge où la phase liquide reste claire dure environ 5 ms. Selon Yang et al., il dépend de l'agent utilisé. Pendant cette période, l'interface liquide/vapeur qui s'estompe reste clairement visible. Ensuite l'intérieur de la bouteille dévient complètement brumeux et l'interface liquide/vapeur n'est plus visible. Ils n'ont pas pu confirmer la présence de bulles durant toute la décharge et ce jusqu'à l'éjection totale de la phase liquide. La visualisation est redevenue claire ensuite. Ce brouillard est dû, d'une part, à la condensation du gaz provenant du refroidissement du ciel gazeux qui subit une expansion adiabatique, et d'autre part de l'évolution de l'azote dissous en bulles dans la phase liquide.

Le comportement flash de l'agent en sortie a également été noté par Elliott et al., la décharge apparaît visuellement comme un nuage de vapeur. Le spray forme un panache blanc opaque qui diminue de façon continue en taille mais dont la densité ne change pas. Ces observations sont similaires aux observations faite par Elliot et al. même si la visualisation du processus à l'oeil nu était presque impossible dû au temps de décharge très court. La transition entre la décharge de la phase liquide et la purge du ciel gazeux est difficile à discerner, le temps de décharge de l'agent n'a donc pas pu être déterminé à partir des images vidéos. Pour les décharges des agents à froid (y compris le Halon1301), la vitesse moyenne de dispersion de l'agent est plus faible que les décharges à l'ambiant. Aucun dégazage n'a été noté. De plus, le taux de décharge de l'agent à froid est plus lent (pression plus basse) et l'angle du spray plus étroit.

La Figure 1.15 présente l'évolution temporelle de la pression dans la bouteille pour une décharge au Halon1301 pressurisé à l'azote. À $t = 0\ s$, c'est l'ouverture de l'électrovanne. Yang et al. observent les quatre évènements décrit par Elliott et al. : la décharge du mélange agent-azote dissous liquide métastable, suivis d'une augmentation de pression qui vraisemblablement correspond au dégazage de l'azote dissous, la décharge de l'écoulement diphasique à bulles puis la purge du ciel gazeux. Si l'augmentation de pression est liée au dégazage de l'azote dissous, et si le processus de dégazage peut s'exprimer par la théorie de nucléation homogène et être modélisé par un processus isotherme, alors la pression de nucléation homogène d'après les travaux de Forest et Ward [23], dépend de la pression initiale, la tension superficielle du mélange, la pression vapeur de l'agent et de la solubilité de l'azote dans l'agent liquide à une température donnée. La pression de nucléation homogène, qui est la pression à laquelle la nucléation homogène intervient, peut être estimée par les équations données en détails par Forest et Ward [23]. Pour simplifier l'analyse, ils supposent également que l'effet de la pression et de la concentration de l'azote dissous sur la pression vapeur du liquide sont négligeables et que le mélange de vapeur dans les bulles est idéal. À partir des conditions expérimentales de leur étude, Yang et al. propose une estimation de la pression de nucléation homogène :

$$P_h = P_{sat} + \frac{C\,P_h}{C_s} - \left[\frac{16\,\pi\,\sigma^3}{3\,k\,T\,ln(Z/J)}\right]^{1/2} \tag{1.3}$$

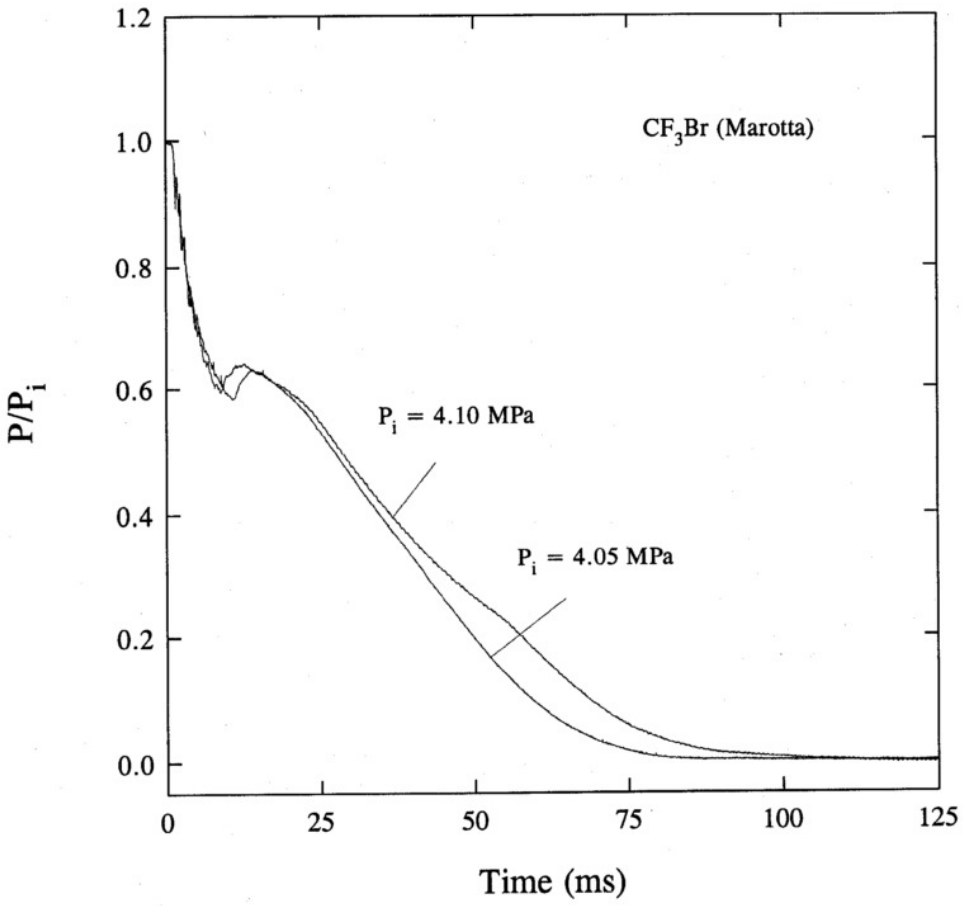


FIGURE 1.15 – Évolution temporelle adimensionnée de la pression pour une décharge de Halon1301 pressurisé à l'azote (Électrovanne : Marotta) (source : Yang et al. [5]).

Avec

$$ln\left[\frac{{f_n}^0(1+C_s)}{C_s}\right] = ln(H) + \frac{\nu_n P_h}{RT} \tag{1.4}$$

Et

$${f_n}^0 = P_h\, exp\left(\frac{P_h\, B_{nn}}{RT}\right) \tag{1.5}$$

Où P_{sat} est la pression vapeur de l'agent à la température T. C est le rapport des moles d'azote dissous sur les moles d'agent liquide. C_s est la concentration d'azote qui est présent dans l'agent liquide si la pression du ciel gazeux au-dessus du liquide est à la pression totale P_h. σ est la tension superficielle, Z [$\mathrm{cm}^{-3}.\mathrm{s}^{-1}$] est une constante, J [$\mathrm{nuclei}.\mathrm{s}^{-1}.\mathrm{cm}^{-3}$] est le taux de nucléation par volume. k est la constante de Boltzmann [$= 1,38048\ 10^{-16}\,\mathrm{dyne.cm.K}^{-1}$]. ${f_n}^0$ est la fugacité du gaz pur. H est la constante de Henry. ν_n est le volume partiel molaire de l'azote dissous. B_{nn} est le second coefficient

du viriel et R est la constante universel des gaz parfaits. Le rapport de mole C est déterminé à partir de la solubilité (fraction molaire) de l'azote dans l'agent liquide à T et P_i par l'équation suivante :

$$C = \frac{x_n}{1 - x_n} \tag{1.6}$$

Où X_n est la solubilité de l'azote et peut être calculé en utilisant le code des équilibres liquide-vapeur de PROFISSY.

Dans les résultats des courbes de pression, la présence ou l'absence de plaque à orifice n'a pas d'influence sur la pression à laquelle intervient le dégazage. Ce qui est consistant avec les calculs de pression de nucléation homogène (équation 4.1) qui dépend uniquement des conditions initiales dans la bouteille de décharge. Le modèle mis en place prédit les temps de décharge d'un agent pour différentes conditions expérimentales. La différence majeure avec le modèle développé par Elliott et al., est comment le processus de dégazage de l'azote dissous est traité. Dans le modèle d'Elliott et al., il n'y a pas de possibilité de déterminer si le dégazage intervient ou non. Le dégazage de l'azote dissous est supposé toujours intervenir, et la taille critique d'une bulle est fixé à 15 nm. Selon Yang et al., le dégazage n'intervient pas pour certain agent ou lorsque la pression est inférieur à 41,2 bar or Elliott et al. font des décharges à des pressions supérieures à 41 bar. Le modèle proposé, sous certaines hypothèses, peut prédire l'occurence ou non du dégazage. Selon les résultats, lorsque l'agent est partiellement saturé (temps de dissolution écourté), le taux de décharge volumique est plus rapide. Le temps de décharge de l'agent est prédit avec le modèle de décharge avec un facteur 4.

Les caractéristiques de l'écoulement en amont de la buse pour trois candidats alternatifs (HFC-227ea, CF_3I et HFC-125) ont également été étudiées pour les systèmes moteurs [18]. Le régime d'écoulement à été visualisé par caméra rapide (500 images/s) dans un tube transparent. Le régime d'écoulement dans les tuyauteries du système protection feux est typiquement diphasique, c'est un système à deux composants liquide-vapeur. La chute de pression et le temps de décharge entre les agents alternatifs et le Halon1301 montrent des similarités, ce qui signifie que l'intégration de ces agents alternatifs sera possible sur le système actuel. La bouteille de décharge est un tube de diamètre interne 100 mm et de volume 4,06 10^{-3} m^3. Le tube transparent a un diamètre de 15,9 mm, similaire au diamètre de la tuyauterie, et est placé horizontalement directement après l'électrovanne qui forme un angle de 90° avec la sortie bouteille. Les pressions test étudiées sont 20, 25 et 30 bar. Après le remplissage de la bouteille avec l'agent, l'équilibre de la température était atteint au bout d'une heure. Des décharges à froid ont été réalisées avec un refroidissement grâce à de la neige carbonique jusqu'à -45°C, et également des décharges à 70°C avec un chauffage de la bouteille.

Un modèle qui simule l'état d'équilibre et transitoire d'une décharge d'agent pressurisé à l'azote, de la bouteille à travers la tuyauterie a été développé et a prouvé son utilité dans la conception préliminaire d'un système moteur pour utiliser un agent alternatif.

Le modèle développé est similaire à ceux mis en place par le *National Fire Protection Association's Standard (NFPA) 12A "Halon1301 Fire Extinguishing Systems* (1993) et par Elliott et al. [19], qui se basent sur la description d'un écoulement diphasique stable et homogène. Les propriétés thermodynamiques et les conditions de remplissage de la bouteille sont obtenues par un programme d'équilibre liquide-vapeur indépendant.

L'objectif étant de décharger l'agent le plus vite possible tout en en atteignant une concentration d'agent élevé pendant un certain temps dans chaque zone moteur. Les paramètres de conception comme les diamètres de tuyaux, leur longueurs et les conditions de stockage (quantité d'agent et d'azote, température ambiante) jouent un rôle important dans la performance du système de décharge. Les effets des conditions de stockage de la bouteille, la température bouteille et la configuration de la tuyauterie sont explorés dans cette étude. Une bouteille stockée contient l'agent, en général sous forme liquide, sur-pressurisé à l'azote. Les systèmes actuels de décharge exposent un comportement d'écoulement fortement transitoire. Lors d'une décharge, la pression dans la bouteille chute et l'azote dissous dans la phase liquide ne se dégaze pas immédiatement à l'ouverture de la vanne, la solution se trouve donc dans un état métastable sur-saturée. Après un laps de temps, le dégazage de l'azote dissous produit une hausse de pression à l'intérieur de la bouteille due à l'expansion de la phase diphasique contenant des bulles. La pression bouteille atteint un maximum et commence à chuter de nouveau car l'écoulement diphasique continue entre temps d'être déchargé. Le fluide diphasique est compressible, donc il est possible qu'un choc se présente. Dans les écoulements gazeux, un écoulement choqué intervient lorsque l'écoulement atteint sa vitesse sonique. Dans les écoulements diphasiques liquide-vapeur, l'écoulement choqué peut être réalisé à une vitesse inférieur à la vitesse sonique de la phase vapeur. Si l'écoulement est choqué, le débit massique est indépendant de la pression de décharge (ici, la pression ambiante).

Dans le tube transparent, Cleary et al. ont observé un écoulement diphasique trouble, et ce durant toute la décharge jusqu'à ce que toute la phase liquide de la bouteille soit déchargée. Ce qui rappelle les observations faites par Yang et al. dans la bouteille de décharge. Cela signifie que la nucléation de bulles intervient quelque part avant le tube (qui est placé juste après l'électrovanne) et l'écoulement est toujours diphasique pendant la période de la décharge de la phase liquide. Les résultats du modèle sont favorablement comparable avec les résultats expérimentaux et se basent sur ces hypothèses :

— L'écoulement est compressible, diphasique, stable et homogène (la phase vapeur et la phase liquide sont bien mélangées et se déchargent à la même vitesse). C'est une bonne hypothèse pour l'écoulement à bulles dont le taux de vide est faible (inférieur à 30%) [24, 25].

— Les bulles tendent à coalescer à un taux de vide élevé. La transition de l'écoulement à bulles vers un écoulement à bouchons intervient autours d'un taux de vide

de 30%. Par contre, à haut débit de l'agent, les grosses bulles tendent à se rompre.

— L'écoulement du fluide est supposé être à l'équilibre thermodynamique en tout point de la tuyauterie. L'écoulement est supposé adiabatique et isenthalpique et simplifie grandement l'analyse. La variation de l'entropie est attribué aux pertes de charges hydraulique. L'écoulement de l'agent dans la tuyauterie est toujours supposé diphasique pour des conditions bouteille, initialement saturée en azote. Si l'agent n'est pas saturé en azote, l'écoulement de l'agent est monophasique liquide jusqu'à ce que la pression chute à la pression saturante de l'azote et à ce moment le dégazage intervient.

— Il n'y a pas de transfert de masse entre la phase liquide et la phase vapeur initiales dans la bouteille, c'est à dire que les bulles qui se forment dans la phase liquide sont supposées rester dans la phase liquide.

— La phase vapeur, qui correspond au le ciel gazeux, subit une expansion adiabatique et isentropique, et est considérée comme gaz parfait.

— L'indice adiabatique $C_p/C_v = \gamma$ a une valeur constante.

1.3 Caractérisation des sprays

1.3.1 Régimes de fractionnement d'un jet liquide

On distingue au moins quatre régimes de fractionnement d'un jet liquide [1, 7] en fonction de l'augmentation progressive de la vitesse du liquide dans le gaz environnant.

Le régime de Rayleigh : La tension superficielle va créer des oscillations asymétriques de plus en plus grandes à la surface du jet. Lorsque ces oscillations atteignent une amplitude critique, il y a rupture du jet à son extrémité sous forme de gouttelettes dont le diamètre est supérieur au diamètre du jet.

Le premier régime induit par l'aérodynamique : L'effet de la tension superficielle augmente par la vitesse relative entre le jet et le gaz environnant, qui produit une distribution de pression statique à travers le jet, ainsi le processus de rupture est accéléré. Comme dans le régime de Rayleigh, la rupture en gouttelettes intervient à plusieurs diamètres de jet en aval de la buse. Les diamètres de goutte sont de l'ordre du diamètre du jet.

Le second régime induit par l'aérodynamique : Les gouttelettes sont produites par les instabilités de faible longueurs d'onde qui se développent à la surface du jet causées par la haute vitesse relative entre le jet et le gaz environnant. La rupture intervient à plusieurs diamètres en aval de la buse et le diamètre moyen des gouttes est beaucoup plus faible que le diamètre du jet.

Le régime d'atomisation : Le jet se désintègre dès la sortie de la buse du fait de la très haute vitesse d'injection. Les diamètres moyens de gouttes sont beaucoup plus faible de l'ordre du microns.

La Figure 1.16 présente le schéma de chaque régime en fonction des vitesses d'injection de liquide et de la longueur de rupture. L'importance de chaque mécanisme

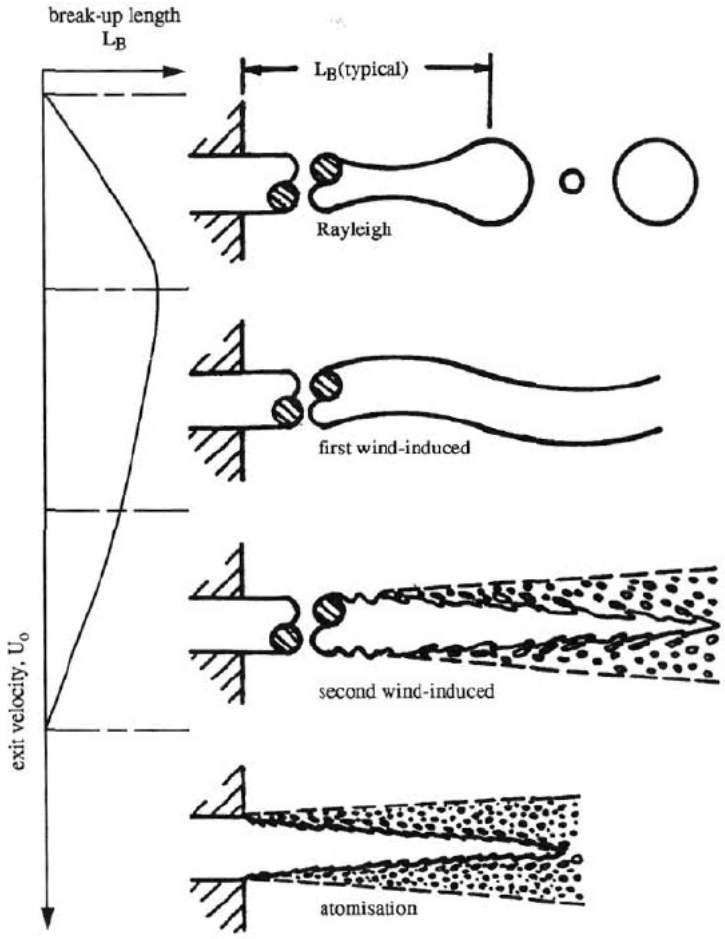


FIGURE 1.16 – Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Faeth [6]).

est mis en avant par les nombres adimensionnels de Reynolds (Re), de Weber (We) et

d'Ohnesorge (Oh). Ces nombres adimensionnels permettent de classer les différents régimes de fractionnement d'un jet liquide tels qu'ils sont observés expérimentalement. Le nombre de Reynolds mesure le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, et s'écrit :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_L u_L d_{buse}}{\mu_L} \tag{1.7}$$

Où ρ_L est la masse volumique du liquide, u_L est la vitesse du liquide à la sortie de la buse, d_{buse} est le diamètre de la buse et μ_L est la viscosité dynamique du liquide. À fort nombre de Reynolds, l'écoulement est turbulent, sinon il est laminaire. Par exemple dans un écoulement laminaire dans une conduite est de l'ordre de quelques milliers. Le nombre de Weber quant à lui, mesure le rapport des forces inertielles sur la tension superficielle. Il caractérise la capacité d'une goutte provenant d'un jet ou d'un ligament à résister aux forces aérodynamiques grâce aux tensions superficielles, autrement dit à ne pas se désagréger en de nombreuses gouttelettes. Il s'écrit :

$$\mathrm{We} = \frac{\rho_L {u_L}^2 d_{buse}}{\sigma_L} \tag{1.8}$$

Où σ_L est la tension superficielle du liquide. On peut ensuite en déduire le nombre d'Ohnesorge qui caractérise la déformation de bulle et des gouttes. Il mesure le rapport des forces visqueuses avec la tension superficielle et les forces inertielles et est défini tel que :

$$\mathrm{Oh} = \frac{\sqrt{\mathrm{We}}}{\mathrm{Re}} \tag{1.9}$$

À partir de ces grandeurs on peut déduire les différents régimes de fractionnement d'un jet liquide comme présenté Figure 1.17. Ces classifications s'appliquent généralement aux jets monophasiques. Nous verrons que dans le cadre de notre étude, nous nous retrouvons très vite dans le régime d'atomisation.

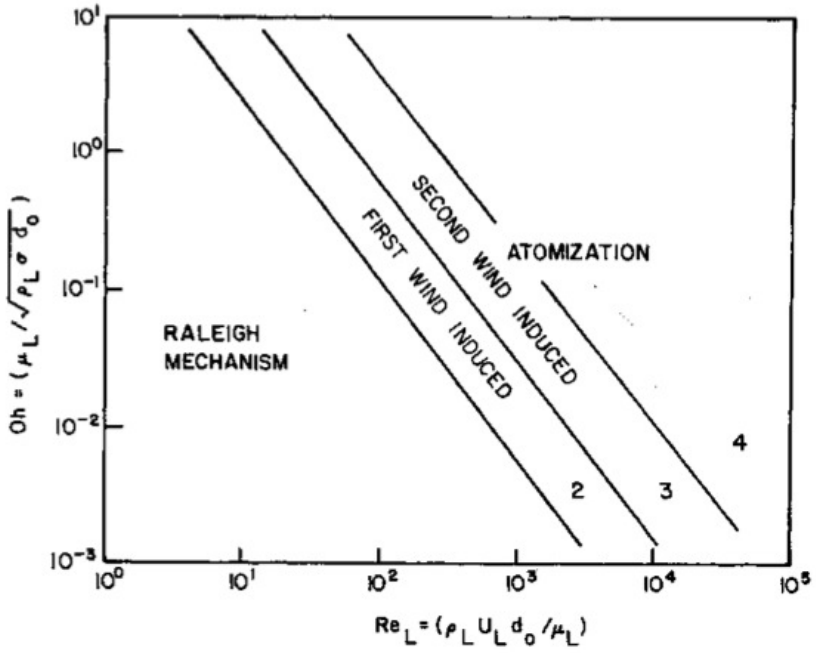


FIGURE 1.17 – Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]).

1.3.2 La distribution des tailles de gouttes dans un spray

L'atomisation d'un fluide conduit à des diamètres de gouttes variés. Les sprays obtenus sont généralement très polydispersés. La plupart des atomiseurs génèrent des gouttes de diamètres allant de quelques micromètres jusqu'à environ 500 μm. Pour caractériser un spray, en plus de la taille des gouttes moyenne, la distribution des tailles de gouttes au sein du spray est un autre paramètre important. Cette distribution de tailles de gouttes est généralement représentée par des histogrammes ou des fonctions de distribution qui peuvent s'exprimer en nombre de gouttes, en surface ou encore en volume. Chaque représentation dépend de la technique expérimentale ou modélisation utilisée. Il existe différentes manières d'exprimer un diamètre représentatif du spray étudié. Le Diamètre Moyen de Sauter (Sauter Mean Diameter (SMD)) est généralement utilisé. Il représente la taille d'une goutte possédant le même rapport volume-surface moyen que l'ensemble des gouttes du spray. Le SMD permet de caractériser de façon globale une pulvérisation. D'autres diamètres caractéristiques peuvent également être utilisés tels que :

D_{10} : La moyenne des diamètres de toutes les gouttes du spray.

D_{30} : Le diamètre moyen en volume. Le volume des gouttes qui, multiplié par le nombre total de gouttes, est égal au volume total du spray.

D_{50} : Les gouttes plus petites que ce diamètre représentent 50% du volume total de liquide. Il est défini comme le Diamètre Médian en Masse (Mass Median Diameter (MMD)). Il est très utile lors de la pulvérisation des fluides toxique lorsqu'il s'agit de s'assurer qu'il y ait peu de gouttes en dessous d'une certaine taille car elles pourraient être emportées par l'air environnant.

D_{90} ou $DV_{0.90}$: Les gouttes plus petites que ce diamètre représentent 90% du volume total de liquide.

1.4 Structures des écoulements diphasiques liquide-gaz

Prédire la transition entre les différentes structures d'un écoulement est un critère important pour la compréhension des écoulements diphasiques, leur modélisation (évaporation et condensation), et la conception des systèmes diphasiques. Les structures d'écoulement rencontrées dans les conduites verticales et horizontales présentent des similarités, bien que dans les conduites horizontales, le liquide est généralement influencé par la gravité, excepté lorsque la vitesse du fluide est élevée. En effet, dans ce cas la distribution des phases devient plus symétrique et les structures des écoulements deviennent visuellement identiques à celles observées dans une conduite verticale. Lorsque le liquide est influencé par la gravité, il liquide tend à rester au fond du tube et le gaz dans la partie supérieure de la conduite. Afin de prédire les différentes structures, des diagrammes d'écoulements diphasiques existent. Ce sont des diagrammes dont les limites de transitions entre chaque régime sont tracées en logarithmique en utilisant des paramètres sans dimensions pour représenter les vitesses du liquide et du gaz. Pour les conduites verticales, l'utilisation des diagrammes de Fair (1960), et de Hewitt et Roberts (1969) sont les plus recommandés. Pour les conduites horizontales, les diagrammes de Taitel et Duckler (1976) et de Baker (1954) sont couramment utilisés [8, 9, 26]. Sur avions, le système de protection feux est composé de conduites horizontales et verticales mais dûs aux hauts débits du fluide, nous ne nous préoccupons pas de la configuration.

1.4.1 Écoulements dans une conduite horizontale

Dans les écoulements en conduite horizontale, la structure diphasique est influencée par la force de gravité excepté à haute vitesse du fluide. Les différentes structures obtenues dans une conduite horizontale sont présentées Figure 1.18. Les différents régimes sont :

L'écoulement à bulles : (*Dispersed bubble* sur la Figure 1.18) Dans cet écoulement, on observe de nombreuses bulles de gaz dispersées uniformément dues aux forces

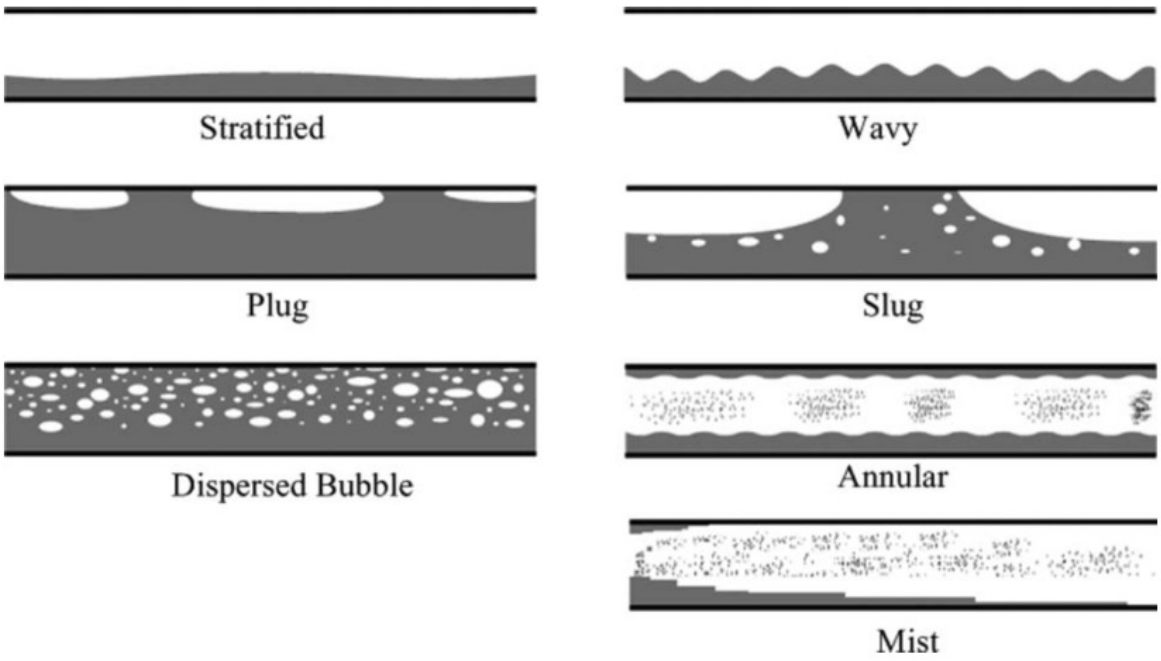


FIGURE 1.18 – Schéma des structures d'écoulements diphasiques obtenues en conduite horizontale. Le gris correspond à la phase liquide et le blanc à la phase vapeur (source : Cheng et al. [8]).

de cisaillement. Les bulles peuvent être de différentes tailles et de différentes formes mais généralement elles sont de formes plus ou moins sphériques avec un diamètre beaucoup plus petit que le diamètre interne de la conduite. Avec les forces gravitationnelles, les bulles ont tendance à être dans la partie supérieure du tube.

L'écoulement stratifié : (*stratified flow* sur la Figure 1.18) : Cet écoulement s'observe généralement à faible débit de gaz et de liquide. Le gaz est dans la partie supérieure de la conduite et le liquide dans la partie inférieure, séparées par une interface horizontale imperturbable.

L'écoulement à vagues : (*wavy flow* sur la Figure 1.18) : Lorsque la vitesse du gaz augmente, des vagues se forment à l'interface et se déplacent dans le sens de l'écoulement. L'amplitude de ces vagues, qui reste bien inférieures au diamètre de la conduite, dépend de la vitesse entre les deux phases.

L'écoulement intermittent : En augmentant encore la vitesse du gaz, les vagues à l'interface deviennent de plus en plus grandes jusqu'à atteindre le haut de la conduite. L'écoulement se compose de deux régimes :

- L'écoulement à bouchons (*plug flow* sur la Figure 1.18) Dans cet écoulement, des bouchons de liquide sont séparés par des poches de gaz de forme alongée. Le diamètre de ces poches sont plus petite que le diamètre du tube. Cet écoulement est également appelé "écoulement à bulles allongées".

- L'écoulement à "limaces" (*slug flow* sur la Figure 1.18) : À plus haute vitesse de gaz, le diamètre des poches de gaz devient quasiment aussi large que le diamètre du tube.

L'écoulement annulaire : (*annular flow* sur la Figure 1.18) : En augmentant encore le débit de gaz, le liquide forme un film continu sur les parois du tube avec à son centre l'écoulement de gaz et la présence de gouttelettes dispersées. On retrouve également ce régime dans un écoulement vertical mais le film liquide de la partie supérieure est plus épais que la partie inférieure.

L'écoulement brouillard : (*mist flow* sur la Figure 1.18) : A très haute vitesse de gaz, comme dans un écoulement vertical, l'écoulement de gaz continu entraine tout le liquide présent sur la parois de la conduite sous forme de petites gouttelettes.

Le diagramme de Baker (1954) pour les écoulements horizontaux diphasiques est présenté Figure 1.19. Il s'agit du diagramme empirique le plus connu pour les écoulements horizontaux. Pour lire ce diagramme, les vitesses massiques du liquide et du gaz [kg/m^2 s] doivent être déterminées pour calculer les paramètres adimensionnels λ et ψ. Le paramètre de la phase vapeur λ est défini tel que :

$$\lambda = \left(\frac{\rho_G}{\rho_{air}} \frac{\rho_L}{\rho_{eau}} \right)^{1/2} \tag{1.10}$$

Et le paramètre de la phase liquide est défini tel que :

$$\psi = \left(\frac{\sigma_{eau}}{\sigma} \right) \left[\left(\frac{\mu_L}{\mu_{eau}} \frac{\rho_{eau}}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \tag{1.11}$$

Où ρ_G, ρ_L, μ_L et σ sont les propriétés du fluide étudiées (masses volumiques du gaz et du liquide, la viscosité du liquide et σ la tension superficielle respectivement). Les propriétés de référence sont :

— $\rho_{eau} = 1000$ kg/m^3
— $\rho_{air} = 1,23$ kg/m^3
— $\mu_{eau} = 0,001$ Ns/m^2

— $\sigma_{eau} = 0,072$ N/m

L'axe des abscisses et des ordonnées sont ensuite déterminée pour identifier le régime d'écoulement. Où G_L et G_G sont les vitesses massiques des phases liquide et vapeur.

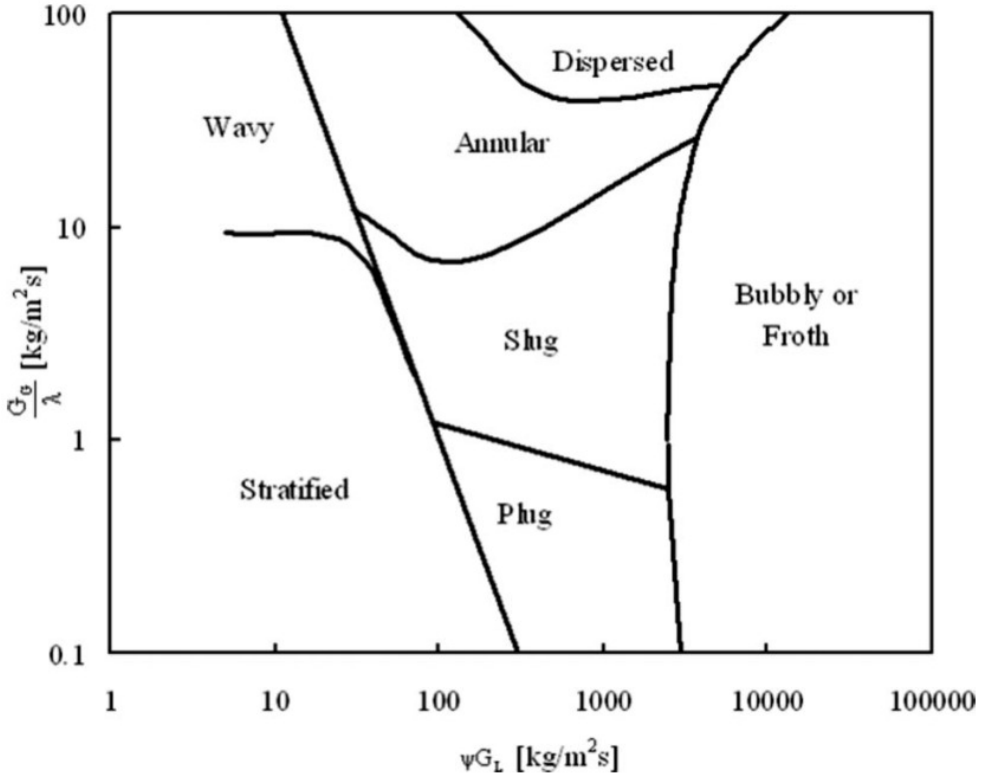


FIGURE 1.19 – Diagramme de Baker (1954) des régimes d'écoulement en conduite horizontale (source : Cheng et al. [8]).

Le diagramme de Taitel et Dukler (1976) pour les écoulements horizontaux diphasiques (ou légèrement inclinés d'un angle θ) est présenté Figure 1.20. Ce diagramme se base sur leur analyse analytique des mécanismes de transition entre les régimes et une sélection empirique de plusieurs paramètres. Le diagramme utilise le paramètre de Martinelli χ (qui compare la dissipation entre les deux phases), le nombre de Froude du gaz Fr_G et les paramètres T et K.

$$\chi = \left[\frac{(dp/dz)_L}{(dp/dz)_G}\right]^{1/2} \tag{1.12}$$

$$\mathrm{Fr} = \frac{G_G}{[\rho_G(\rho_L - \rho_G)D_g \cos\theta]^{1/2}} \tag{1.13}$$

$$T = \left[\frac{|(dp/dz)_L|}{g(\rho_L - \rho_G)\,cos\,\theta}\right]^{1/2} \tag{1.14}$$

$$K = Fr\left[\frac{G_L\,D}{\mu_L}\right]^{1/2} \tag{1.15}$$

Où $(dp/dz)_L$ est le gradient de pression comme si l'écoulement était uniquement liquide et $(dp/dz)_G$ le gradient de pression comme si l'écoulement était uniquement gazeux. g est l'accélération due à la gravité, D le diamètre de la conduite.

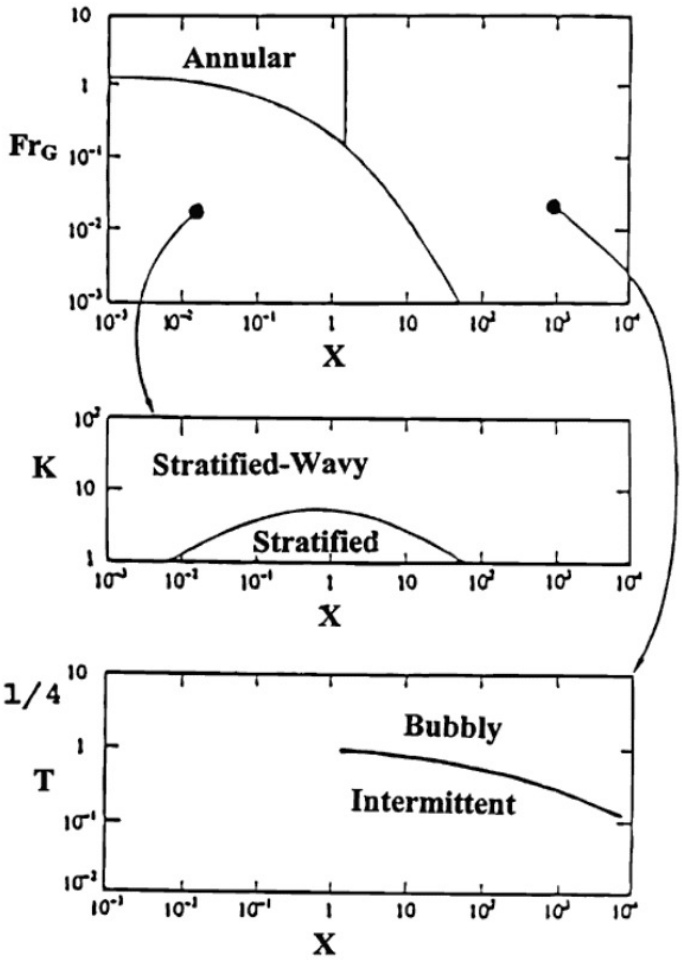


FIGURE 1.20 – Diagramme de Taitel et Dukler (1976) des régimes d'écoulement en conduite horizontale (source : Thome [9]).

1.4.2 Écoulements dans une conduite verticale

Les différentes structures obtenues dans une conduite verticale sont présentées Figure 1.21. Dans le cadre de notre étude, nous sommes dans cette configuration. Un tube transparent nous permet de visualiser les régimes d'écoulement obtenus lors d'une décharge (cf. Chapitre 2 Section 2.1.3). Les différents régimes sont :

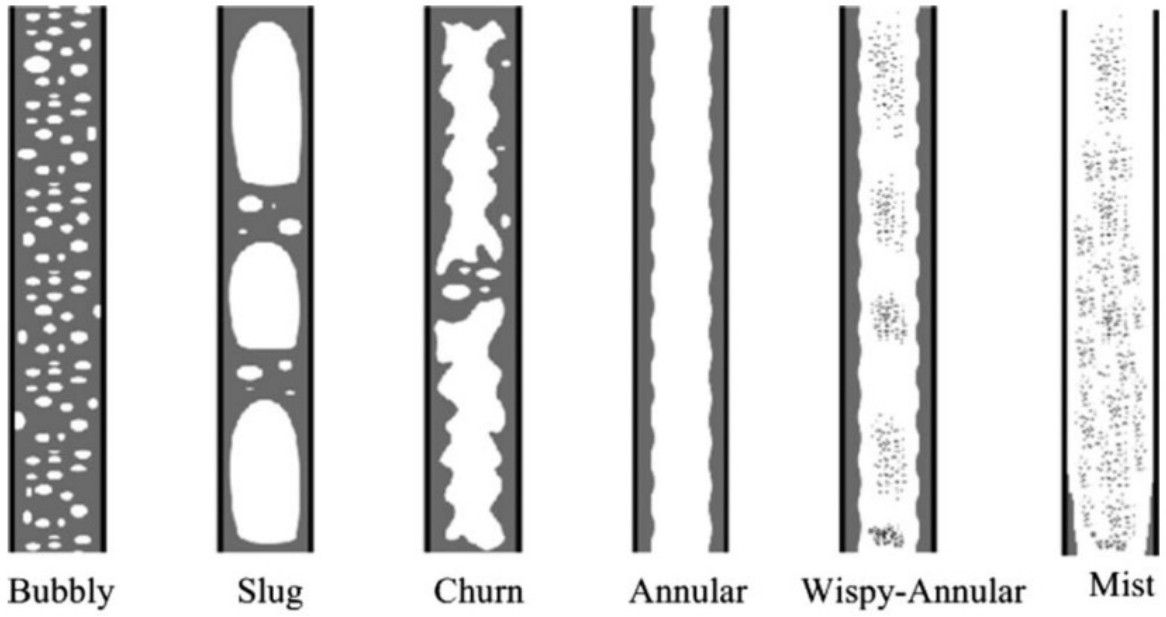


FIGURE 1.21 – Schéma des structures d'écoulements diphasiques obtenues en conduite verticale. Le gris correspond à la phase liquide et le blanc à la phase vapeur (source : Cheng et al. [8]).

L'écoulement à bulles : (*bubbly flow* sur la Figure 1.21) Dans cet écoulement on observe de nombreuses bulles dispersées dans la phase continue de liquide. Les bulles peuvent être de différentes tailles et de différentes formes mais généralement elles sont de formes plus ou moins sphériques avec un diamètre beaucoup plus petit que le diamètre interne de la conduite. Le taux de vide dans cet écoulement est généralement inférieur à 30%. Dans l'idéal, nous cherchons à obtenir ce type d'écoulement car c'est ce régime qui permet d'obtenir un spray stable de fines gouttelettes.

L'écoulement intermittent : (*slug flow* sur la Figure 1.21) En augmentant le taux de vide ($> 30\%$), les bulles se rapprochent de plus en plus, rentrent en collisions et coalescent. Les bulles deviennent de plus en plus grosses d'un diamètre équivalent au diamètre de la conduite. La forme de ces bulles ont la caractéristique de ressembler à une balle ("bullet") avec un nez hémisphérique et une fin émoussée.

Ces bulles sont couramment appelées *bulles de Taylor*. Les bulles de Taylor sont séparées par un autre bouchon de liquide, qui lui-même contient des petites bulles et sont entourées d'un film de liquide qui les sépare de la parois de la conduite.

L'écoulement "bouillonnant" : (*churn flow* sur la Figure 1.21) Lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, la structure devient instable avec des mouvements de fluide oscillatoire, de la coalescence et des ruptures de bulles. L'action des forces de cisaillement dans la direction opposée à la gravité provoquent ces instabilités. Dans les conduites de petit diamètre, nous ne rencontrons pas ce régime d'écoulement et nous passons directement de l'écoulement à bouchons à l'écoulement annulaire.

L'écoulement annulaire : (*annular flow* sur la Figure 1.21) Lorsque les forces de cisaillement entre le gaz à haute vitesse et le film liquide deviennent plus importante que la force de gravité, le liquide est expulsé du centre du tube. On retrouve un film de liquide sur les parois de la conduite avec à son centre l'écoulement de gaz qui contient de très fines gouttelettes. Le taux de vide dans ce régime est généralement supérieur à 90%.

Le diagramme de Hewitt et Roberts pour les écoulements verticaux diphasiques est présenté Figure 1.22. C'est un des diagrammes empiriques principaux pour les écoulements verticaux. Sur ce diagramme, les coordonnées représentent les phases liquide et vapeur respectivement. Par exemple, on peut très bien représenter l'eau sous forme vapeur et sous forme liquide. On peut donc couvrir une large gamme de propriétés physiques de fluide. À l'intersection des deux axes, on peut identifier le régime d'écoulement qui existe en fonction des conditions d'écoulements.

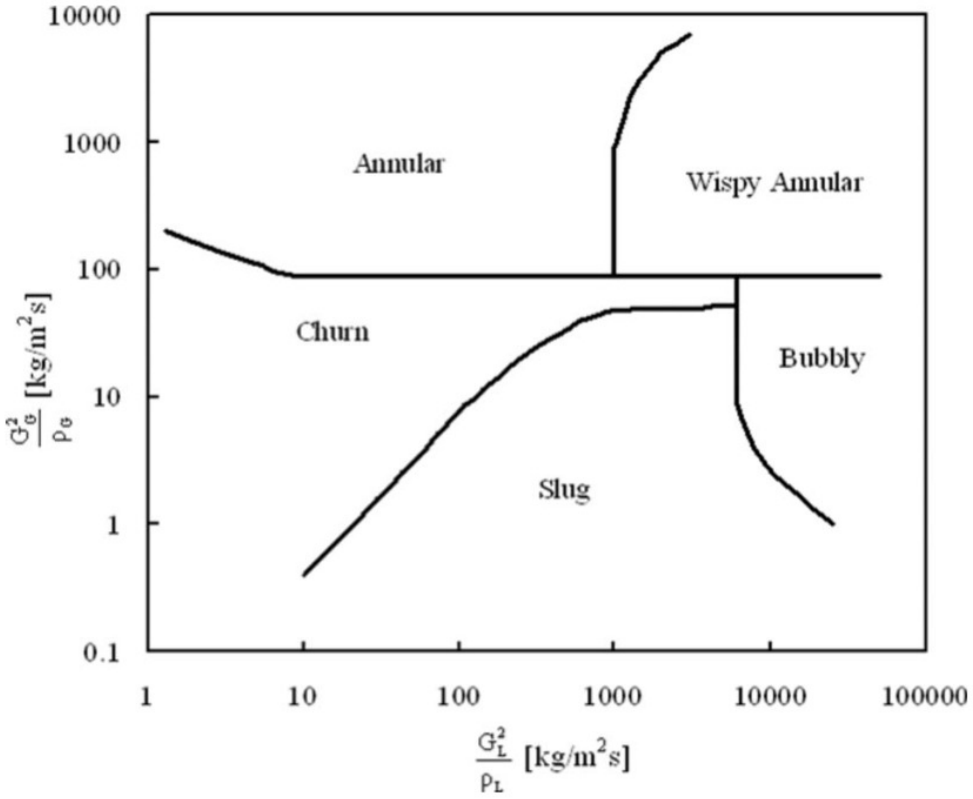


FIGURE 1.22 – Diagramme de Herwitt et Roberts (1969) des régimes d'écoulement en conduite verticale (source : Cheng et al. [8]).

1.5 La solubilité des gaz dans les liquides

La solubilité des gaz dans les liquides est étudié depuis le 19^{eme} siècle pour de nombreuses applications [27], que ce soit dans le domaine de la plongée pour la solubilité des gaz dans les tissus humains, jusqu'au domaine nucléaire pour la solubilité des gaz dans les sels et les métaux fondus. Pour une composition donnée (liquide/vapeur), les conditions thermodynamiques d'équilibre sont obtenues lorsque les potentiels chimiques, et donc les fugacités, sont les mêmes dans les deux phases. La loi de Henry (1803) décrit l'équilibre entre phases lorsque le système est idéal : à température constante et à l'équilibre, la quantité de gaz dissout dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide.

$$p_i = x_i^L \, H_i \tag{1.16}$$

Avec x_i^L la fraction molaire du gaz dans le liquide, p_i [Pa] la pression partielle du gaz pur et H_i [Pa] la constante de Henry (ou constante d'équilibre) qui est une constante caractéristique du gaz. Cette constante présente un maximum qui correspond au minimum de solubilité S.

$$S = p_i \, H_i \tag{1.17}$$

La solubilité d'un gaz dans un liquide dépend de la nature du gaz et du liquide (en particulier leur polarité, cf. Section 1.5.1), de la température et de la pression. Sauf pour quelques exceptions comme l'hydrogène, la solubilité des gaz dans un liquide diminue lorsque la température augmente [1, 28, 29]. En effet, on tient compte du fait que la pression partielle du gaz augmente proportionnellement avec la température (loi des gaz parfaits). Par contre, la constante d'équilibre H_i diminue beaucoup plus fortement lorsque la température augmente dû au processus exothermique du phénomène de dissolution. Si le gaz dissout présente une interaction avec un réactif présent dans le liquide, la solubilité de celui-ci est favorisée. La Figure 1.23 présente la solubilité du CO_2 dans l'eau pour différentes pressions en fonction de la température. La loi de Henry est généralement utilisée pour des basses pressions, c'est à dire pour des valeurs de pression partielle ne dépassant pas 1 atm. Pour des valeurs de pression plus élevées, la constante de Henry est elle-même fonction de la pression partielle du gaz considéré. Elle s'applique pour les mélanges idéaux gaz-liquide sous l'hypothèse qu'il n'y a pas de réaction chimique entre le constituant présent dans le gaz, qui se dissout dans le liquide, et un constituant présent initialement dans le liquide.

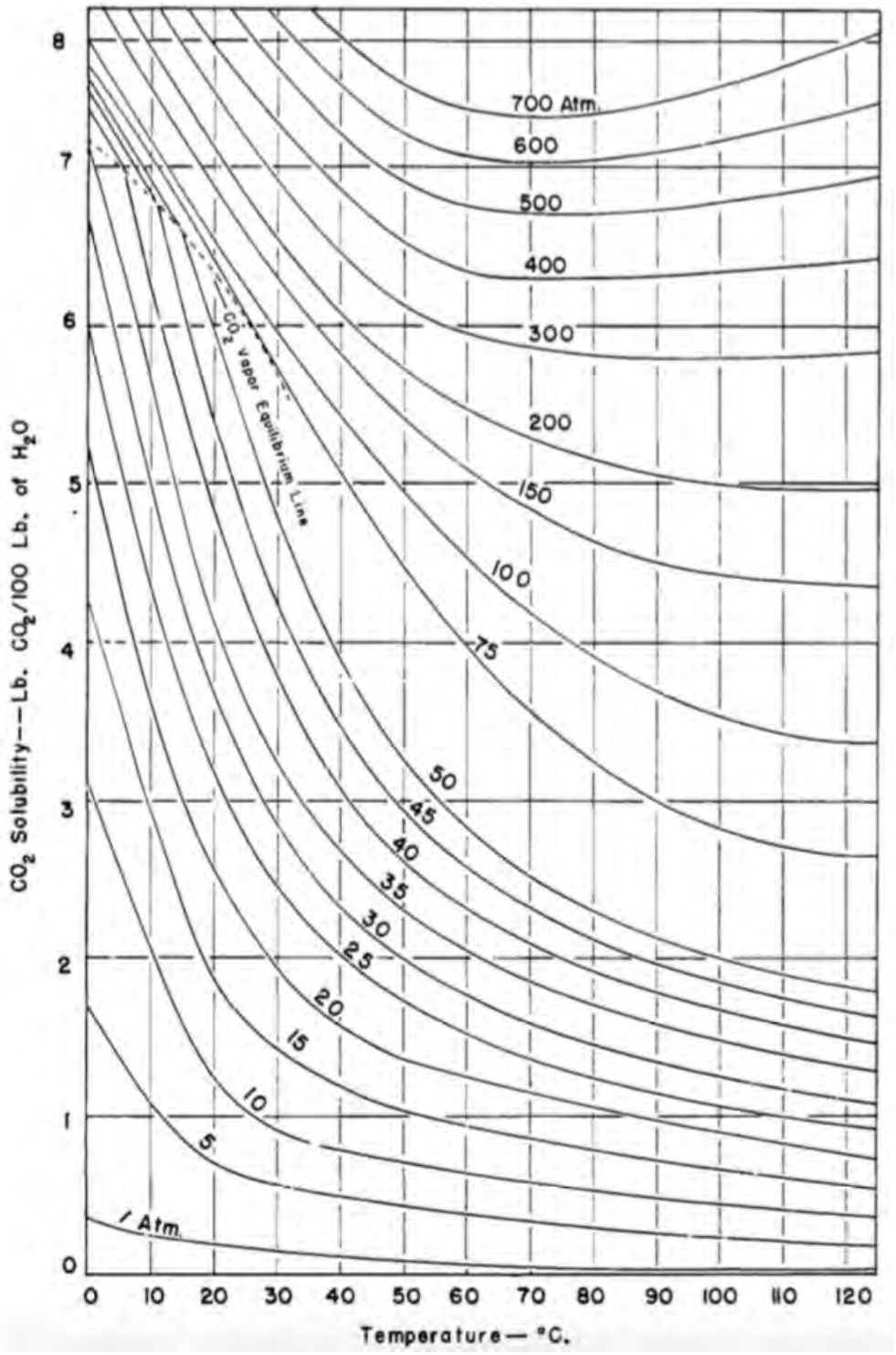


FIGURE 1.23 – Solubilité du CO_2 dans l'eau à différentes pressions en fonction de la température (source : Dodds et al. [10]).

1.5.1 La polarité des molécules

La connaissance de l'interaction des forces qui interviennent lorsqu'un gaz se dissout dans un liquide permet de déterminer si la dissolution est favorisée. Dans une molécule, en fonction de l'électronégativité des atomes qui la composent, il peut apparaître des charges partielles. La répartition de ces charges dans l'espace nous informe sur la polarité de la molécule.

Plus la répartition des charges est symétrique dans la molécule, c'est à dire que le barycentre des charges positives (protons) coïncide avec celui des charges négatives (électrons), plus la molécule sera apolaire. C'est le cas de l'azote, du dioxyde de carbone, ou encore du Novec1230™(cf. Section 1.2.2). À l'inverse, si les barycentres ne coïncident pas, et donc que les charges sont réparties de façon asymétrique, cela signifie que dans la molécule il y a deux pôles distincts de charges opposées. La séparation de ces pôles induit un moment dipolaire dans la molécule, et plus sa valeur est grande, plus la molécule sera polaire. C'est le cas de l'eau.

La polarité d'une molécule influe sur ses propriétés physiques ou chimiques. Les molécules polaires s'attirent mutuellement, l'attraction est d'autant plus forte que les charges partielles sont élevées et que la distance entre les atomes qui s'attirent est faible. L'attraction mutuelle des molécules polaires empêche les molécules apolaires de se mélanger à elles. Les composés dits apolaires, se dissolvent peu ou pas du tout dans les solvants polaires mais s'attirent mutuellement entre eux. Cela signifie que, l'azote ou le dioxyde de carbone se dissolvent très mal dans l'eau mais que dans le Novec1230™, ils sont solubles.

1.5.2 La Théorie Classique de la Nucléation (Classical Nucleation Theory (CNT))

Il y a deux classes de transitions liquide - gaz pour générer des bulles [30, 31, 32]. La première concerne les fluides purs où la phase liquide se transforme en phase vapeur que ce soit par chute de pression (cavitation) ou par augmentation de la température (ébullition). La seconde classe de transition liquide - gaz concerne les liquides saturés par un gaz. Le dégazage de ce gaz dissous, due à une chute de pression, forment des bulles à l'intérieur du liquide. C'est l'effervescente. Le processus qui mène à la formation de bulles est appelé la nucléation. D'une part, une fois que le système est à un état supercritique, son énergie libre sera réduite par la phase de transition associée à une variation de la densité d'énergie libre ΔG_v.

$$\Delta G_{bulk} = -V_B \, \Delta G_v = -\frac{4}{3} \, \pi \, R_B^3 \, \Delta G_v \tag{1.18}$$

D'autre part, la formation de bulles nécessite la formation d'une interface gaz/liquide ou liquide/gaz, qui mène à l'augmentation de l'énergie libre.

$$\Delta G_{surf} = A_B \, \Delta G_S = 4 \, \pi R_B^2 \, \sigma \tag{1.19}$$

Finalement, la variation de l'énergie totale s'exprime telle que :

$$\Delta G_{tot} = \Delta G_{surf} + \Delta G_{bulk} = \pi \, R_B^2 \, \sigma - \frac{4}{3} \, \pi \, R_B^3 \, \Delta G_v \tag{1.20}$$

En supposant que la tension superficielle σ et le volume de l'énergie libre sont indépendants de la taille de la bulle, celle-ci est caractérisée par un maximum qui est fonction de l'énergie libre comme présentée Figure 1.24.

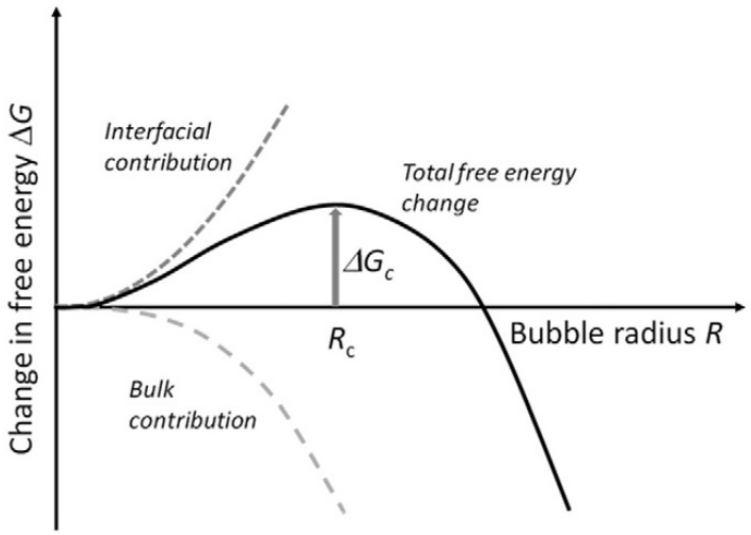


FIGURE 1.24 – Variation de l'énergie libre lors de la formation d'une bulle dans un liquide supercritique, en fonction de son rayon critique (source : [11]).

Le maximum atteint une barrière de nucléation critique ΔG_c associée à un rayon de bulle critique R_c. La formation d'une bulle dont le rayon est plus petit que le rayon critique va rétrécir puis disparaître, alors qu'une bulle de taille supérieure à la taille critique va grossir. Le taux de nucléation de bulles n s'écrit :

$$n = exp\left(-\frac{\Delta G_c}{kT}\right) \tag{1.21}$$

Le rayon critique R_c s'exprime directement par la loi de Laplace :

$$R_c = \frac{2\sigma}{\Delta P} = \frac{2\sigma}{SP_f} \tag{1.22}$$

Où S est la "sursaturation" du liquide ($S = \alpha - 1$, avec α la "saturation") et P_f la pression finale. Dans le cas d'un liquide saturé par un gaz dissous (effervescence), la

pression vapeur du liquide et la pression partielle du gaz dissous doivent être prises en compte. La pression partielle est généralement plus élevée que la pression vapeur, on peut donc négliger la pression vapeur et exprimer la sursaturation en utilisant la loi de Henry :

$$\Delta P = P_i - P_f = H(X_i - X_f) = SP_i \tag{1.23}$$

$$S = \alpha - 1 = \frac{X_i}{X_f} - 1 \tag{1.24}$$

Où $H = P_F/X_f$, la constante de Henry et X_i et X_f les fractions molaires du gaz dissous à l'état initial et l'état final respectivement. Due à la barrière de nucléation ΔG_c, une sursaturation de l'ordre de 1000 est généralement requis dans les liquides purs. Néanmoins, on observe une nucléation à sursaturation beaucoup plus faible en réalité due à la présence d'impuretés ou de bulles pré-existantes qui servent de sites de nucléation et qui font baisser la barrière de nucléation considérablement.

On distingue quatre types de nucléation [11, 12] :

La nucléation de type I : Appelée nucléation homogène classique, cette nucléation se produit au sein du liquide lui-même avec une distribution homogène de bulles. Il n'y a pas de cavités de bulles initialement présentes dans le système. Ce processus devient prédominant lorsque la pression du liquide sursaturé est considérablement réduite. La Figure 1.25 présente le schéma de principe de la nucléation homogène classique. Une fois que les bulles sont produites, elles remontent à la surface du liquide.

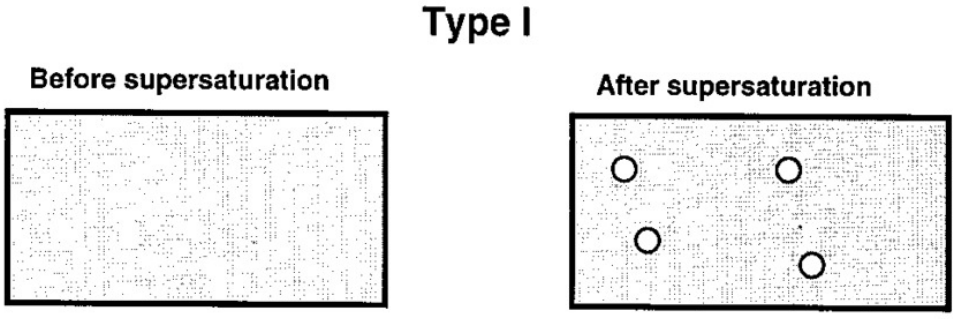


FIGURE 1.25 – La nucléation homogène classique produisant des bulles de gaz dans le liquide à un niveau élevé de sursaturation de l'ordre de 100 ou plus (source : Jones et al. [12]).

La nucléation de type II : Appelée nucléation hétérogène classique, cette nucléation apparait à une interface ou sur une paroi plutôt que dans le liquide. Il y a pas de cavités de gaz initialement présentes, comme dans la nucléation homogène.

Le germe de nucléation peut apparaitre en présence d'irrégularités sur une surface solide (paroi d'une bouteille, intérieur d'un injecteur...), de particules solides ou encore de fines poussières. Pour une nucléation homogène ou une nucléation hétérogène, un niveau élevé de sursaturation est nécessaire (de l'ordre de 100 ou plus). La Figure 1.26 présente le schéma de principe de la nucléation hétérogène classique. Après l'apparition des premières bulles, la production des bulles suivantes est continue due à l'existence à ce moment-là de cavités remplies de gaz. Nous passons alors dans les deux derniers types de nucléation, le type III et IV.

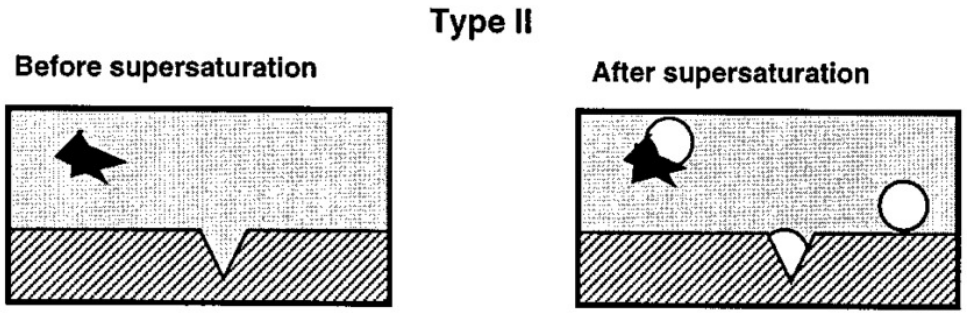


FIGURE 1.26 – La nucléation hétérogène classique (source : Jones et al. [12]).

La nucléation de type III : Appelée hétéronucléation dite "pseudo-classique", cette nucléation inclue la nucléation homogène et la nucléation hétérogène à partir d'un germe gazeux pré-existant sur toutes les irrégularités de la surface solide ou les particules en suspension. À cet instant, le rayon de courbure de chaque bulle est inférieur au rayon critique R_c. La nucléation de type III est atteinte à un niveau faible de sursaturation.

La nucléation de type IV : Appelée nucléation non-classique, cette nucléation intervient généralement à partir d'un germe gazeux pré-existant sur toutes les irrégularités et suit les évènements de nucléation de type II et de type III. Si le germe gazeux pré-existant à un rayon de courbure supérieur au rayon critique, alors la nucléation a lieu spontanément et il s'agit alors de nucléation non-classique. La Figure 1.27 présente le schéma de principe de la nucléation de type III et IV.

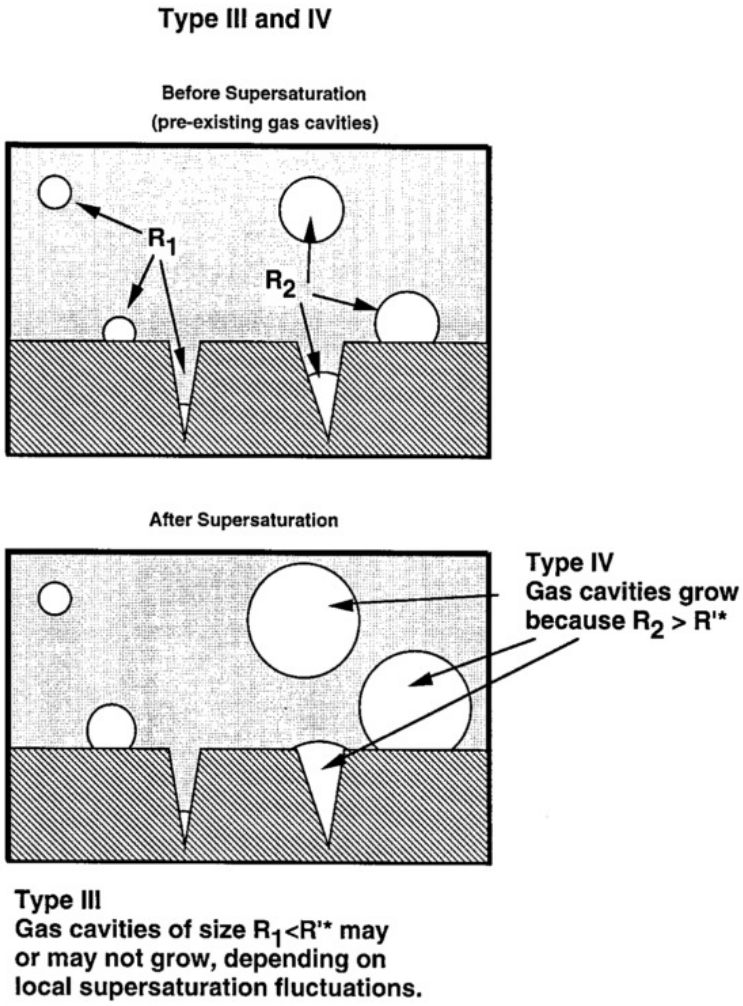


FIGURE 1.27 – La nucléation pseudo-classique (type III) et la nucléation non-classique (type IV) (source : Jones et al. [12]).

1.6 Conclusion

Une revue de la littérature des types d'atomisation et de l'état actuel sur le processus d'atomisation effervescente a été menée. Dans le cadre du projet, pour une décharge optimale, l'agent doit être déchargé le plus rapidement possible (débit massique élevé). Le spray formé doit avoir un angle d'ouverture large et être composé de fines gouttelettes, et le système doit avoir la configuration la plus simple possible (facteur de robustesse et simplifiant la maintenance) et une masse limitée. Nous avons choisi d'utiliser une buse simple-orifice. L'atomisation effervescente couple la méthode dynamique que l'on retrouve dans l'atomisation aérée et la méthode thermodynamique que l'on retrouve dans l'atomisation flash. Cette technologie offre des améliorations potentielles en terme de qualité d'atomisation du fluide pour répondre aux problématiques indus-

trielles. Les différentes recherches menées ces dernières années portent en particulier sur les caractéristiques des sprays obtenus. Les effets de la pression d'injection, de la concentration en gaz dissous et de la géométrie des buses utilisées ont été étudiés. Dans le cadre de notre étude, nous nous focalisons sur les effets de la concentration en gaz dissous. La littérature montre que cette technologie améliore considérablement le processus d'atomisation. La dissolution d'un gaz hautement soluble agit sur la pulvérisation du liquide, d'une part, en analogie avec l'atomisation aérée, le gaz transforme le liquide en ligaments lorsque l'écoulement traverse l'orifice, et d'autre part, en analogie avec l'atomisation flash, le gaz se dilate après le passage de l'orifice, provoquant l'éclatement du liquide en ligaments et fines gouttelettes. Lorsque la concentration en gaz dissous augmente, le spray subit une expansion immédiatement en sortie de système et possède une forme parabolique caractéristique. L'angle d'ouverture est modifié et les tailles de gouttes minimisées. Sur la base de ces recherches, l'objectif est de comprendre les mécanismes d'atomisation effervescente. Jusqu'à maintenant, l'observation du spray par caméra rapide a été mis en avant. Dans notre étude, nous visualisons également l'écoulement en amont de la buse. Un banc d'essais a été conçu et mis en place au sein de l'IMFT. Les éléments qui le composent ainsi que les moyens d'analyse utilisés pour interpréter les résultats des campagnes d'essais sont présentés Chapitre 2.

Chapitre 2

Mise en place du banc d'essais et des moyens d'analyse

La partie expérimentale de ce projet requiert la mise en place d'un banc d'essais pour la compréhension physique du phénomène d'atomisation effervescente dans le but de prédire quels sont les paramètres clés qui influencent l'atomisation. Dans ce chapitre on présente le banc expérimental mis en place et piloté au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT). Quatre moyens de diagnostic sont présentés. D'une part, l'évolution temporelle de la pression et de la température dans la bouteille de décharge est enregistrée. Ces données permettent de mesurer précisément la durée d'une décharge. D'autre part, on utilise une caméra rapide pour visualiser l'écoulement en amont de la buse ainsi que le spray en sortie. Les images acquises permettent d'avoir un suivi temporel, en lien avec les mesures de pression et de température dans la bouteille de décharge pour la compréhension physique des décharges. Ces diagnostics sont synchronisés via LabVIEW avec l'ouverture de l'électrovanne. Un granulomètre à diffraction laser a également été utilisé pour la mesure de taille de gouttes dans le spray, mais nous avons rencontrés des difficultés de mesure liées aux propriétés chimiques du Novec1230™et aux limitations d'utilisation du Spraytec de Malvern. Tous les essais sont réalisés à iso-volume de liquide de 200 mL, soit au Novec1230™soit à l'eau. L'objectif de faire des décharges à l'eau est d'avoir une décharge de référence et donc un point de comparaison pour faire une corrélation au niveau du spray avec le Novec1230™. En conditions de température ambiante, l'eau ne s'évapore pas contrairement au Novec1230™qui s'évapore très rapidement. Il est donc difficile dans le cas du Novec1230™de distinguer sur le processus d'atomisation quel est le phénomène prépondérant pour cet agent : son taux d'évaporation ou son efficacité d'atomisation. Le Tableau 2.1 résume les propriétés thermo-physiques de l'eau et du Novec1230™. Tous les essais sont également réalisés à iso-pression initiale fixée à 40 bar, à l'azote et/ou au dioxyde de carbone. Une variation de la composition de l'agent (variation de la quantité de CO_2, un gaz hautement soluble) permettra d'étudier l'influence des gaz dissous sur le processus d'atomisation effervescente (phénomènes intervenant dans la bouteille de décharge, écoulement en amont de la buse, impacts sur le spray). Deux installations

Fluide	Eau	Novec1230™
Formule chimique	H_2O	$C_6F_{12}O$
Phase à l'ambiant	Liquide	Liquide
Point d'ébullition (à 1 bar)	+100°C	+49,2°C
Densité liquide à l'ambiant	1000 kg/m^3	1600 kg/m^3
Pression vapeur	0,0234 mbar	0,404 bar
Viscosité dynamique	1.10^{-3} Pa.s	$5{,}24.10^{-4}$ Pa.s
Tension superficielle	$71{,}97.10^{-3}$ N/m	$11{,}08.10^{-3}$ N/m

TABLE 2.1 – Propriétés thermo-physiques de l'eau et du Novec1230™.

de la bouteille de décharge permettent de mener des campagnes d'essais à deux températures d'agent : à l'ambiant et à froid (jusqu'à -20°C grâce à un refroidissement de la bouteille avec de la neige carbonique), afin d'étudier l'influence de la température sur le processus d'atomisation. Un logiciel de calcul d'équilibre entre phases, Simulis Thermodynamics de ProSim, permet de calculer la composition des phases de notre système à partir des propriétés thermodynamiques de chaque constituant dans le but de comprendre les phénomènes qui interviennent dans la bouteille de décharge et également de compléter les résultats expérimentaux obtenus.

2.1 Le banc expérimental

Le système de protection feux des moteurs d'avion est constitué de deux bouteilles de décharge et d'un système de distribution de tuyauteries qui se terminent par des buses simples évasées (cf. Chapitre 1). Chaque bouteille de décharge est équipée d'une cartouche pyrotechnique et d'une sortie de décharge fermée par un opercule. Les deux bouteilles sont reliées au système de distribution par une connexion en Y. L'opercule est rompu par l'onde de choc créée par l'activation de la cartouche pyrotechnique et l'agent est ensuite acheminé grâce au système de tuyauteries puis dispersé dans les différentes zones du moteur.

Le banc d'essais mis en place au sein de l'IMFT représente le système d'extinction. Il est composé de plusieurs éléments principaux : la bouteille de décharge, le système de pressurisation, la veine transparente, l'électrovanne et la buse. Différents agencements de ce banc ont été testés, comme représentés sur la Figure 2.1. L'agencement pour la configuration 1, de haut en bas, est : la bouteille de décharge équipée d'un transmetteur de pression et d'un thermocouple, un raccord en té pour l'arrivée de l'alimentation en gaz et le remplissage du liquide, l'électrovanne, un flexible souple, la veine transparente et la buse. Pour la configuration 2, la position du flexible et de la veine transparente

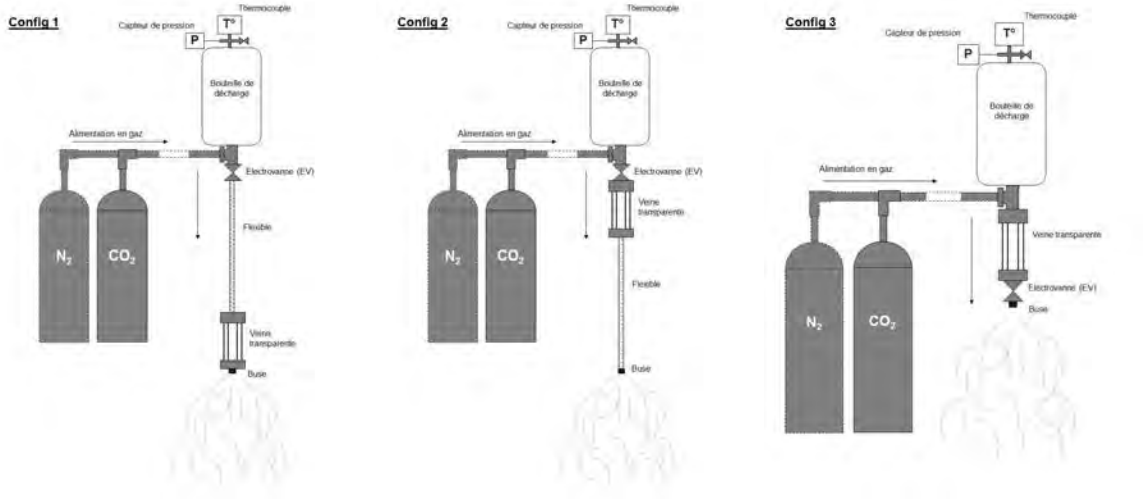


FIGURE 2.1 – Les différentes configurations du banc expérimental.

sont inversées, la veine transparente est située juste après l'électrovanne. Le système étant fermé au niveau de l'électrovanne, le volume interne de la veine transparente et le flexible sont ouverts à l'environnement ambiant et donc rempli d'air. Lors de différents essais de décharge avec ces deux configurations, on s'est rendu compte que ce volume d'air venait "perturber" les résultats expérimentaux. Sur les images acquises de l'écoulement en amont de la buse, on observait la présence de bulles en tout début de décharge. Ces bulles provenaient de l'air contenu dans la veine transparente et le flexible qui, en amorçant la décharge, se retrouve piégé dans l'écoulement au début de la décharge. On observait également sur les courbes de pression acquises dans la bouteille de décharge au cours du temps, un changement de pente correspondant au remplissage de la veine transparente et du flexible, suivi de la reprise de la décharge dite "normale" de l'agent. Pour corriger ces perturbations le flexible a été supprimé et la veine transparente déplacée au-dessus de l'électrovanne. C'est à dire que lorsque la bouteille est remplie, la veine transparente l'est également. C'est la configuration 3, représentée Figure 2.2. L'agencement de la configuration 3 est, de haut en bas : la bouteille de décharge équipée d'un transmetteur de pression et d'un thermocouple, un raccord en té pour l'arrivée de l'alimentation en gaz et le remplissage du liquide, la veine transparente, l'électrovanne et la buse. Chaque élément de ce banc est présenté en détails dans cette Section 2.1.

2.1.1 La bouteille de décharge

Un cylindre d'échantillonnage en Inox double orifices représente la bouteille de décharge. D'une capacité d'un litre, elle résiste à une pression de service allant jusqu'à 124 bar. Elle est équipée d'un thermocouple et d'un capteur de pression, positionnés sur la partie supérieure de la bouteille via un raccord en croix. Une vanne de purge est connectée sur le troisième branchement de ce raccord. Le thermocouple (couple de

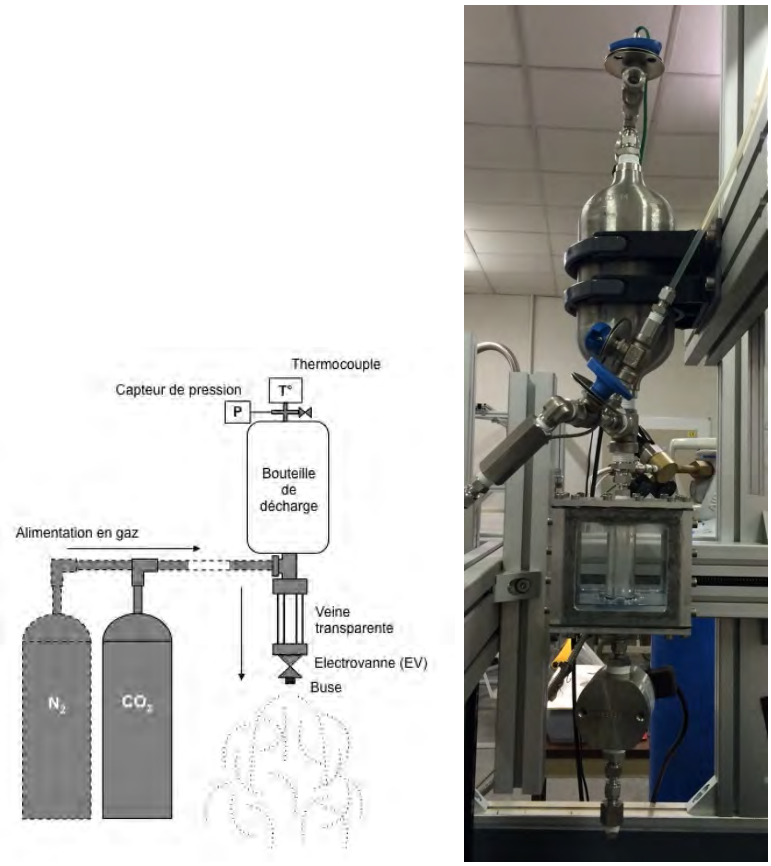


FIGURE 2.2 – Schéma et photographie du banc expérimental.

matériaux Chrome/Aluminium) est composé d'une gaine de protection en Inox, plonge directement dans la bouteille (de 185 mm depuis le haut de la bouteille) et se retrouve dans la phase liquide lorsque la bouteille est remplie. Le Tableau 2.2 présente les caractéristiques du thermocouple installé. Le capteur de pression dynamique possède une

Thermocouple	Chemisé type K (gaine acier réfractaire AISI 310)
Température maxi	1100°C
Diamètre	1,0 mm
Longueur	300 mm
Temps de réponse	0,15 s

TABLE 2.2 – Caractéristiques du thermocouple de la bouteille de décharge.

précision de 0,05% EM (Étendues de Mesure Standard : jusqu'à 100 bar) sur une plage de température allant de 10 à 40°C, et une précision de 0,20% EM sur la plage de température allant de -10 à 80°C (néanmoins, pas de dégradations observées sur la précisions des mesures à -20°C). Le Tableau 2.3 présente les caractéristiques de ce capteur de pres-

sion. Ces deux équipements permettent la lecture de la température et de la pression

Capteur de pression	KELLER PA-33X
Etendue de Mesure (EM)	0 - 100 bar
Précision de 0,05% EM	De 10° à 40°C
Précision de 0,20% EM	De -10°C à 80°C
Signal de sortie	4 - 20 mA

TABLE 2.3 – Caractéristiques du capteur de pression de la bouteille de décharge.

lors du remplissage de la bouteille. Ces données seront également acquises au cours du temps, lors d'une décharge. La lecture et l'acquisition de ces données sont gérées grâce à une interface et un système d'acquisition LabVIEW, décrit en Section 2.24 Page 94. La bouteille peut également être refroidie grâce à de la neige carbonique, pour des tests en conditions froide, afin d'étudier l'influence de la température. Pour ces tests, un caisson est mis en place autour de la bouteille de décharge pour contenir la neige carbonique, comme sur la photo Figure 2.3. Lors de la préparation d'un test à froid, la bouteille de décharge est refroidie jusqu'à -20°C. La glace carbonique du CO_2 a une température de -78°C, mais par sécurité et pour réduire le risque de détérioration du matériel, en particulier de l'électrovanne, les essais sont menés à -20°C, ce qui permet néanmoins d'avoir un delta de 40°C par rapport aux essais à l'ambiant.

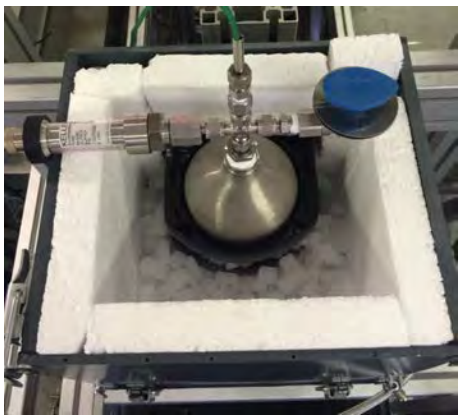


FIGURE 2.3 – Refroidissement de la bouteille avec la neige carbonique.

2.1.2 Pressurisation du système

Pour un point d'essai, la procédure de remplissage débute par le remplissage de la bouteille avec le liquide (eau ou Novec1230™). La pressurisation de la bouteille est ensuite assurée par une arrivée de dioxyde de carbone et/ou d'azote selon le point d'essai. La Figure 2.4 présente les schémas de principe de méthodes de *carbonatation*. La

carbonatation est utilisée dans l'industrie de la boisson dont le principe est d'imprégner un liquide avec du CO_2 vapeur. La méthode la plus commune est la méthode dite *bubbler* qui consiste à injecter le CO_2 dans le liquide sous pression dans le but de former des petites bulles de gaz qui peuvent être plus facilement absorber par le liquide. Cette méthode permet d'optimiser la dissolution du dioxyde de carbone dans le liquide [13]. Plus la surface du liquide est exposée au dioxyde de carbone et plus le taux d'absorption du gaz par le liquide sera important. Nous avons donc choisi d'effectuer la pressurisation par le bas de la bouteille.

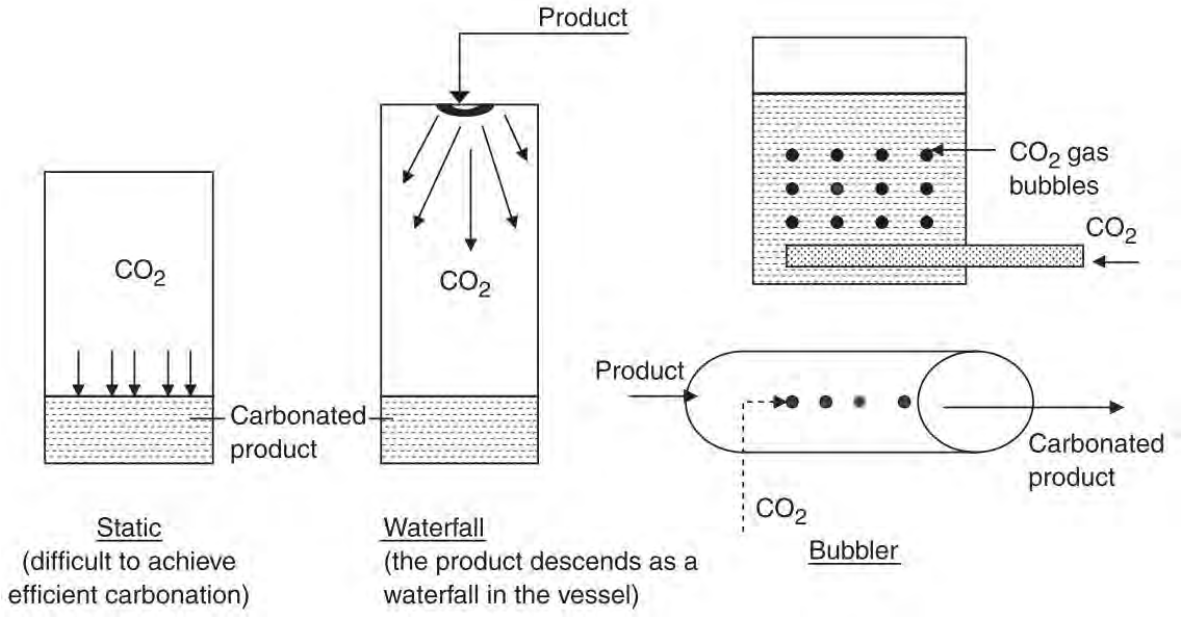


FIGURE 2.4 – Méthode de carbonatation (source : Steen [13]).

Un cylindre intermédiaire en Inox d'une capacité d'un gallon (3,79 litres), permet de s'assurer de la quantité de dioxyde de carbone injectée dans la bouteille de décharge. Il est installé entre la bouteille de gaz de CO_2 et la bouteille de décharge. Pour la préparation d'un point d'essai, ce cylindre intermédiaire est rempli de CO_2 au maximum : 49,7 bar, ce qui correspond à la pression limite des bouteilles de gaz de CO_2 fournies par Air Liquide. Un manomètre numérique dont les caractéristiques sont données Tableau 2.4, ainsi qu'un thermocouple ayant les mêmes caractéristiques données Tableau 2.2 page 67, équipent ce cylindre. Après remplissage, la pression et la température dans ce cylindre nous permettent, à l'aide de l'équation d'état, de calculer la masse volumique de CO_2 pour ces conditions initiales. La base de données du NIST nous permet d'avoir rapidement ces valeurs. On en déduit la masse de CO_2 pour le volume du cylindre intermédiaire (3,79 litres). On pressurise ensuite la bouteille de décharge jusqu'à la pression test en fonction du point d'essai. Après un retour à l'équilibre (retour à la température initiale dans le cylindre intermédiaire), on se retrouve avec une nouvelle

Manomètre numérique	KELLER ECO 2
Etendue de Mesure (EM)	0 - 300 bar
Précision $<$ 0,05% EM	À température ambiante

TABLE 2.4 – Caractéristiques manomètre numérique du cylindre intermédiaire.

pression et donc une nouvelle masse volumique. On en déduit la nouvelle masse de CO_2 correspondante et on fait un bilan de masse (différence de masse entre l'état initial et l'état final) pour obtenir la masse de CO_2 injectée dans la bouteille de décharge.

2.1.3 La veine transparente

Une veine transparente a été conçue et construite dans les locaux de l'atelier de l'IMFT. L'objectif est de visualiser directement l'écoulement au cours d'une décharge, en amont de la buse. Elle est composée d'un tube en verre borosilicate et d'une enceinte étanche. Le verre borosilicate est composé à 80% de silice, il présente donc un faible coefficient de dilatation et se distingue donc par une bonne résistance au chocs thermiques. Sans absorption dans le spectre visible, son apparence est claire et pratiquement incolore. Le Tableau 2.5 présente les dimensions et caractéristiques du tube. Pour résister aux pressions de service, le tube est épais, ce qui accentue les aberrations

Diamètre intérieur	12 mm	Tolérance : 0,3 mm
Epaisseur	8,5 mm	Tolérance : 0,2 mm
Longueur	100 mm	Tolérance : 0,3 mm
Pression de service max.	80 bar	Coef. de sécurité x 2

TABLE 2.5 – Caractéristiques du tube en verre borosilicate.

radiales pour la visualisation de l'écoulement sur les bords du tube. Une aberration est un défaut du système optique qui conduit à la déformation des images. Les aberrations sont classées en deux catégories : les aberrations chromatiques, dépendantes de la longueur d'onde, qui sont responsables d'erreur d'ordre colorimétrique des images. Puis les aberrations géométriques, dépendantes de paramètres géométriques, qui ont un impact sur le pouvoir de résolution du système. Ce sont les aberrations géométriques que nous rencontrons : lorsque la lumière traverse l'interface entre les différents milieux (air/verre/liquide), les rayons dévient et leur trajectoire est modifiée. Ce phénomène, connu sous le terme de réfraction, permet de voir les bords du tube. La déviation de la lumière se manifeste aux interfaces car les trois milieux n'ont pas le même indice de réfraction.

Pour diminuer ces aberrations, qui se situent surtout au niveau de l'interface air/verre (plus gros écart d'indices de réfraction entre les deux milieux, $n_{verre} = 1,54$ et $n_{air} = 1$),

une enceinte étanche est mise en place autour du tube. Cette enceinte est à surfaces planes, autrement dit, l'incidence lumineuse est perpendiculaire au verre de l'enceinte, donc même s'il y a un changement d'indice entre l'air et le verre de l'enceinte, il n'y a pas d'aberration. Cette enceinte est remplie du même liquide utilisé pour une décharge (eau ou Novec1230^{TM}), selon les conditions expérimentales. On se retrouve donc avec seulement deux indices de réfractions (liquide/verre/liquide). La Figure 2.5 schématise les aberrations géométriques avant (a) et après (b) correction.

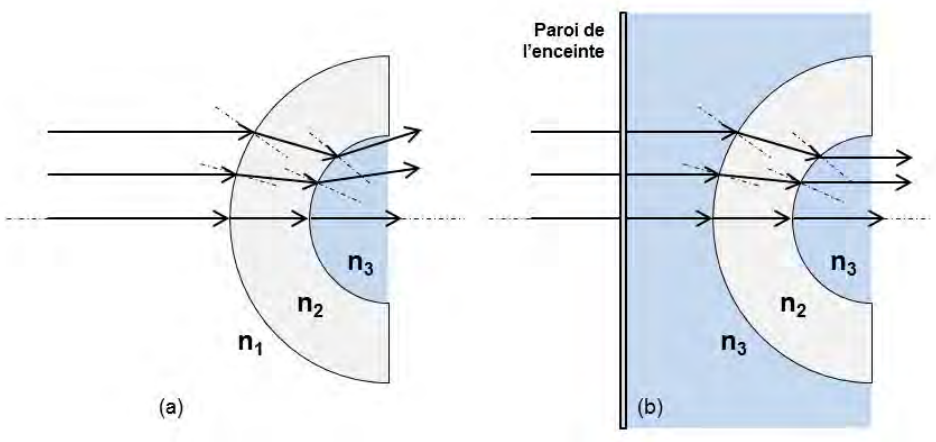


FIGURE 2.5 – (a) Représentation des aberrations géométriques avant correction. Les rayons lumineux passent par 3 milieux d'indice de réfraction différents avec n_1 : air, n_2 : verre et n_3 : liquide. (b) Représentation des aberrations géométriques après correction avec n_2 : verre et n_3 : liquide. La déviation est plus importante où l'écart entre les indices de réfraction des milieux est plus importante, soit au niveau de l'interface air ($n_1 = 1$)/verre ($n_2 = 1,54$).

Pour quantifier l'impact de l'installation de cette enceinte, la loi de Sneel-Descartes pour la réfraction, équation 2.1, permet d'exprimer le changement de direction d'un faisceau lumineux lors de la traversé d'une paroi séparant deux milieux différents.

$$n_1 \, sin\,(\theta_1) = n_2 \, sin\,(\theta_2) \tag{2.1}$$

n_1 et n_2 étant les indices de réfraction du milieu 1 et du milieu 2 respectivement, θ_1 l'angle d'incidence du rayon lumineux et θ_2 l'angle de réfraction du rayon lumineux après traversé de la paroi entre le milieu 1 et le milieu 2.

On peut faire le calcul pour un exemple : l'indice de réfraction du verre est $n_1 = 1$, l'indice de réfraction du verre borosilicate est $n_2 = 1{,}54$ et celui du Novec1230^{TM}est $n_3 = 1,264$. Pour une configuration sans correction (air/verre/liquide) : on suppose un rayon lumineux arrivant sur la première interface air/verre avec un angle d'incidence

θ_1 de 15°, on calcul l'angle de réfraction θ_2 correspondant :

$$\theta_2 = sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2} sin\left(\theta_1\right)\right) = 9,7° \tag{2.2}$$

Le rayon lumineux se retrouve donc dans le verre avec un nouvel angle d'incidence θ_2 de 9.7°. Ce rayon va ensuite traverser l'interface verre/liquide, on calcul donc l'angle de réfraction θ_3 correspondant.

$$\theta_3 = sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_3} sin\left(\theta_2\right)\right) = 11,8° \tag{2.3}$$

Le rayons lumineux est donc dévié de $\theta_1 - \theta_3 = 3,2°$.

Pour une configuration avec correction (liquide/verre/liquide) : la paroi de l'enceinte ne perturbent pas les rayons lumineux car ils arrivent perpendiculairement à la paroi (angle d'incidence nul donc angle de réfraction nul), on peut donc calculer la déviation du rayon à l'interface liquide/verre pour un même angle d'incidence θ_{1c} de 15° :

$$\theta_{2c} = sin^{-1}\left(\frac{n_3}{n_2} sin\left(\theta_{1c}\right)\right) = 12,2° \tag{2.4}$$

Puis le rayon lumineux repasse par l'interface verre/liquide :

$$\theta_{3c} = sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_3} sin\left(\theta_{2c}\right)\right) = 15° \tag{2.5}$$

On retrouve le même angle du rayon lumineux incident donc la déviation du rayon initial est nulle. Il est donc évident que cette correction offre le meilleur résultat lorsque l'écoulement dans le tube est principalement liquide, plus il y aura de gaz sous formes de bulles ou de poches dans l'écoulement et moins la correction sera efficace.

2.1.4 L'électrovanne

Pour déclencher la décharge, une électrovanne ProValve Single 3052 G à solénoïde 14C80, est installée entre la veine transparente et la buse. C'est une électrovanne dite "tout ou rien", autrement dit, elle a deux états possibles : soit entièrement ouverte soit entièrement fermée. Celle-ci est "normalement fermée", c'est à dire qu'en absence d'alimentation électrique, elle reste fermée. Lorsque la bobine est alimentée, l'induit (masselotte en fer) est attiré par le champ magnétique créé, la force du champ magnétique étant plus forte que les forces combinées de la pression régnant dans la cheminée de l'induit et du ressort, le piston se soulève et permet l'écoulement du fluide. Le Tableau 2.6 présente les caractéristiques de cette électrovanne. Son ouverture, son temps d'ouverture et sa synchronisation avec les autres éléments du banc sont gérés grâce à une interface LabVIEW décrite en Section 2.24 page 94. La Figure 2.6 présente le schéma de l'électrovanne.

Fonction	Vanne 2/2-voies avec solénoïde
Plage de pression	10 à 350 bar
Matériau	Acier inoxydable
Plage de température	-40°C à +60°C
Taille de l'orifice	12 mm
Connections	NPT 1/2"

TABLE 2.6 – Caractéristiques de l'électrovanne.

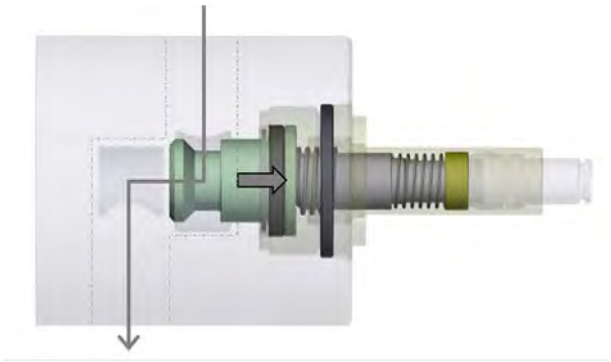


FIGURE 2.6 – Schéma de l'électrovanne.

2.1.5 La buse

La buse installée sur le système est une buse simple orifice de diamètre D = 1 mm et de longueur de passage (épaisseur de l'orifice) L = 2 mm, soit un rapport L/D = 2. Le choix s'est porté sur ce type de buse car l'objectif est d'étudier le phénomène d'atomisation effervescente sur un système simple tel que décrit Section 2.1. C'est cette buse qui sera utilisée pour les campagnes d'essais.

2.1.6 Les conditions expérimentales

Tous les essais sont réalisés à iso-volume de liquide (200 mL) et à iso-pression initiale (40 bar) lors des campagne d'essais, à température ambiante (environ 20°C) et à froid (-20°C). Le volume initial de liquide a été fixé par rapport au taux de remplissage des bouteilles FireX (cf. Chapitre 1) et du volume de notre bouteille de décharge (1 litre). La pression initiale est fixée par rapport à la pression maximale à laquelle nous pouvons pressuriser avec du CO_2. En effet, les bouteilles de dioxyde de carbone sont limitées à 49,7 bar, et certains tests sont réalisés avec du CO_2 uniquement, donc la pression test initiale a été fixée à 40 bar pour tous les essais. Après le remplissage de la bouteille avec le liquide, on pressurise au CO_2 et/ou au N_2 selon le point d'essai.

Une variation de la quantité de CO_2 permet d'observer l'influence du gaz dissous sur le processus d'atomisation car le CO_2 est un gaz très soluble dans le Novec1230^{TM}, et très peu dans l'eau. Cela est dû à la polarité des molécules : l'attraction mutuelle des molécules polaires empêche les molécules apolaires de se mélanger, c'est le cas du CO_2 (apolaire) avec l'eau (polaire) (cf. Chapitre 1). Le Tableau 2.7 résume les conditions expérimentales. La quantité de CO_2 injectée dans la bouteille de décharge est exprimée en pourcentage de la masse du mélange telle que :

$$w_i = \frac{m_i}{m_{melange}} * 100 \tag{2.6}$$

Avec w_i le pourcentage en masse du constituant i, m_i la masse du constituant i et $m_{melange}$ la masse des constituants : liquide + CO_2.

Ce pourcentage en masse de CO_2 est directement lié à la pression injectée dans la bouteille de décharge. Autrement dit pour obtenir 17%, le liquide est pressurisé à 20 bar de CO_2 et pour obtenir 33% le liquide est pressurisé à 40 bar de CO_2. L'azote est un gaz très peu soluble dans l'eau et le Novec1230^{TM}, il sert de gaz propulsif et vient compléter les cas tests à 21% pour l'eau et 0% et 17% pour le Novec1230^{TM}pour d'atteindre les 40 bar de pression. L'objectif d'utiliser de l'azote est également de faciliter l'expulsion et la dispersion de l'agent. À noter que l'azote n'est pas pris en compte dans la masse du mélange. Ce qui signifie que la masse du mélange est variable du fait que la masse de CO_2 varie en fonction du cas test. La pressurisation s'opère par le bas de la bouteille,

Température [°C]	Composition	Nomenclature	$\%_{masse}CO_2$
+23	Eau + N_2	Wat00CO_2Hot	0%
+20	Eau + CO_2	Wat21CO_2Hot	21%
+23 et -20	Novec1230^{TM}+ N_2	Nov00CO_2Hot Nov00CO_2Cold	0%
+20 et -20	Novec1230^{TM}+ CO_2 + N_2	Nov17CO_2Hot Nov17CO_2Cold	17%
+23	Novec1230^{TM}+ CO_2	Nov33CO_2Hot	33%
-20	Novec1230^{TM}+ CO_2 + N_2	Nov33CO_2Cold	
+11	Novec1230^{TM}+ CO_2	Nov50CO_2Hot	50%
-20	Novec1230^{TM}+ CO_2 + N_2	Nov50CO_2Cold	

TABLE 2.7 – Résumé des conditions expérimentales.

ce qui permet dans un premier temps d'optimiser la dissolution du CO_2 dans le liquide

(cf. Chapitre 1), mais aussi d'homogénéiser la température de l'agent lors des tests à froid par exemple (le bullage par le bas assure le mélange).

L'objectif de faire des décharges à l'eau est de faire une corrélation au niveau du spray avec le Novec1230™, le Novec1230™ s'évaporant à l'ambiant contrairement à l'eau (cf. les propriétés du Novec1230™ Chapitre 1), afin de comprendre quel est le phénomène prépondérant dans les décharges de Novec1230™ : l'évaporation ou le spray.

Le cas d'essai à 50% en masse de CO_2 est motivé par la contrainte industrielle. Un mélange à 50% étant envisagée, il fallait étudier cette composition. Le protocole de remplissage de la bouteille est différent. En effet, les bouteilles de CO_2 étant limitées à 47,9 bar, la pressurisation dans notre bouteille ne peut excéder 40 bar, soit 33% de CO_2 en masse, donc la procédure doit s'effectuer en deux étapes grâce un refroidissement de la bouteille de décharge.

Voici la procédure : on pressurise la bouteille une première fois à 33% de CO_2 à température ambiante, puis on procède à un refroidissement de la bouteille grâce à la neige carbonique. Le refroidissement du système engendre une baisse de pression dû à la dissolution du CO_2 dans le Novec1230™, on peut ainsi procéder à une deuxième pressurisation pour atteindre les 50%. Une fois les 50% de CO_2 atteint, on avons deux cas de figure : s'il s'agit d'un test à l'ambiant ou s'il s'agit d'un test à froid. Pour un test à l'ambient, on retire la neige autour de la bouteille, la température va donc remonter ainsi que la pression. Lorsqu'on atteint les 40 bar (il n'y a donc pas d'ajout d'azote), la température de la bouteille remonte jusqu'à +11°C. Comme nous réalisons l'étude à pression fixe de 40 bar, nous ne pouvons pas attendre d'atteindre la température ambiante et nous devons décharger la bouteille à +11°C. Dans le cas d'un test à froid, on vérifie que la température du système est à -20°C, la pression étant inférieur à la pression test de 40 bar, on complète la pression manquante à l'azote. On vérifie que la bouteille est 40 bar et à -20°C pour déclencher la décharge.

2.1.7 Répétabilité et précision

Le volume initial de liquide et la pression initiale sont les paramètres de premier ordre qui pilotent le temps de décharge. Tous les essais sont réalisés à iso-volume de liquide de 0,2 L et à iso-pression de 40 bar. Une éprouvette de précision ± 1 mL permet le remplissage de la bouteille avec le liquide. Pour la pression initiale, la précision du capteur de pression est de 0,1% mais la manipulation des vannes pour la pressurisation donne une precision de 0,1 bar.
Concernant la précision sur la masse de CO_2, une variation de pression de 0,1 bar donne une incertitude inférieure à 3%. Concernant la précision sur le temps de décharge, une variation de 1 mL sur le remplissage donne une incertitude de ± 0,03 s, et une variation de pression de 0,1 bar donne une incertitude de ± 0,01 s. Chaque essai a été réalisé

entre 10 et 30 fois et compte tenu des résultats, l'incertitude de mesure sur le temps de décharge est de ± 0,1 s et sur la pression en fin de décharge est de ± 0,5 bar. Les essais sont donc répétables.

2.2 Imagerie par caméra rapide

2.2.1 Objectifs

L'objectif est de visualiser l'écoulement en amont de la buse et par la suite le spray, au cours d'une décharge. Les images enregistrées nous apporteront des informations complémentaires aux données acquises dans la bouteille de décharge, pour comprendre le phénomène d'atomisation effervescente. Pour cela, nous disposons d'une caméra haute cadence Phantom v2012. Cette caméra est équipée d'un capteur CMOS panoramique pouvant fonctionner à une fréquence maximale de 22 500 images par seconde à pleine résolution de 1280 par 800 pixels. Une caméra haute cadence est un outil de diagnostic qui permet d'analyser les processus ou les séquences d'images de grande vitesse. Ces images sont ensuite enregistrées directement sur une mémoire embarquée d'une capacité de 288 Go, et rejouées au ralenti, pour permettre à l'oeil humain de mesurer et comprendre les événements. Elle permet d'avoir un suivi temporel, en lien avec les mesures de pression et température dans la bouteille de décharge, pour la compréhension des phénomènes physiques intervenant au cours d'une décharge.

2.2.2 Caractéristiques de la caméra rapide Phantom v2012

Les performances d'une caméra rapide dépendent :

— Du capteur : il assure la transformation des signaux lumineux en signaux électriques. Il peut être CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor) ou CDD (Charged Coupled Device). Dans notre cas, la caméra v2012 possède un capteur CMOS, qui a l'avantage d'avoir une meilleure vitesse d'acquisition, d'être moins sensible à la poussière et présente une meilleure résistance à l'éblouissement et donc au rendu des hautes lumières et une dynamique plus étendue. Les capteur CMOS sont meilleurs que les capteurs CDD par leur vitesse d'acquisition malgré une qualité d'image plus faible, néanmoins on favorise la vitesse d'acquisition à la définition de l'image.

— De la résolution : elle détermine le nombre de points par unité de surface, exprimé en points par pouce. La résolution permet d'établir le rapport entre le nombre de pixels d'une image et la taille réelle de sa représentation sur un support physique.

Dans notre cas, la caméra v2012 possède une résolution de 1280 par 800 pixels.

— De la fréquence d'image : il s'agit de la fréquence d'un appareil à produire des images consécutives. Dans notre cas, la caméra offre une fréquence de 22 500 images par seconde (22 500 fps) à pleine résolution.

— De l'exposition : le temps d'exposition est le laps de temps durant lequel l'obturateur reste ouvert pendant la prise de vue. Le temps d'exposition a une influence directe sur la luminosité, la netteté de l'image et le bruit. Plus l'obturateur est ouvert longuement plus il laissera passer de la lumière et plus le sujet aura tendance à être flou. Le temps d'exposition dépend également beaucoup de la vitesse de déplacement du sujet. Dans notre cas, nous n'avons pas les mêmes temps d'exposition pour une visualisation de l'écoulement en amont de la buse (10 μs) et pour une visualisation du spray (1 μs), les vitesses étant différentes. Malgré des réglages optimum, la caméra ne permet pas de suivre la dynamique du spray.

— De l'enregistrement (et ralenti) : le but d'une caméra rapide est d'obtenir un ralenti d'un événement trop rapide pour l'oeil humain et de pouvoir l'analyser. Pour le ralenti, il faut diviser la fréquence d'enregistrement par la fréquence de l'oeil humain (inférieure à 30 images par seconde). La caméra possède une mémoire embarquée de 288 Giga octet et une interface Gigabit Ethernet permet de transférer les images de la caméra à l'ordinateur.

Les réglages de la caméra sont fixés en fonction de ce que l'on observe : l'écoulement en amont de la buse ou le spray. Et la mise au point est réalisée manuellement.

2.2.3 Rétro-éclairage Backlight haute-cadence

Une source en rétro-éclairage avec un Backlight haute-cadence, représentée Figure 2.7, est utilisée pour visualiser l'écoulement à travers le tube et le spray. Le rétro-éclairage consiste à placer l'écoulement que l'on souhaite étudier entre la source lumineuse et la caméra. Ce type d'éclairage par transmittance est équipé d'un panneau à LED 10x10 cm devant lequel un verre dépoli est placé afin d'homogénéiser et uniformiser la distribution d'intensité de la lumière. Son fonctionnement est synchronisé avec la caméra rapide sur une fréquence de 10 kHz, avec un temps d'exposition fixe, qui permet de ne pas exposer directement la caméra à une lumière intense.

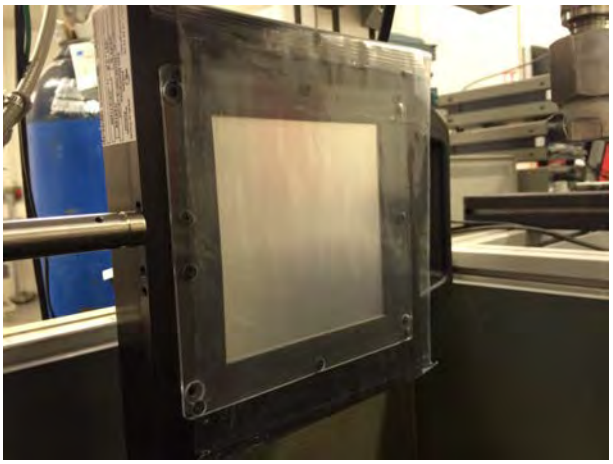


FIGURE 2.7 – Photographie du rétro-éclairage Backlight utilisé.

2.3 Mesure des tailles de gouttes dans le spray par granulométrie à diffraction laser

2.3.1 Objectifs

L'analyse des performances d'un système d'atomisation nécessite la connaissance de la taille des gouttes du spray en sortie de buse qu'il est capable de produire. Un granulomètre à diffraction laser modèle Spraytec de Malvern Instruments était à notre disposition pour notre étude. Ce diagnostic permet les mesures de granulométrie et de concentration en particules dans le spray. L'objectif est de quantifier l'impact des gaz dissous sur les tailles de gouttes dans le spray en sortie de buse. Des décharges à l'eau et au Novec1230™ pressurisés à l'azote uniquement ont été réalisées. Le dioxyde de carbone n'a pas été utilisé car nous avons rencontré des difficultés de mesure des tailles de gouttes dès les premières décharges à l'azote. Des essais complémentaires ont été mis en place (utilisation d'un atomiseur à ultrasons, mise en place d'une enceinte saturée en vapeur de Novec1230™, utilisation d'une sonde optique) pour comprendre l'origine de ces perturbations.

2.3.2 Principe de fonctionnement du Spraytec

Le Spraytec de Malvern utilise la technique de la diffraction laser pour mesurer les tailles de gouttes en sortie de système. Cette technique consiste à mesurer l'intensité de la lumière diffusée lors du passage d'un faisceau laser à travers le spray. Les données sont ensuite analysées afin de calculer la taille des gouttes qui a créé l'image de diffraction. Ce diagnostic est composé de :

— Un module émetteur qui contient la source de lumière laser collimaté servant à éclairer le spray pendant la mesure.

— Un module récepteur qui contient l'une des deux lentilles (300 mm ou 750 mm) qui concentre toute la lumière diffusée par le spray sur une série de détecteurs. Ces détecteurs mesurent avec précision l'intensité de la lumière diffusée par les gouttes sur une plage d'angles étendue.

— Un banc optique qui assure que l'émetteur et le récepteur sont alignés.

— Un logiciel Spraytec qui commande le système pendant la mesure et analyse les données de diffusion pour calculer les distributions de taille des particules. Les résultats s'affichent sous la forme d'un historique des tailles qui permet de détecter immédiatement n'importe quel changement de taille des gouttes dans le temps.

La Figure 2.8 représente le schéma du système Spraytec avec les éléments principaux numérotés qui composent les modules émetteur et récepteur. Un système sur poulies permet de basculer le banc Spraytec à 90° pour une installation non intrusive sur notre banc de décharge. Le Tableau 2.8 présente les caractéristiques du Spraytec de Malvern.



FIGURE 2.8 – Schéma du Spraytec de Malvern : 1. La source laser HeNe ; 2. Optique collimatée ; 3. Zone de mesure ; 4. Optique de Fourier (lentille de 300 mm ou 750 mm) ; 5. Série de détecteurs photodiodes ; 6. Système d'acquisition de données rapide. Source : Malvern Instruments.

*Dv50 signifie que 50% du volume du spray (ou 50% du nombre total de particules) sont des gouttes dont le diamètre est inférieur ou égal au Dv50 (cf. Chapitre 1).

Principe	Diffraction laser
Plage de mesure	0,1 à 2 000 microns
Modèles optique	Théorie de Mie et de Fraunhofer
Lentille 300 mm	0,1 à 900 microns soit Dv50* = 0,5 - 600 microns
Lentille 750 mm	2,0 à 2 000 microns soit Dv50* = 5 - 1600 microns
Plage de concentration	Transmission minimum acceptable : 5%
Système de détection	Une plage de 36 détecteurs photodiode espacés de façon logarithmique
Source lumineuse	Laser Helium-Neon de 4 mW de longueur d'onde 632,8 nm
Système d'alignement optique	Alignement automatique rapide
Fréquence d'acquisition max.	Mode continu : 1 Hz, Mode rapide : 10 kHz
Précision	+/- 1%

TABLE 2.8 – Caractéristiques du Spraytec de Malvern.

Le module émetteur génère un faisceau laser monochromatique parallèle de longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm, de 10 mm de diamètre. Le module récepteur est composé de photodiodes qui permettent de mesurer le spectre de diffraction qui sera ensuite analysé. Les gouttes éclairées par un faisceau laser dévient la lumière de son axe d'émission. Chaque goutte rencontrée par le laser diffracte les rayons lumineux selon un angle inversement proportionnel à sa taille. Les gouttes de grosses tailles vont dévier une quantité importante de lumière selon un angle faible alors que les petites gouttes vont dévier peu de lumière mais selon des angles beaucoup plus grands. Le principe de mesure de ce diagnostic repose sur la théorie de Mie et l'approximation de Fraunhofer.

L'approximation de Fraunhofer permet de démontrer qu'une goutte éclairée par un faisceau parallèle monochromatique génère une figure de diffraction sous forme de franges concentriques alternativement claires et sombres. La distribution spatiale des franges est fonction du rayon de la goutte. Cette théorie suppose que la lumière est totalement occultée par la goutte. Or la taille de la goutte se rapproche de la longueur d'onde du faisceau incident, l'onde lumineuse va donc traverser la goutte et il va apparaître d'autres phénomènes optiques (réflexion, réfraction) et la théorie de Fraunhofer va atteindre ses limites. La Figure 2.9 représente le schéma de principe de la diffusion de la lumière par une particule. La théorie de Mie est le modèle général qui prédit la manière dont la lumière sera diffusée en fonction de la taille de la particule, de ses propriétés optiques et de la nature du milieu environnant. Cette théorie prend en compte l'in-

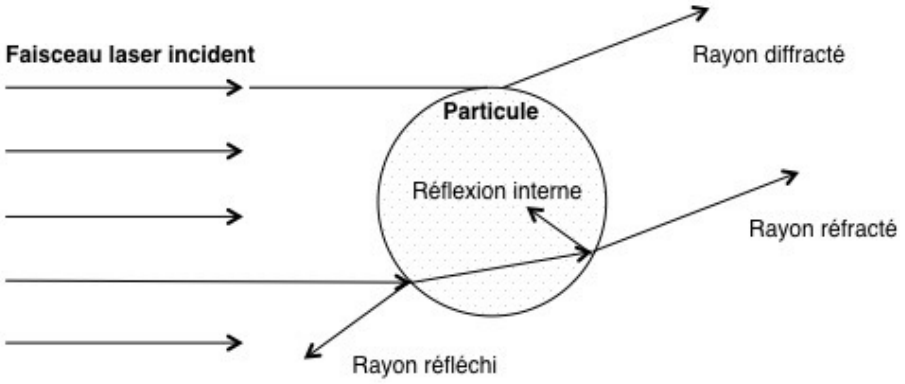


FIGURE 2.9 – Schéma de principe de la diffusion de la lumière par une particule.

tégralité des phénomènes optiques qui interviennent lors de l'interaction d'un faisceau laser et d'une particule. La théorie de Fraunhofer est une simplification de la théorie de Mie qui ne tient compte que de la partie diffractée de la lumière. Toutes les théories générales de diffusion font l'hypothèse que toutes les particules sont sphériques.

2.3.3 Résultats obtenus et difficultés rencontrées

Lors d'une analyse il faut préciser l'indice de réfraction de la particule (donc du liquide utilisé) et l'indice de réfraction du milieu environnant. Les résultats de mesure des tailles des gouttes sont présentés sous la forme d'une fonction de distribution de probabilité statistique, décrivant la fréquence d'apparition d'une goutte de taille donnée. La Figure 2.10 représente un histogramme du signal de transmission (intensité du laser) en fonction de chaque détecteur, pour une décharge de Novec1230$^{\text{TM}}$ pressurisé à 25 bar d'azote. Normalement le type de graphique obtenu de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur donne un graphique comme celui représenté sur la Figure 2.11. On observe donc que la mesure est perturbée. Les données brutes du capteur sont saturées par un signal aux faibles déviations (gouttes ayant les tailles les plus importantes) qui correspondent aux premiers détecteurs sur le graphique.

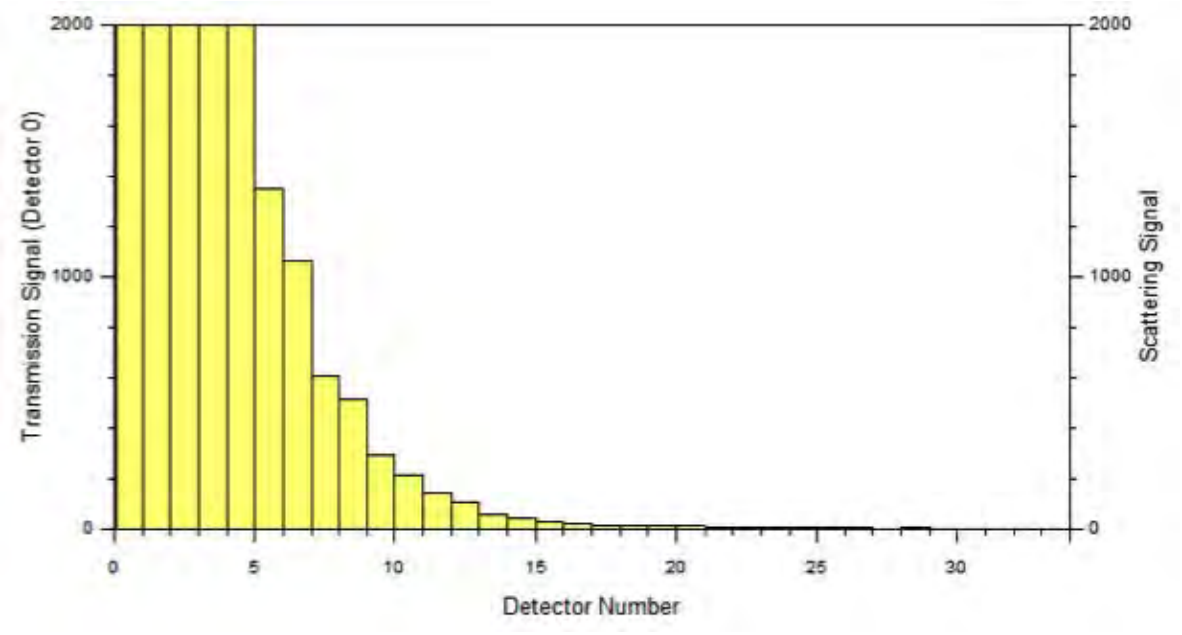


FIGURE 2.10 – Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 25 bar d'azote.

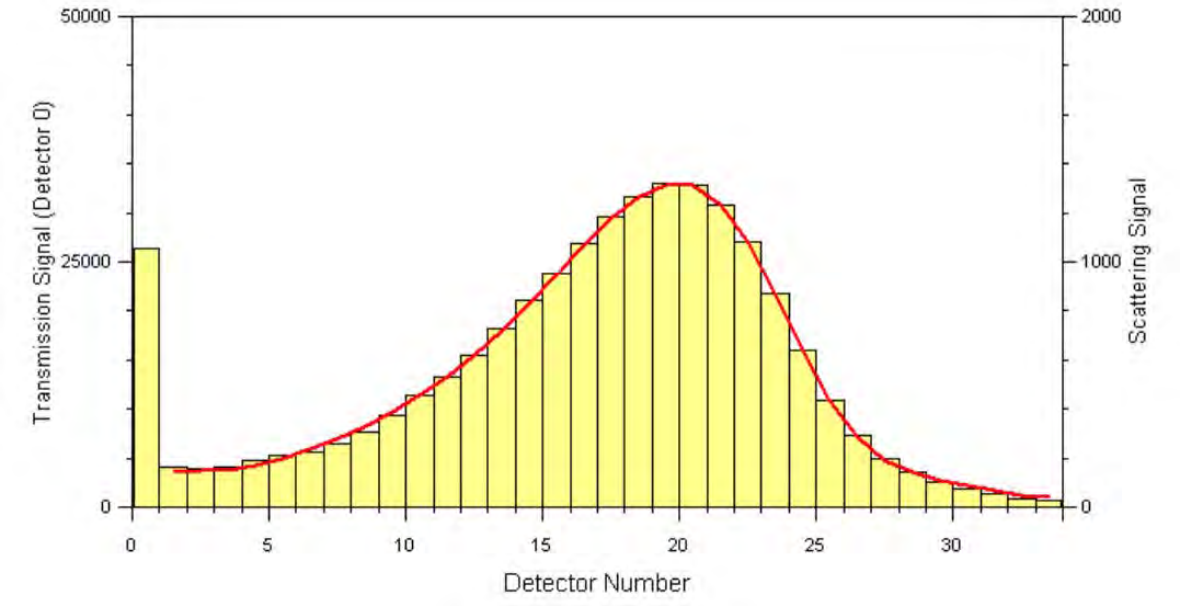


FIGURE 2.11 – Graphique type de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur.

La Figure 2.12 représente un histogramme où chaque largeur de barre correspond à une plage de tailles des particules en micromètre et sa hauteur représente le pourcentage du spray qui se situe dans cette plage, pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 25 bar d'azote. Normalement le type de graphique représentant la distribution des tailles

des particules donne un graphique comme celui représenté sur la Figure 2.13.

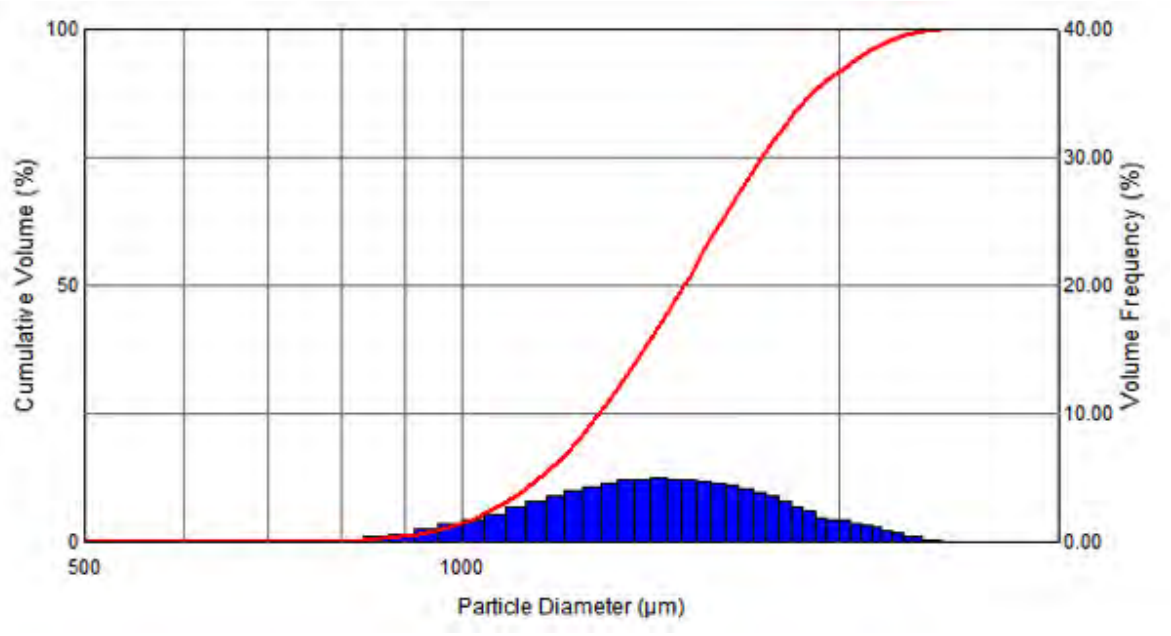


FIGURE 2.12 – Graphique de la distribution des tailles des particules pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 25 bar d'azote. La ligne rouge représente la répartition "pourcentage de volume plus petit que".

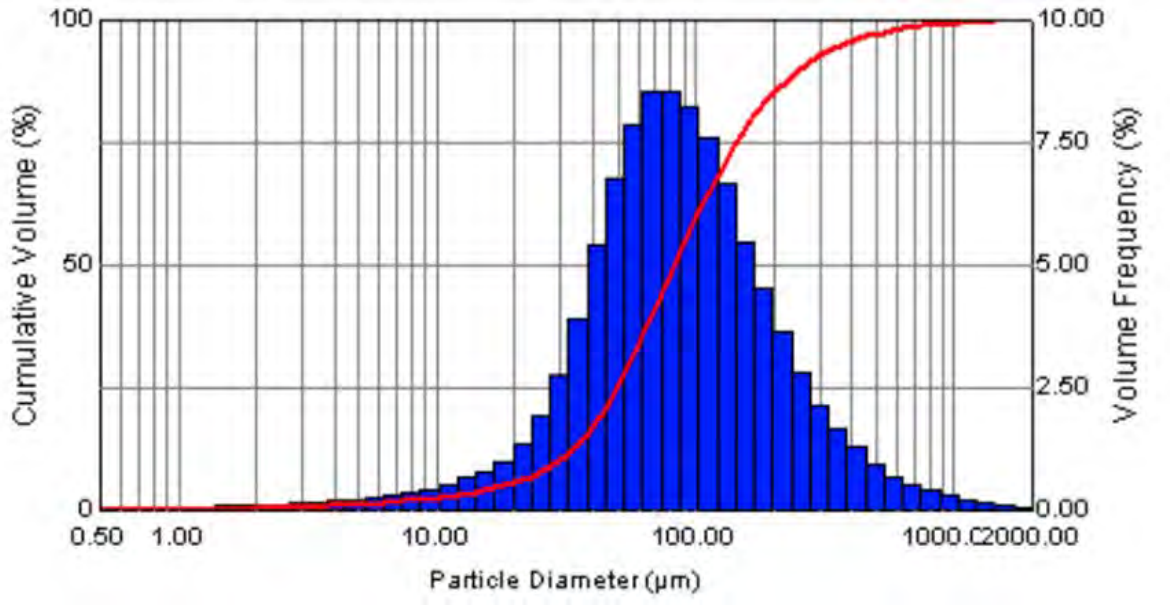


FIGURE 2.13 – Graphique type de la distribution des tailles des particules.

Plusieurs hypothèses sont émises pour justifier ces difficultés de mesure :

— Le spray est trop dense.
— La vitesse des gouttes est trop rapide.
— La présence du gaz (azote) perturbe la mesure.

Pour analyser un spray il faut préciser l'indice de réfraction du liquide et du milieu environnant, dans notre cas il s'agit de l'air. Or, notre liquide est propulsé par de l'azote. La présence de l'azote lors d'une décharge viendrait donc perturber les mesures. Lorsqu'un volume significatif de gaz propulsif ou de phase vapeur, en dehors de l'air, est présent dans la zone de mesure, on peut être confronter à l'effet "beam steering". Lorsque le Spraytec est installé, le système est aligné avec l'air présent dans la zone de mesure, or le gaz (tel que le gaz propulsif) a un indice de réfraction significativement différent de celui de l'air. Cette différence d'indice de réfraction cause la défocalisation du laser lors d'une mesure, menant à des signaux élevés sur les premiers détecteurs, comme observé sur la Figure 2.10. Mais le système d'analyse n'interprète pas ces signaux comme étant le résultat de la dispersion des particules. Le système l'interprète comme la présence de grosses particules. Il est possible de supprimer de l'analyse les détecteurs correspondant à ces signaux affectés par le "beam steering". Cela permet de réduire la taille de la plage d'analyse pour que les grosses particules ne soient pas détectées néanmoins on perd une partie des résultats.

Pour écarter les effets de densité du spray, de la vitesse des gouttes et réduire l'effet du "beam steering", nous décidons de mettre en place un spray simple à l'aide d'un atomiseur à ultrasons Sonaer, représenté Figure 2.14 dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.9. L'objectif est de tester successivement l'eau et le Novec1230^{TM}purs dans un spray calibré avec des vitesses de gouttes quasi-nulles. Le

Écoulement	Radial
Fréquence	20 - 130 kHz
Débit	0 - 0,3 gal/h soit 1,13 L/h
Diamètre de gouttes	11,8 μm

TABLE 2.9 – Caractéristiques de l'atomiseur à ultrasons Sonaer.

liquide entre par l'arrière de la sonde composée de céramiques piézoélectriques. Sans utiliser de pression d'air, le liquide est pompé au travers du centre de la sonde et traverse la sonde jusqu'à la pointe vibrante où il est mécaniquement pulvérisé en fines particules. L'atomiseur est alimenté par un générateur piezo-ultrasonique SONOZAP. C'est un générateur digital d'ultrasons qui permet le contrôle d'amplitude variable pour l'ajustement des vibrations de la pointe à ultrasons (fréquence). La Figure 2.15 présente

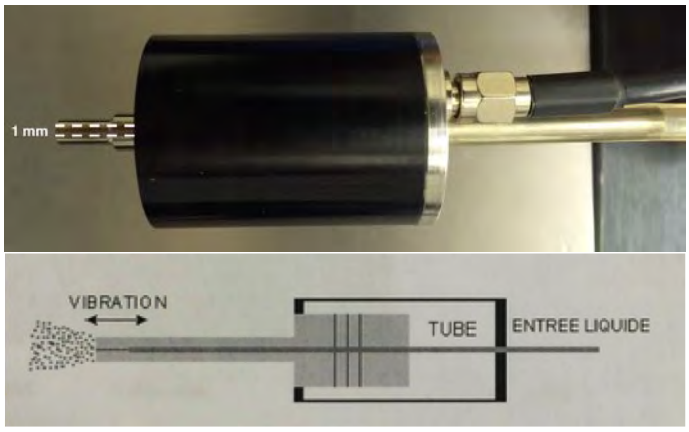


FIGURE 2.14 – En haut : Photographie de l'atomiseur à ultrasons Sonaer. En bas : Schéma de principe de l'atomiseur à ultrasons. Source : Sonaer.

les résultats de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray à l'eau. La mesure des tailles de gouttes est réalisée et nous obtenons le type de graphique que nous espérions.

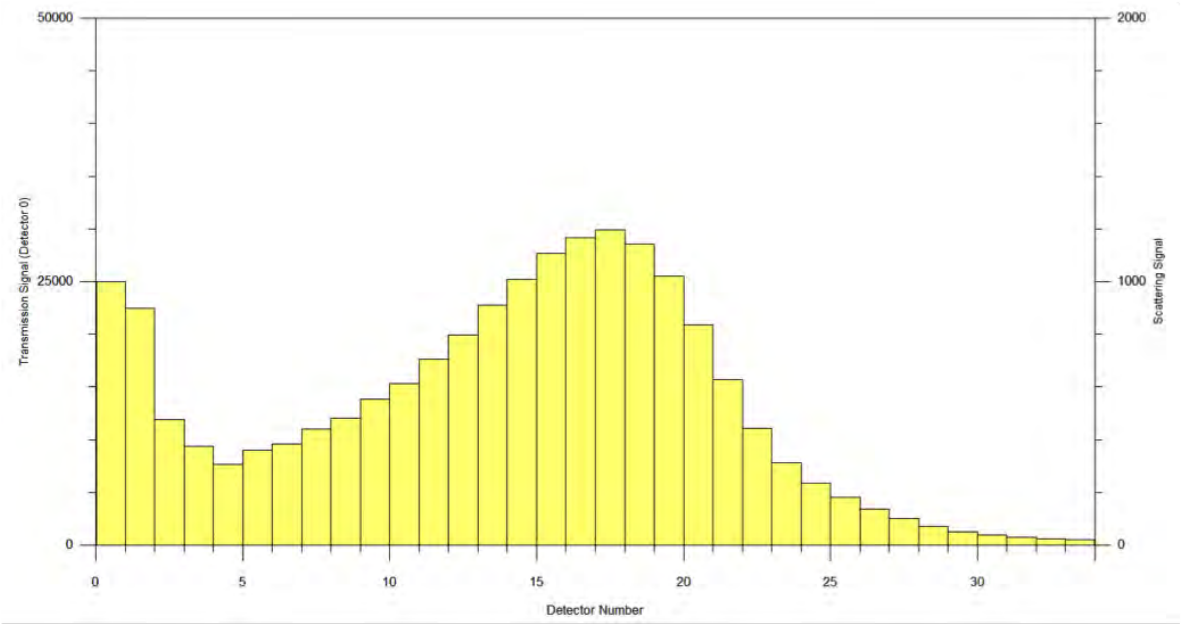


FIGURE 2.15 – Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray d'eau avec l'atomiseur à ultrasons Sonaer.

La Figure 2.16 présente les résultats de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray de Novec1230^{TM}. Nous obtenons le même type de courbe obtenu sur notre banc de décharge. Les hypothèses évoquées précédemment (effet de la densité

du spray, vitesse des gouttes et présence de gaz) sont écartées. Les difficultés de mesure des tailles des gouttes interviennent lors de spray au Novec1230™. Le Novec1230™ a un point d'ébullition ébullition élevé (+49,2°C), il s'évapore en conditions ambiante. Son gradient de vapeur varie donc également au cours d'un spray.

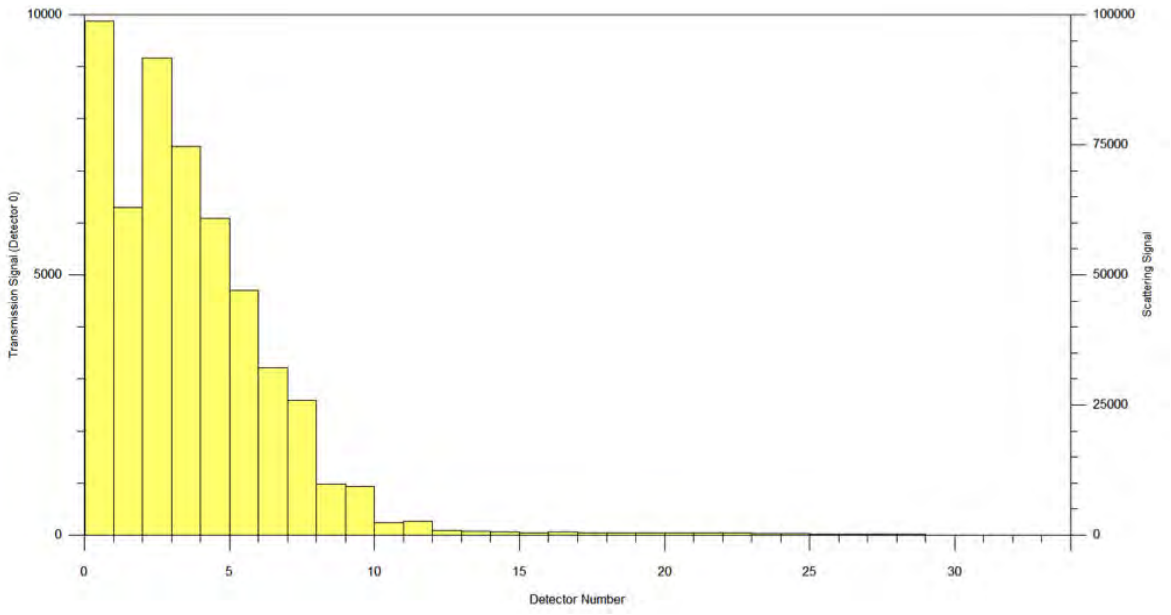


FIGURE 2.16 – Graphique de la lumière dispersée reçue par chaque détecteur pour un spray de Novec1230™ avec l'atomiseur à ultrasons Sonaer.

Un schéma explicatif est représenté Figure 2.17. Le laser est donc dévié, non pas par la diffraction, qui est le principe de mesure, mais par la réfraction causée par la variation de gradient de vapeur du Novec1230™ dans le spray. Des tests supplémentaires sont mis en place pour confirmer que ces difficultés de mesure sont dû à la variation du gradient de vapeur du Novec1230™ au cours d'un spray.

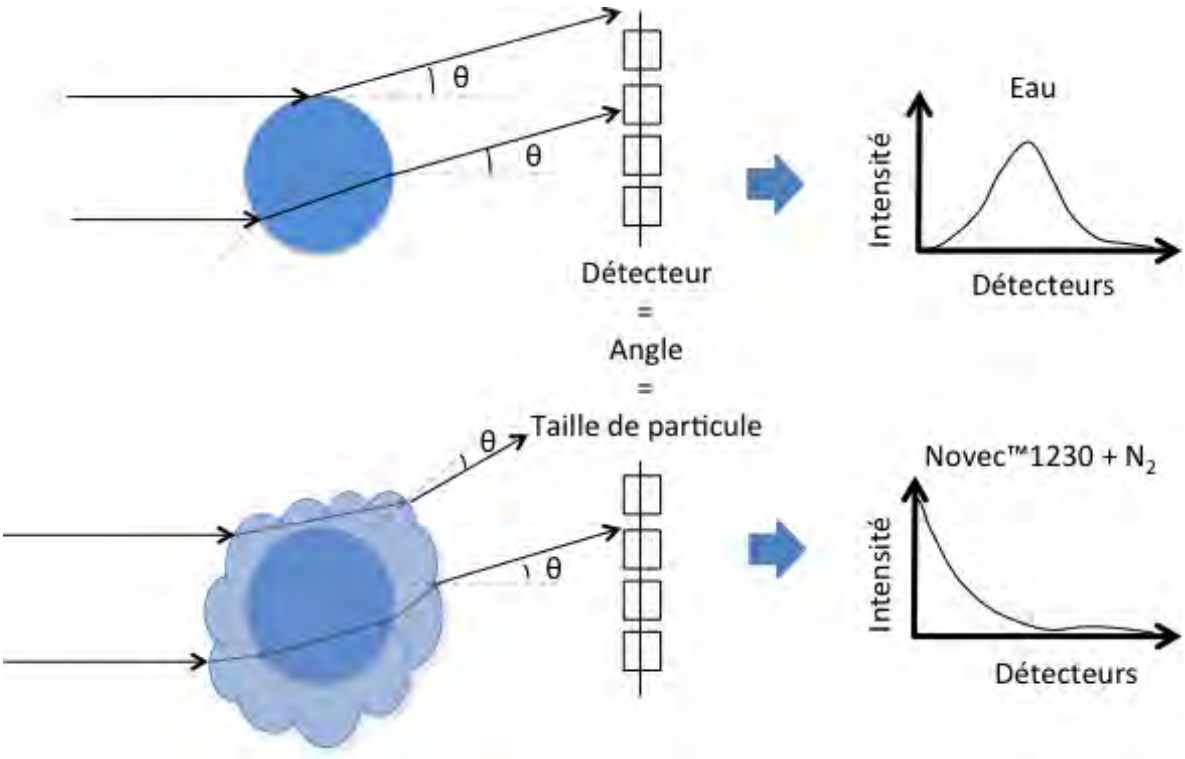


FIGURE 2.17 – Schéma explicatif de l'effet de variation du gradient de vapeur du Novec1230™ lors d'un spray.

Une enceinte étanche a été conçue pour réduire l'évaporation du Novec1230™ (cf. Figure 2.18). Elle est composée de deux vitres pour permettre la visualisation du spray à l'aide d'une caméra. Le principe est de venir insérer l'atomiseur à ultrasons au dessus de l'enceinte, faire un spray continu de Novec1230™ pour créer une "piscine" de Novec1230™ au fond de l'enceinte afin de la saturer en vapeur de Novec1230™ puis d'observer le spray à l'aide d'une caméra. Les images du spray avec et sans l'enceinte transparente sont présentées Figure 2.19. On observe que les images ne montrent pas de différences flagrantes entre les deux configurations, et les mesures de granulométrie ne sont également pas concluante. Un refroidissement du Novec1230™ permettrait également de réduire son évaporation, mais malgré toutes les précautions prises il y a un risque que les mesures ne fonctionnent pas.

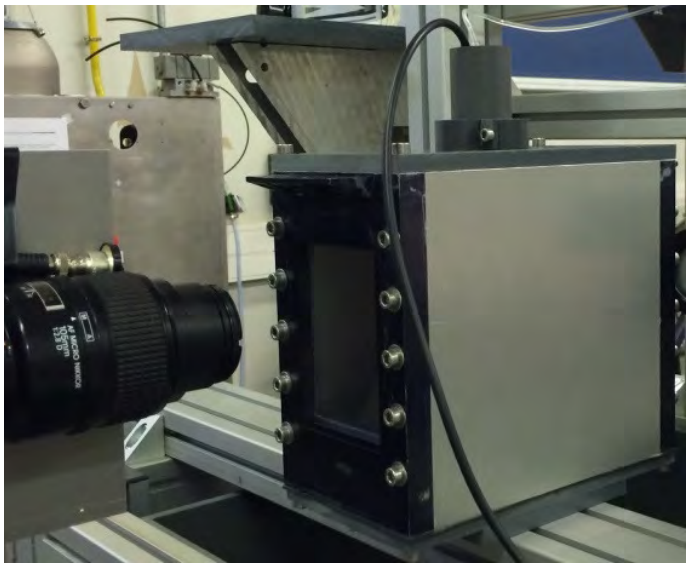


FIGURE 2.18 – Photographie de l'enceinte saturée.

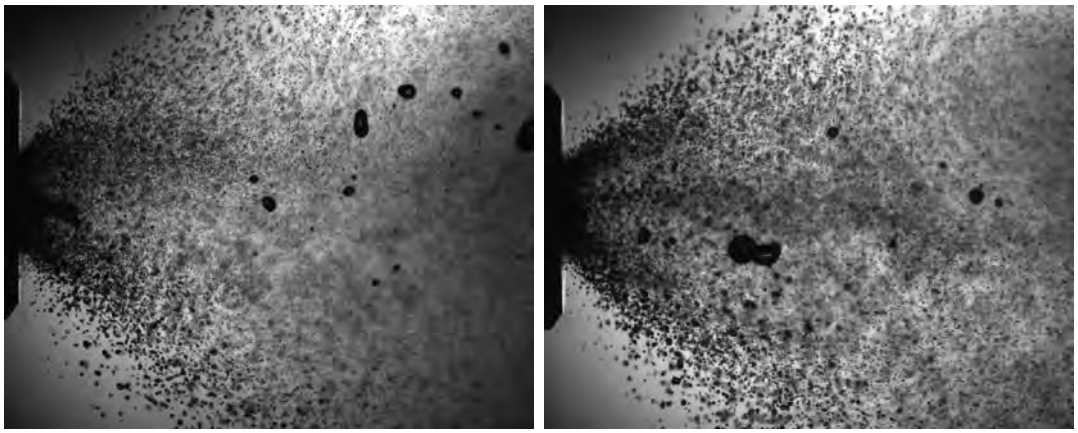


FIGURE 2.19 – À gauche : image du spray sans l'enceinte étanche. À droite : image du spray à l'intérieur de l'enceinte étanche.

Un autre diagnostic a été également testé avec l'atomiseur à ultrasons. Il s'agit d'une sonde optique S-POP de A2 Photonic Sensors. Le système a été testé successivement sur un spray d'eau puis de Novec1230^{TM}. Le principe est de venir mesurer simultanément les tailles de gouttes et leur vitesse. Cette technologie intrusive est basée sur l'exploitation de la lumière réfléchie en tête de sonde due à la différence d'indice optique entre la silice de la fibre ($n_{silice} = 1,5$) et le milieu environnant ($n_{air} = 1$). Un schéma et une photographie de l'installation de la sonde optique sont présentés Figure 2.20.

Le principe de mesure repose sur l'exploitation de la transition liquide/gaz correspondant au temps de montée du signal. Ce temps de montée correspond au temps de

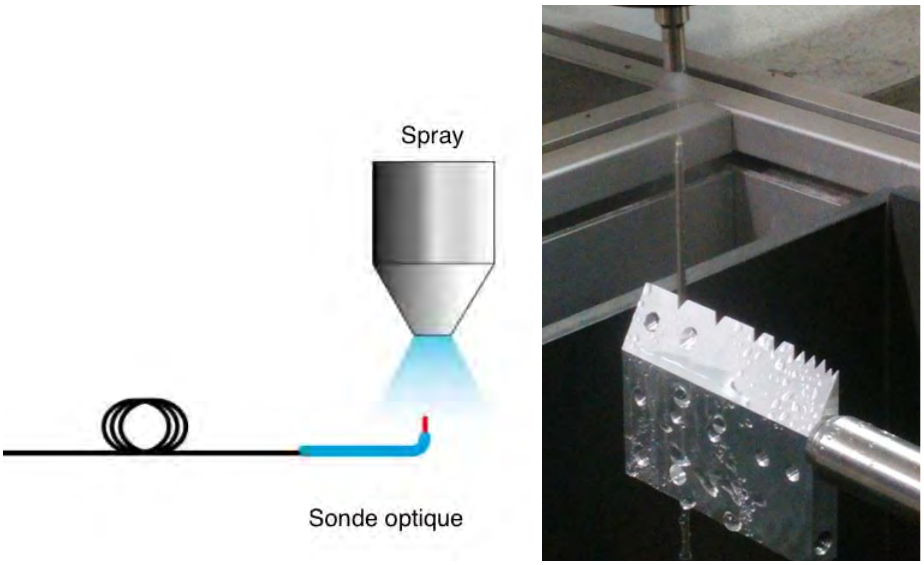


FIGURE 2.20 – À gauche : Schéma de l'installation de la sonde optique. À droite : Photographie de l'installation de la sonde optique avec l'atomiseur à ultrasons.

propagation de l'interface liquide/gaz le long de la partie de la sonde. Cette partie sensible a une longueur $L_s = 25{,}9$ μm, qui est déterminée par une phase de calibration très complète lors de la fabrication de la sonde. À partir de cette distance L_s et de la mesure du temps de montée T_m, on en déduit facilement la vitesse de l'interface et donc de l'inclusion de la goutte, grâce à l'équation $V = L_s/T_m$. Le Schéma 2.21 présente le principe de mesure de la sonde optique lorsqu'elle rencontre une goutte.

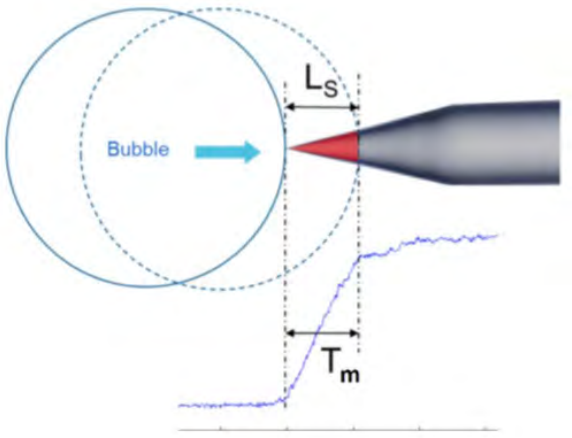


FIGURE 2.21 – Schéma du principe de mesure de la sonde optique.

La mesure de corde C s'effectue dans un deuxième temps à partir de la vitesse mesurée selon le principe décrit sur la Figure 2.22 et du temps de résidence T_r de la sonde dans l'intrusion via l'équation $C = T_r\, V$, c'est à dire la durée des créneaux qui forment

les signatures d'inclusions. Plus précisément, l'analyse des signaux a pour objectif d'in-

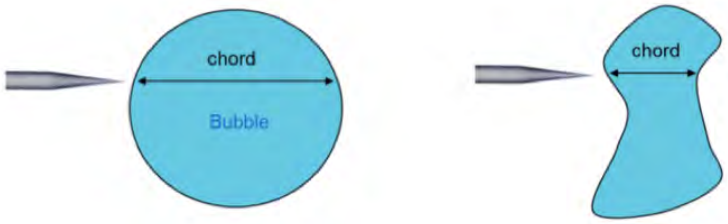


FIGURE 2.22 – Principe de mesure de corde avec la sonde optique.

tensifier les points caractéristiques suivants que l'on retrouve sur la Figure 2.23 :

— Point A : entrée dans la goutte
— Point B : sortie de la goutte
— Point C et D : points caractéristiques de la zone quasi-linéaire du front de montée.

Les signatures d'inclusions sont classées en 3 catégories, notées types 1, 2 et 3.

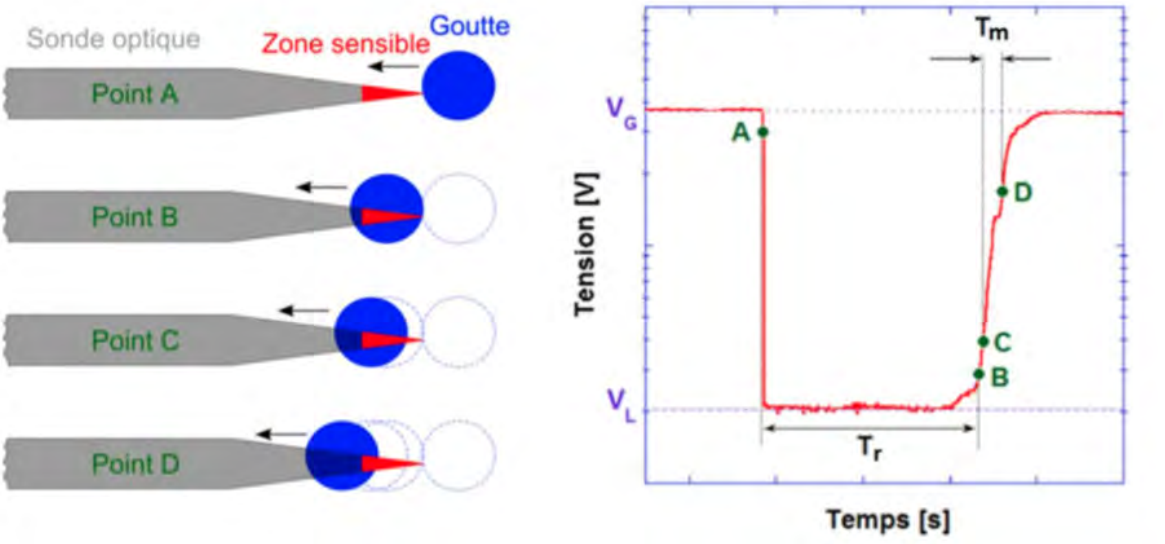


FIGURE 2.23 – Schéma explicatif de l'analyse des signaux enregistrés par la sonde optique.

— Les types 1 correspondent au cas où la partie sensible de la sonde a été complètement immergée dans la goutte.

— Les types 2 et 3 correspondent au mouillage, partiel de la sonde, soit parce que le perçage est trop excentré, soit parce qu'il s'agit d'une goutte extrêmement petite (< 15 μm). Néanmoins, les types 2 présentent une amplitude suffisamment importante pour que la mesure de vitesse reste valide.

— Les types 3 ne sont pris en compte que pour la mesure de concentration liquide et du flux (en nombre de gouttes).

Pour la qualité d'une analyse de spray, il est donc important d'avoir majoritairement des types 1 et 2. L'expérience avec l'atomiseur à ultrasons a consisté à réaliser une acquisition de 30 secondes sur un spray d'eau puis 30 secondes sur un spray de Novec1230™. La sonde a été placée à l'aplomb de l'atomiseur, à une distance de quelques centimètres. Le Tableau 2.10 présentent les principaux résultats obtenus de l'analyse. D'après les ré-

Mesures	Eau	Novec1230™
Durée d'acquisition [s]	30	30
Nbre de gouttes valides	33 879	7 553
Taux de gouttes de type 1	1%	4%
Taux de gouttes de type 2	70%	10 %
Taux de gouttes de type 3	29%	86%
Fraction de liquide	0,48%	1,35%
Vitesse moyenne [m/s]	5,7	0,53
Corde moyenne [μm]	17,31	12,77
Diamètre de Sauter (SMD) [μm]	25,96	19,16

TABLE 2.10 – Résultats obtenus de l'analyse des sprays d'eau et de Novec1230™produit par l'atomiseur à ultrasons.

sultats, on peut constater que, dans les 2 cas, le système de mesure par sonde optique est très proche de sa limite d'utilisation. En effet, le nombre de gouttes de type 1, c'est à dire correctement percées par la sonde, est très faible. De plus, dans le cas du Novec1230™, le nombre de gouttes de type 2, c'est à dire "incorrectement" percées mais permettant quand même la mesure de vitesse et de taille, est aussi très faible. Néanmoins, les résultats de vitesse et de taille semblent malgré tout demeurer cohérents et réalistes. La qualité des résultats est essentiellement liée au fait que les tailles et vitesses en jeu sont relativement faibles et d'autres paramètres peuvent également rentrer en compte, comme la difficulté d'aligner la sonde avec le spray.

2.3.4 Conclusion

La mesure des tailles des gouttes dans le spray n'a pas abouti. Néanmoins la réalisation d'essais complémentaires (utilisation d'un atomiseur à ultrasons, mise en place d'une enceinte saturée en vapeur de Novec1230^{TM}, utilisation d'une sonde optique) ont permis de mettre en évidence l'origine des perturbations observées. Le Spraytec de Malvern nécessite l'indice de réfraction du liquide et du milieu environnant pour l'analyse des résultats. Cette condition limite l'utilisation du Spraytec sur notre banc d'essais et le premier facteur perturbateur rencontré est le *beam steering*. Ce phénomène s'observe lorsque la présence d'un gaz (ici l'azote) autre que l'air environnant est fortement présent dans la zone de mesure. L'autre facteur, prédominant dans notre cas et qui nous empêche d'utiliser le Spraytec est la variation du gradient de vapeur du Novec1230^{TM}lors d'un spray. Le Novec1230^{TM}s'évapore au cours d'une décharge et sa variation de gradient de vapeur provoque la défocalisation du laser du granulomètre. La mise en place de nouveaux diagnostics pour la détermination des tailles de gouttes n'a pas été possible dans les délais de la thèse. Cependant, les images obtenues en amont de la buse en corrélation avec la littérature nous ont permis de mettre en évidence l'influence des gaz dissous sur le processus d'atomisation (ouverture du cône du spray, tailles des gouttes) [1, 33, 34]. Nous nous sommes donc focalisés sur l'étude de l'influence des conditions initiales et donc des propriétés thermodynamiques du système dans notre bouteille de décharge sur le processus d'atomisation.

2.4 Automatisation du banc expérimental via LabVIEW

L'objectif est d'automatiser notre banc d'essais, en pilotant les éléments qui le composent. L'environnement de programmation LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) gère la commande, la synchronisation de système et l'acquisition de données. C'est un logiciel qui utilise un langage de programmation essentiellement graphique dédié au contrôle, à l'acquisition, à l'analyse et à la présentation de données. A l'inverse des langages de programmation textuelle, le code environnement LabVIEW est écrit dans un format de diagramme de bloc, selon une logique de flux de données. Cela facilite la création et le dépannage des logiciels qui se présentent sous la forme d'instruments virtuels, en réduisant de manière significative le temps nécessaire pour le développement de ces programmes. LabVIEW est dédié à la programmation conçue pour le pilotage d'instruments électroniques en construisant graphiquement des modules logiciels appelés des "VI" ("Virtual Instrument"). Son principe de programmation est basé sur l'assemblage graphique de modules logiciels VI. Le rôle d'un VI est d'acquérir des données issues par exemple de fichiers, ou de cartes électroniques d'Entrée/Sortie, de les analyser et de les présenter au travers d'interfaces hommes-machines graphiques (appelées aussi "face-avant", par analogie avec la face-avant permettant de piloter un appareil électronique).

2.4.1 Le système CompactDAQ

Un système CompactDAQ est un hardware d'acquisition de données qui intègre la connectivité et le conditionnement des signaux sur des Entrées/Sorties modulaires pour interfacer directement avec n'importe quel capteur ou signal. Notre système CompactDAQ est composé :

— D'un châssis CompactDAQ pour contrôler le cadencement, la synchronisation et le transfert de données. Un seul châssis peut gérer plusieurs moteurs de cadencement, afin d'exécuter plusieurs tâches d'Entrée/Sortie à cadencement matériel, à différentes fréquences d'échantillonnage dans le même système. Nous disposons dans notre cas, d'un chassis USB NI cDAQ-9178 destiné aux systèmes de tests de mesures de signaux mixtes. Il intègre quatre compteurs/timers 32 bits d'usage général avec une fréquence de cadencement pouvant aller jusqu'à 1 MHz.

— De modules Entrées/Sorties : Les modules fournissent des mesures pour les applications avancées d'acquisition de données. Chaque module comprend un conditionnement de signaux spécifique à chaque type de mesure pour se connecter à un ensemble de capteurs et signaux, ainsi que des options d'isolation entre les voies et par groupes de voies. Dans notre cas, nous avons un module d'entrée NI 9211 pour le thermocouple, un module d'entrée analogique NI 9239 pour le capteur de pression et un module de sortie analogique NI 9263 pour le pilotage de l'électrovanne et l'imagerie.

2.4.2 Système de synchronisation et acquisition des données expérimentales

L'objectif est de pouvoir synchroniser l'ouverture de l'électrovanne, l'enregistrement de la caméra rapide, et l'acquisition des données de pression et température dans notre bouteille de décharge, au cours d'une décharge. Il est donc nécessaire de créer une interface permettant de piloter ces différents éléments. La mise en place de ce système facilite l'interprétation et la compréhension des évènements lors d'une décharge grâce à la coordination des données acquises avec l'imagerie. Un schéma simplifié du système de synchronisation et d'acquisition de données est représenté Figure 2.24. Les GBF (Générateur de Basses Fréquences) servent de générateurs de délais pour la synchronisation des éléments. Un GBF permet de délivrer un signal avec la fréquence désirée et peut-être observé grâce à un oscilloscope en effectuant un simple montage électrique, ce qui permet de vérifier la synchronisation des différents signaux générés. L'acquisition des données consiste à recueillir les signaux des sources de mesure et à les numériser pour les stocker. L'acquisition de données commence par le phénomène physique à mesurer, dans notre cas il s'agit de la température et de la pression. Pour la synchronisation, des boucles cadencées sont utilisées : une pour l'acquisition de la température et de la

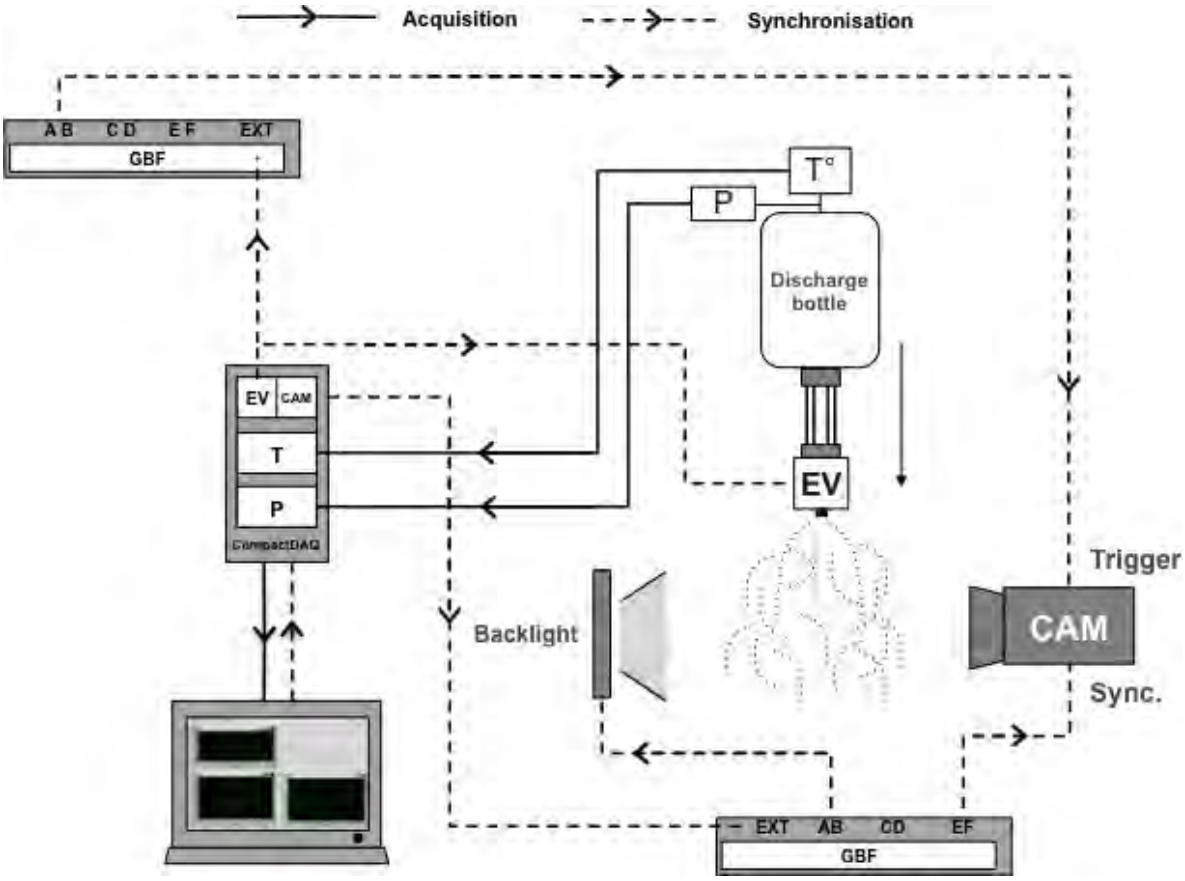


FIGURE 2.24 – Schéma du système de synchronisation et d'acquisition des données LabVIEW.

pression, et une pour la génération des signaux de l'électrovanne et de la caméra. L'exécution de ces boucles cadencées est contrôlée par des sources de cadencement externes telles que la fréquence constante imposée, l'exécution sur front montant des signaux numériques etc... La Figure 2.25 représente les deux boucles cadencées.

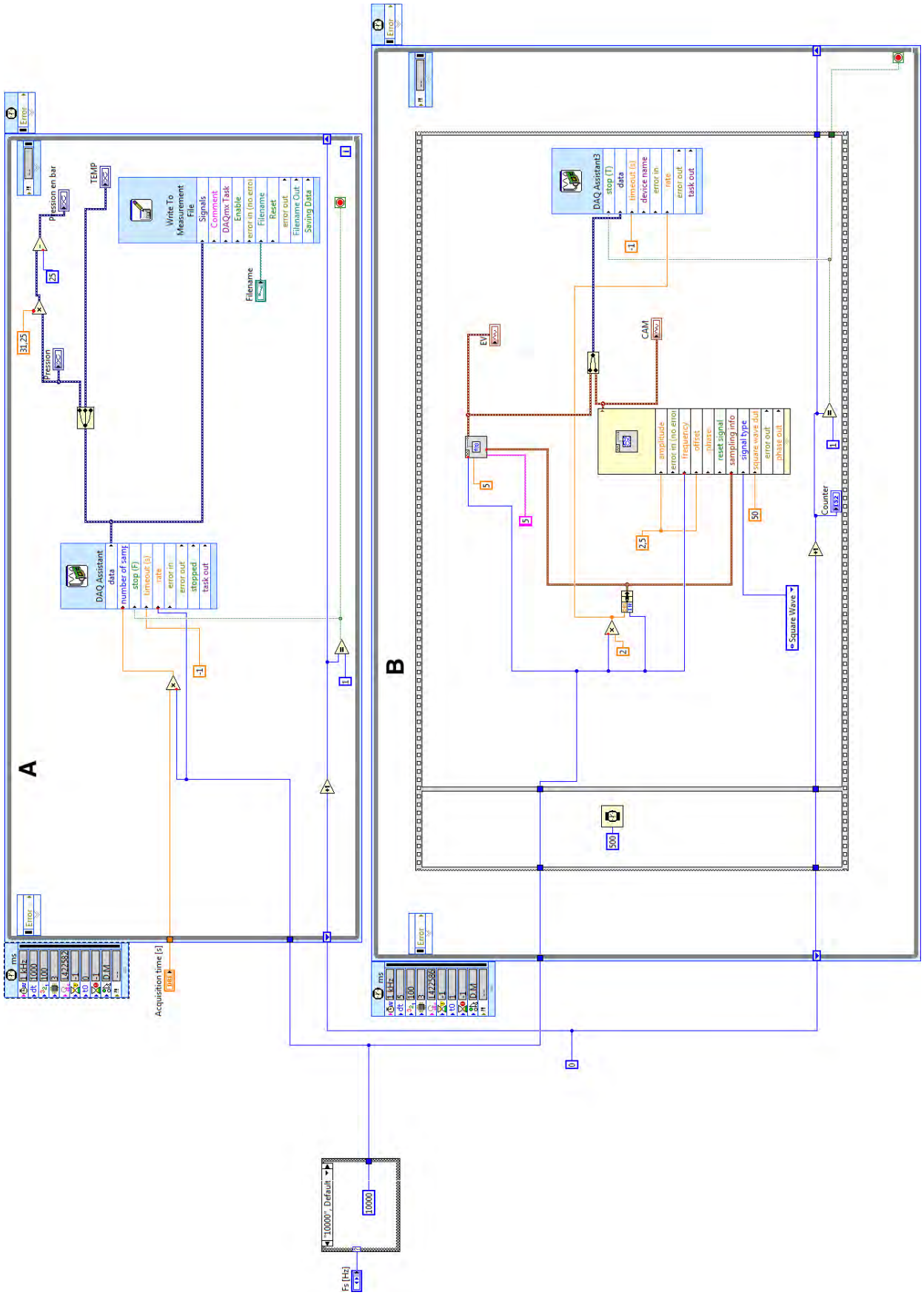


FIGURE 2.25 – Structures des boucles cadencées.

La boucle A correspond à l'acquisition de la température et de la pression dans la

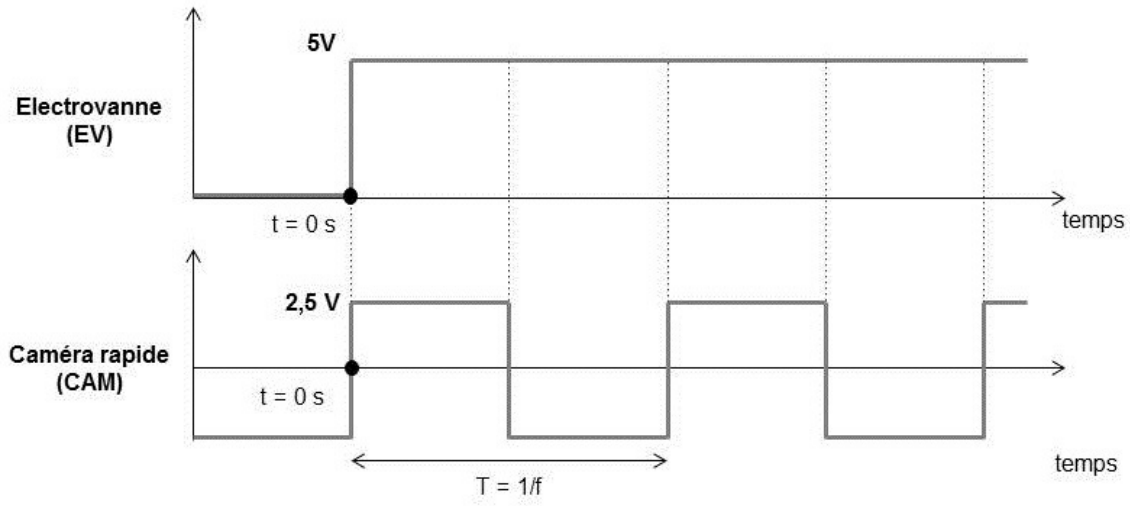


FIGURE 2.26 – Principe de synchronisation des signaux générés.

bouteille de décharge. La durée d'acquisition t_s est imposée, et dépend directement de la fréquence d'échantillonnage f_s et donc du nombre d'échantillons N_s avec la relation : $t_s = N_s/2f_s$. C'est cette même durée d'acquisition qui pilote la durée durant laquelle l'électrovanne reste ouverte, et donc le temps d'enregistrements des données de pression et de température dans la bouteille de décharge.

La boucle B correspond à la génération des signaux de l'électrovanne et de la caméra rapide, représentés sur la Figure 2.26. Pour déclencher l'ouverture de l'électrovanne, un signal analogique créneau de 5V est généré. Pour la caméra, un signal analogique TTL (Transistor-Transistor Logic) rectangulaire d'amplitude 5V est généré, et se déclenche sur le front montant du signal de l'électrovanne. Les deux boucles sont ensuite cadencées sur la même fréquence (ici 10 kHz), et sont programmées pour s'arrêter à la fin du temps d'acquisition t_s.

2.5 Modélisation Thermodynamique avec ProSim

2.5.1 Objectifs et fonctionnement du logiciel

Pour notre étude, nous utilisons le logiciel Simulis Thermodynamics de ProSim. Il s'agit d'un solveur de calculs de propriétés physico-chimiques et d'équilibres entre phases, qui se présente sous la forme d'un complément d'application dans Excel. Simulis Thermodynamics possède une base de données de propriétés pour plus de 2300 constituants issue de la base de données DIPPR® de l'AIChE, et enrichie par ProSim. Il est également possible de créer des constituants. Une bibliothèque étendue de

modèles thermodynamiques, sélectionnés pour leur fiabilité, leur robustesse et validés industriellement, est disponible. Les algorithmes employés permettent de prendre en compte les systèmes fortement non-idéaux, diphasiques liquide-liquide, électrolytiques ou pétroliers (équations d'état, modèles de coefficient d'activité, modèles d'approches combinées, électrolytes et systèmes spécifiques). La combinaison de différentes méthodes permet d'adapter un modèle précisément à chaque problème.

Dans un premier temps, l'objectif est de valider les calculs de propriétés physico-chimiques de chaque constituant de ProSim avec la base de donnée du NIST (National Institute of Standards and Technology) pour l'eau, le CO_2 et le N_2 et les valeurs expérimentales fournis par 3M pour le Novec1230™. Ensuite, à partir des propriétés thermodynamiques de chaque constituant utilisé, l'objectif est de calculer les équilibres entre phases de notre système en fonction des conditions initiales. Ces calculs sont comparés aux résultats expérimentaux pour confirmer que le protocole expérimental mis en place est robuste mais aussi que les modèles utilisés pour les calculs sont justes. ProSim est utilisé à titre indicatif et les résultats n'ont pas été validés dans le cadre d'une étude thermodynamique avancée.

2.5.2 Propriétés thermodynamiques d'un constituant pur

Les constituants utilisés sont : le dioxyde de carbone (CO_2), l'azote (N_2), l'eau (H_2O) et le Novec1230™ ($C_6F_{12}O$). Tous les constituants sont présents dans la base de données du logiciel, sauf le Novec1230™. Le constituant est donc créé et ajouté à la base de données grâce à ses propriétés critiques (pression et température) et son facteur acentrique ω. Le facteur acentrique ω de Pitzer (1939) est une des constantes très utilisées dans les relations thermodynamiques des fluides purs. Elle permet de rendre compte de l'écart à la sphéricité des molécules. Elle vaut zéro pour les gaz monoatomiques et est supérieure à zéro pour les composés polyatomiques. L'expérience montre que la connaissance de la température critique T_c, de la pression critique P_c et du facteur acentrique ω permet de construire des corrélations empiriques qui représentent de façon assez satisfaisante les comportements des fluides non polaires tel que le Novec1230™. Pour les fluides polaires (comme l'eau), on a en général besoin d'au moins un paramètre spécifique supplémentaire (cf. J. Schwartzentruber "De la thermodynamique aux procédés").

Le modèle utilisé pour les calculs de chaque constituant (excepté l'eau) est basé sur l'équation d'état de Peng-Robinson (PR) (1976). Pour l'eau, les calculs sont basés sur un modèle spécifique à l'eau pure (IAPS, 1984) [35]. Ces équations utilisent les unités du système international.

$$P = \frac{RT}{V - B} - \frac{A}{V^2 + 2\,B\,V - B^2} \tag{2.7}$$

Où P et V sont respectivement la pression du fluide et son volume molaire. A et B sont

les paramètres spécifiques au fluide, liés aux propriétés du point critique du fluide P_c et T_c et représentatifs des forces moléculaires attractives et répulsives. Le paramètre A, dépendant de la température s'exprime :

$$A(T) = \frac{0,457235\,(RT)^2\,\alpha(T)}{P_c} \tag{2.8}$$

Et B,

$$B = \frac{0,077796\,R\,T_c}{P_c} \tag{2.9}$$

Le facteur de correction α est dépendant de la température réduite T_r,

$$\alpha(T_r) = 1 + \kappa\,[1 - T_r^{0,5}]^2 \tag{2.10}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \tag{2.11}$$

Et κ, le terme de l'attraction,

$$\kappa = 0,37464 + 1,54226\,\omega - 0,26992\,\omega^2 \tag{2.12}$$

Avec ω, le facteur acentrique du constituant. On peut écrire l'équation d'état de Peng-Robinson sous forme polynomiale :

$$V^3 c_3 + V^2 c_2 + V c_1 + c_0 = 0 \tag{2.13}$$

Où les coefficients pour l'équation cubique sont :

$$c_0 = PB^3 + RTB^2 - AB \tag{2.14}$$

$$c_1 = A - 3PB^2 - 2RTB \tag{2.15}$$

$$c_2 = PB - RT \tag{2.16}$$

$$c_3 = P \tag{2.17}$$

A partir de ces équations on peut, par exemple, représenter les diagrammes de phases (pression en fonction de la masse volumique à différentes températures) pour chaque constituant Figure 2.27, 2.28, 2.29 et 2.30. Les calculs réalisés avec ProSim ont été comparés avec la base de données du NIST (National Institute of Standards and Technology) pour l'eau, le CO_2 et le N_2 et avec les valeurs expérimentales fournis par 3M pour le Novec1230™. On remarque que les modèles calculés correspondent plutôt bien aux valeurs expérimentales, en notant néanmoins quelques différences lorsque nous sommes dans la phase liquide et plus particulièrement au-delà du point critique.

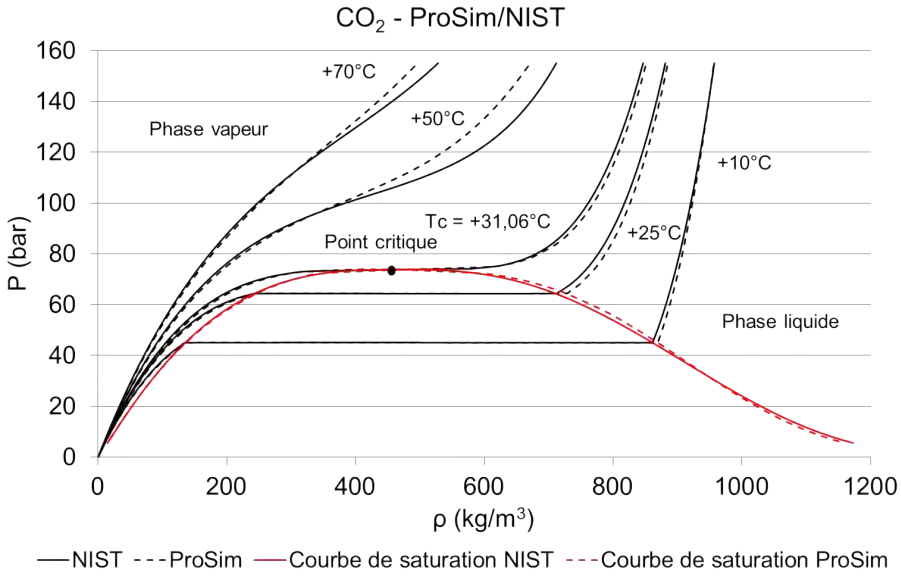


FIGURE 2.27 – Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du CO_2. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide Lee-Kesler-Plocker. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST.

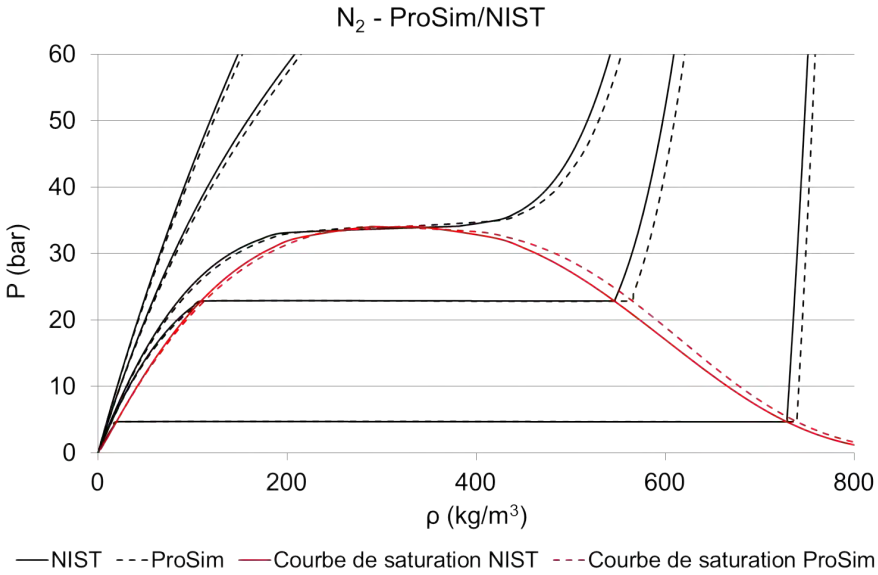


FIGURE 2.28 – Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du N_2. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide Lee-Kesler-Plocker. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST.

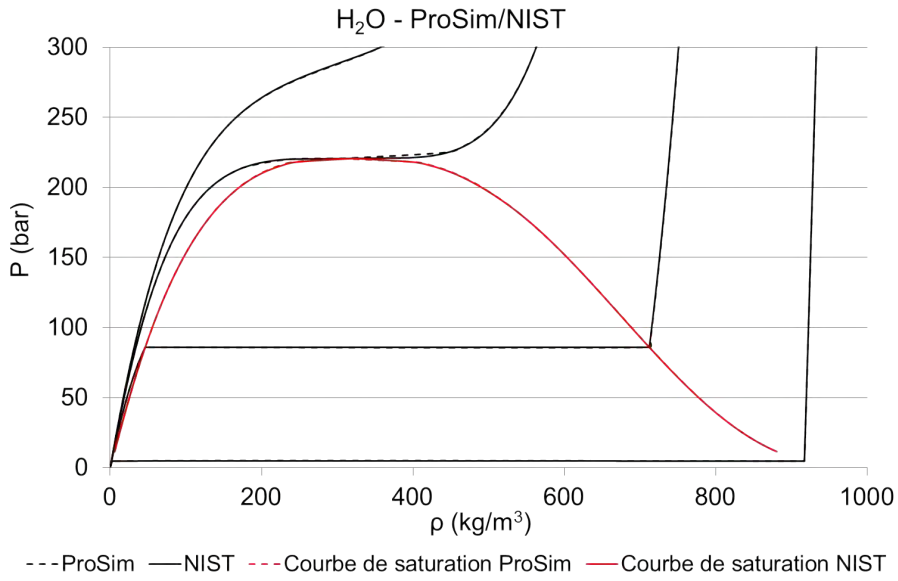


FIGURE 2.29 – Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique de l'eau. Modèle Eau Pure. Courbe de saturation expérimentale fournie par le NIST.

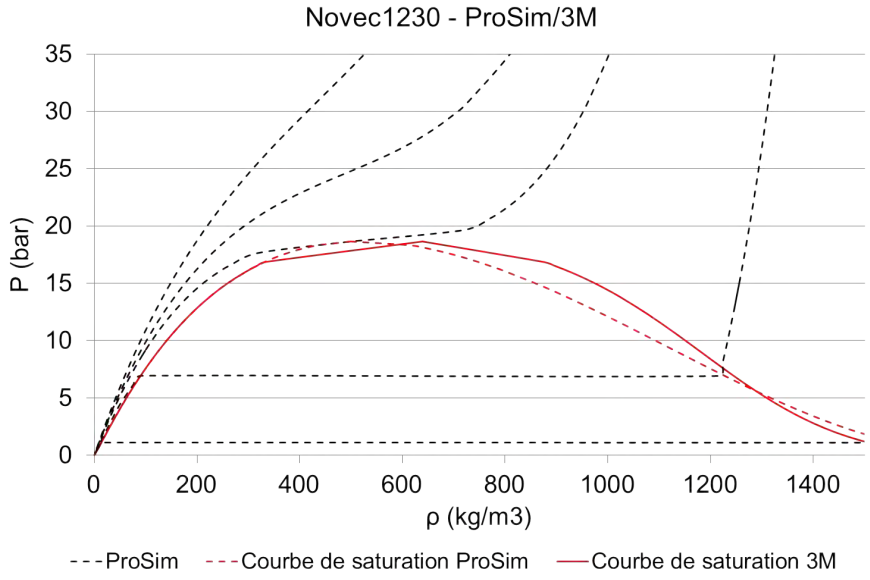


FIGURE 2.30 – Diagramme de Phase - Pression en fonction de la masse volumique du Novec1230™. Modèle : équation d'état Peng-Robinson + volume molaire liquide équation d'état. Courbe de saturation expérimentale fournie par 3M.

2.5.3 Propriétés thermodynamiques d'un système binaire et ternaire

Selon le point d'essai, le système dans la bouteille de décharge sera binaire ou ternaire. La Figure 2.11 rappelle les systèmes étudiés. Simulis Thermodynamics permet de

Système	Constituants
Binaire	Novec1230™ / N_2
Binaire	Eau / N_2
Binaire	Novec1230™ / CO_2
Binaire	Eau / CO_2
Ternaire	Novec1230™ / CO_2 / N_2

TABLE 2.11 – Systèmes binaires et ternaires étudiés.

calculer les propriétés thermodynamiques d'un système multi-composant. La composition des phases peut être calculée en fonction des fractions massiques du système. Les caractéristiques des constituants et des conditions expérimentales nous dirigent dans le choix du modèle thermodynamique à appliquer pour les calculs d'équilibre entre phase. Deux types de méthodes existent pour calculer les équilibres entre phases :

— Appliquer des modèles différents aux deux phases en présence : cette méthode "hétérogène" est utilisée pour représenter l'hétérogénéité du système traité. Leurs applications couvrent le domaine des basses pressions et il est important de noter qu'elles ne satisfont pas la discontinuité existante dans la zone critique entre l'état vapeur et l'état liquide.

— Appliquer le même modèle, généralement une équation d'état, aux deux phases en présence, permettant ainsi d'assurer une continuité au point critique. Les équations d'état avec leur règle de mélange classique (Soave-Redlich-Kwong, Peng-Robinson, Lee-Kesler-Plöcker...) font partie de cette deuxième catégorie. Cette méthode "homogène" se limite au domaine d'application des systèmes apolaires, ce qui est notre cas avec le Novec1230™. C'est donc cette méthode qui sera utilisée pour nos calculs d'équilibre entre phases pour notre système à haute pression, avec un modèle basé sur les équations d'état Peng-Robinson (PR).

Le Tableau 2.12 résume les conditions initiales expérimentales avec les calculs des compositions des phases correspondantes fournis par ProSim en prenant en compte le volume de notre bouteille de décharge.

Température [°C]	Nomenclature	Système	Phase liquide		Phase vapeur	
			Liquide	Gaz	Liquide	Gaz
+23	Wat00CO2Hot	Eau + N_2	86%		14%	
			>99,9%	0,0006%	0,05%	99,95%
	Wat21CO2Hot	Eau + CO_2	84%		16%	
			99,9%	0,1%	0,04%	99,96%
	Nov00CO2Hot	Novec1230™ + N_2	88%		12%	
			98,6%	1,4%	18%	82%
	Nov17CO2Hot	Novec1230™ + CO_2	91%		9%	
			90%	10%	16%	84%
	Nov33CO2Hot	Novec1230™ + CO_2	88%		12%	
			74%	26%	10%	90%
+11	Nov50CO2Hot	Novec1230™ + CO_2	93%		7%	
			53%	47%	4%	96%
-20	Nov00CO2Cold	Novec1230™ + N_2	87%		13%	
			98,5%	1,5%	3,3%	96,7%
	Nov17CO2Cold	Novec1230™ + CO_2	95%		5%	
			87%	13%	3%	97%
	Nov33CO2Cold	Novec1230™ + CO_2	95%		5%	
			70%	30%	1,4%	98,6%
	Nov50CO2Cold	Novec1230™ + CO_2	97%		3%	
			52%	48%	0,9%	99,1%

TABLE 2.12 – Compositions des phases des systèmes binaires étudiés.

2.6 Conclusion

Un banc d'essais a été conçu et mis en place au sein de l'IMFT. Les éléments qui le composent ainsi que les moyens d'analyse utilisés pour interpréter les campagnes d'essais ont été présentés. Un système d'acquisition de données (pression et température au cours du temps dans la bouteille de décharge) et de synchronisation du banc via LabVIEW permettent la mise en place de diagnostics quantitatifs pour l'analyse et la compréhension des phénomènes physiques intervenant lors d'une décharge. Une caméra haute cadence Phantom v2012, pouvant fonctionner à une fréquence maximale de 22 500 images par seconde à pleine résolution de 1280 par 800 pixels, est installée dans le but de visualiser l'écoulement en amont de la buse (à travers une veine transparente) et par la suite le spray, et d'avoir un suivi temporel en lien avec les mesures de pression et température dans la bouteille, au cours d'une décharge.

Les essais seront réalisés à iso-volume de liquide (200 mL), au Novec1230™ et à l'eau, pour avoir une décharge de référence. Les tests seront également réalisés à iso-pression initiale (40 bar). Une variation de la quantité de CO_2, autrement dit la variation de la composition de l'agent dans la bouteille de décharge, permet d'observer l'influence du gaz dissous sur le processus d'atomisation (phénomènes intervenant dans la bouteille de décharge, écoulements en amont de la buse, impacts sur le spray). Le CO_2 est un gaz très soluble dans le Novec1230™, et peu soluble dans l'eau. L'azote, quant à lui, sert de gaz propulsif et vient compléter les cas tests pour être à la pression test de 40 bar. Deux installations de la bouteille de décharge permettront de mener des campagnes d'essais en conditions de température ambiante (+23°C) et à froid (-20°C) grâce à un refroidissement de la bouteille avec de la neige carbonique, dans le but d'observer l'influence de la température initiale sur le processus d'atomisation.

Le logiciel Simulis Thermodynamics de ProSim, permet le calcul d'équilibre entre phases de notre système, à partir des propriétés thermodynamiques de chaque constituant. Le constituant Novec1230™ a été créé à partir de ses propriétés critiques (pression et température critique), et son facteur acentrique ω. Le logiciel fournit un support pour la compréhension des phénomènes qui interviennent dans la bouteille de décharge en fonction de la composition de l'agent et également pour compléter les résultats expérimentaux obtenus.

Chapitre 3

Décharge de liquide pressurisé à l'azote, gaz propulsif très faiblement soluble

3.1 Objectifs

Dans ce chapitre, on présente les mécanismes fondamentaux qui interviennent lors de la décharge d'un liquide contenu dans une bouteille pressurisée avec un gaz faiblement soluble dans ce liquide. On effectue dans un premier temps une analyse expérimentale, puis un modèle simple est proposé, pour le cas limite du gaz non soluble dans le liquide. Dans ce chapitre le gaz propulsif est l'azote et deux liquides sont testés : l'eau, qui sert de référence et le Novec1230™ qui est l'objet de notre étude. L'objectif de faire des décharges à l'eau est de comparer avec les décharges au Novec1230™ au niveau du spray. Le Novec1230™ s'évaporant par rapport à l'eau, le but est de comprendre quel est le phénomène prépondérant dans l'atomisation du Novec1230™ : le spray ou l'évaporation. Les essais sont menés à température ambiante. De plus, on étudie pour le cas du Novec1230™ l'influence de la température initiale de la bouteille en réalisant un test à -20°C. Le Tableau 3.1 résume les conditions expérimentales pour ces trois expériences. Trois moyens de diagnostic sont mis en oeuvre (cf. Chapitre 2). On enregistre d'une

Température [°C]	Liquide	Gaz	Nomenclature
+23	Eau	N_2	Wat00CO_2Hot
	Novec1230™		Nov00CO_2Hot
-20			Nov00CO_2Cold

TABLE 3.1 – Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote.

part l'évolution temporelle de la pression et de la température dans la bouteille. Ces

données permettent de mesurer en particulier la durée de la décharge et également de comparer les résultats avec le modèle de décharge (cf. Section 3.4). D'autre part, on utilise la caméra rapide pour visualiser l'écoulement dans la veine transparente ainsi que le spray en sortie de buse.

Cependant, après analyse des résultats des enregistrements de l'évolution de la température, nous nous sommes aperçu que les mesures du thermocouple étaient erronées. Ces erreurs ne sont pas dues au protocole expérimental mais sont liées aux caractéristiques du thermocouple, en particulier à son temps de réponse. En effet, pour résister aux hautes pressions, l'épaisseur de la gaine est importante (ici 1 mm) ce qui augmente le temps de réponse de l'ordre de 0,5 secondes (0,15 secondes donné par le fournisseur). Malheureusement ce temps de réponse n'est pas assez petit compte tenu des temps de décharges mesurés, ce qui fausse les mesures. Nous avons donc choisi de ne pas présenter les résultats des mesures de températures. Le thermocouple permet néanmoins de mesurer la température initiale dans la bouteille avant une décharge.

Tous ces diagnostics sont synchronisés avec l'ouverture de l'électrovanne. L'objectif ultime étant de contrôler la bonne atomisation et vaporisation du liquide, on sera particulièrement attentif aux phénomènes affectant la forme du spray et sa dynamique. Ces essais serviront de point de référence pour l'étude de l'impact d'un gaz fortement soluble sur le processus d'atomisation, détaillé dans le Chapitre 4.

3.2 Décharge à température ambiante

La préparation d'un essai en conditions de température ambiante débute par le remplissage de la bouteille de décharge avec 200 mL de liquide (Novec1230$^{\text{TM}}$ou eau). La bouteille est ensuite pressurisée à l'azote jusqu'à la pression test de 40 bar. L'azote étant peu soluble dans ces deux liquides (cf. Chapitre 1), le système est rapidement à l'équilibre, ce qui est vérifié par la stabilisation de la pression et de la température de la bouteille. Le système est alors prêt pour une décharge.

3.2.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge

La Figure 3.1 présente l'évolution de la pression dans la bouteille au cours du temps pour les deux cas à température ambiante (cf. Tableau 3.1). On distingue deux phases pour la décharge avec une rupture de pente entre les deux. Ce type d'évolution a déjà été observé à partir des années 80 [5, 18, 19] pour des décharges de Halon1301 ou d'agents alternatifs pressurisés à l'azote. On reprend ici la description de la chronologie de la décharge, qui sera ensuite complétée par l'analyse des visualisations rapides (cf. Section 3.7). L'ouverture de l'électrovanne a lieu à $t = 0$ s (point 1 sur la Figure 3.1) et tous les diagnostics sont synchronisés sur ce temps. La première phase est appelée régime *hydraulique*, correspondant à la vidange du liquide pressurisé. À partir du

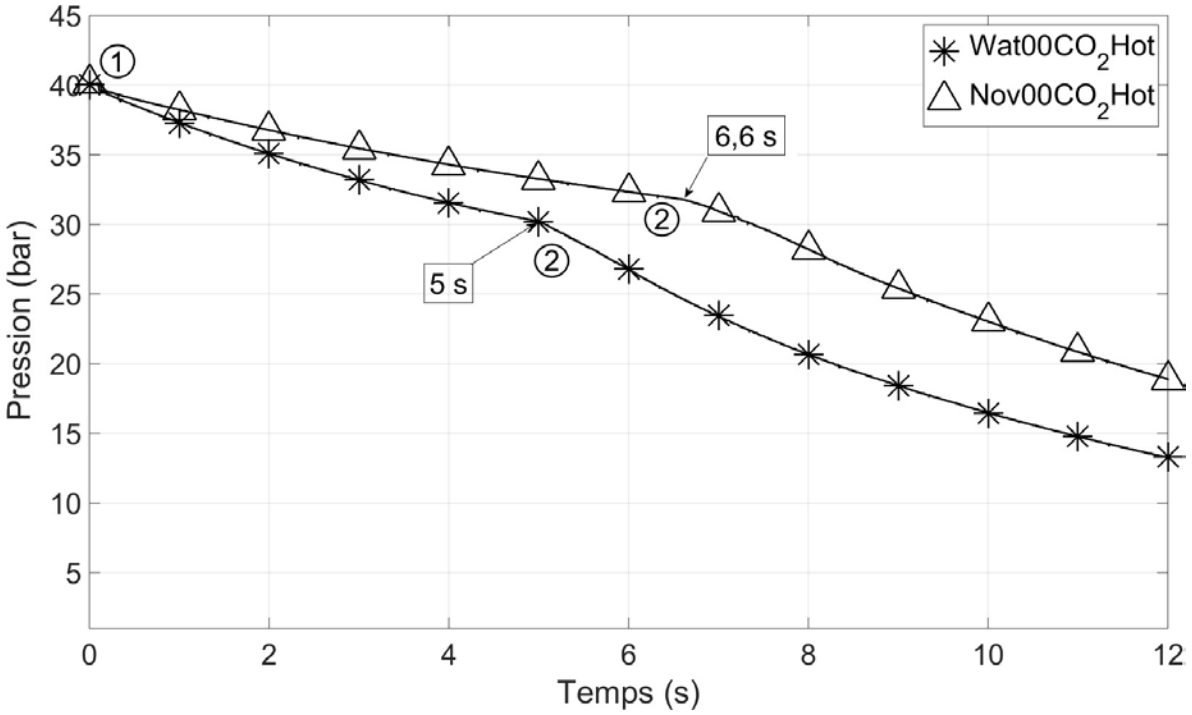


FIGURE 3.1 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

point 2, commence un régime dit *pneumatique* correspondant à la détente du ciel gazeux restant dans la bouteille. La rupture de pente au point 2 permet la détermination du temps de décharge. Dans le cas où le liquide est de l'eau, la durée de la décharge est mesurée à 5 secondes. Pour le Novec1230™ pressurisé à l'azote, le temps de décharge est mesuré à 6,6 secondes. Le modèle décrit en Section 3.4 permet de montrer que le temps de décharge du liquide est déterminé au premier ordre par la pression initiale dans la bouteille et le volume initial de liquide. Ces grandeurs étant identiques pour tous les tests, les différences proviennent des propriétés des liquides ainsi que du régime de l'écoulement. Le Novec1230™ ayant une masse volumique plus importante que l'eau ($\rho_{Novec} = 1\ 600\ kg/m^3$ et $\rho_{Eau} = 1\ 000\ kg/m^3$), l'équation 3.39 page 131 indique que les constantes de temps pour la décharge devraient être dans un rapport $\sqrt{(\rho_{Novec}/\rho_{Eau})} = 1,27$. Les rapport mesuré est $6,6/5 = 1,32$ ce qui est consistant avec le ratio des constantes de temps.

3.2.2 Imagerie par caméra rapide

On utilise en complément des mesures de pression de l'imagerie avec une caméra rapide pour observer le spray ainsi que l'écoulement en amont de la buse. Si l'imagerie de spray est relativement classique et a déjà été exploitée pour ce type de décharge dans

les systèmes de protection feux [5, 19], ou encore dans l'atomisation de fuel contenant un gaz dissous [3, 36] ou dans d'autres type d'atomisation que ce soit en atomisation aérée [33, 37, 38] ou en atomisation flash [17, 39], la visualisation de l'écoulement amont dans une veine transparente est plus originale [40, 41, 42, 43].

Visualisation du spray

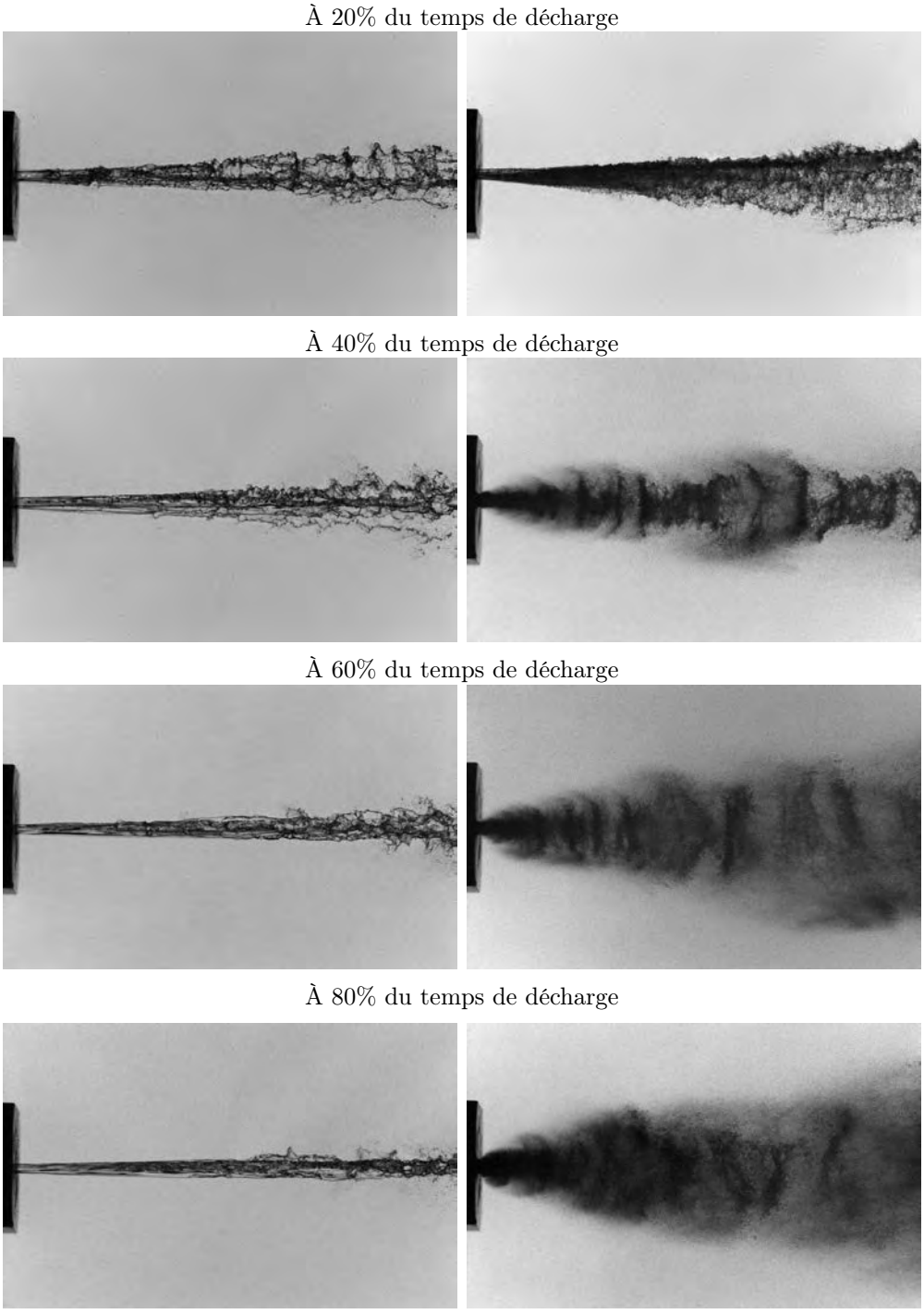
Pour la visualisation du spray en sortie de buse, la caméra fonctionne à une fréquence de 5 000 Hz et une résolution de 1280 x 800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 1 μs. C'est le temps le plus court que nous pouvons atteindre afin de minimiser le flou lié au déplacement des gouttes. Avec ces réglages, la caméra permet l'acquisition de 40 000 images consécutives, soit un temps d'enregistrement de 8 secondes, ce qui permet de couvrir complètement la phase de décharge du liquide pour les deux cas. En négligeant les effets visqueux et les différentes pertes de charge, on peut appliquer le théorème de Bernoulli entre la bouteille et la sortie de la buse pour estimer la vitesse u_L du liquide en début de décharge. On a :

$$u_L = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_L}} \tag{3.1}$$

où ρ_L est la masse volumique du liquide et ΔP la différence de pression entre la bouteille et l'ambiant ($\Delta P = 40\ bar$). Cette estimation donne $u_L = 90$ m/s pour l'eau et $u_L = 70$ m/s pour le Novec1230™. Les déplacements entre deux images prises à 5 000 Hz sont donc $17,7$ mm pour l'eau et 14 mm pour le Novec1230™ respectivement. L'objectif est donc d'obtenir un grand nombre d'images durant la décharge afin de pouvoir résoudre au maximum les différentes phases de l'écoulement. Cependant, la fréquence d'acquisition n'est pas assez élevée pour un suivi temporel du spray et nous avons également un flou lié à l'évaporation du Novec1230™.

La Figure 3.2 montre les images instantanées du spray obtenues pour les deux liquides. La colonne de gauche correspond au cas de l'eau et celle de droite au cas du Novec1230™. Pour chaque cas, une série de quatre images est présentée, respectivement à 20%, 40%, 60% et 80% de la durée de la décharge. Ceci permet de donner un aperçu de l'évolution temporelle du spray à des moments où la fraction de liquide déchargée est similaire dans les deux cas. L'écoulement va de la gauche vers la droite et le champ de la caméra est de 47 mm dans la direction de l'écoulement.

On analyse dans un premier temps la décharge de l'eau, (a) dans la Figure 3.2. En sortie de buse le jet a une forme cylindrique et les forces aérodynamiques résultantes du cisaillement avec l'air ambiant déforment l'interface. Le jet reste cependant relativement compact et il faut attendre une dizaine de diamètres pour que se forment des ligaments et que les premières gouttes soient arrachées. Le processus d'atomisation est donc globalement inefficace. D'autre part on peut remarquer que la forme du spray ne dépend quasiment pas de la phase de la décharge. La baisse de pression au cours de



(a) Wat00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Hot

FIGURE 3.2 – Visualisations du spray pour les décharges d'eau (a) et de Novec1230™ (b) pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante.

la décharge a pour effet de diminuer la vitesse du liquide en sortie, ce qui a tendance à encore atténuer les processus menant à la formation de gouttes. On peut en effet observer que le spray à 80% de la décharge est plus compact qu'à 20%. Cet effet est cependant modeste car la pression baisse seulement de 25% entre le début et la fin de la décharge, ce qui correspond à une diminution de la vitesse débitante d'environ 13%.

On considère maintenant le jet de Novec1230$^{\text{TM}}$ présenté colonne de droite dans la Figure 3.2. À 20% de la décharge, le jet de Novec1230$^{\text{TM}}$ a une forme similaire à celui d'eau. Cependant, il est beaucoup plus sombre, ce qui indique une densité d'interface plus importante rencontrée par les rayons lumineux. De plus, à 40% de la décharge, le jet a une structure radicalement différente : la portion cylindrique immédiatement en aval de la buse disparait et le jet subit une extension radiale rapide avec la formation de très nombreuses gouttes. On observe également la formation d'amas radiaux séparés par des zones peu chargées en gouttelettes. Avec les moyens de diagnostic mis en oeuvre, il n'est pas possible de déterminer la structure de ces amas, c'est à dire si il s'agit d'une phase continue ou d'une phase dispersée dense. Ce type de structure de spray peut être obtenu dans le cas de l'atomisation dite "effervescente". Par exemple, Lefebvre [1] montre que la présence de bulles dans le liquide en amont de la buse provoque une déstabilisation accélérée du jet et l'éclatement de la phase dense en filaments et gouttelettes.

Le nombre de Reynolds (Re), le nombre de Weber (We) et le nombre de Ohnesorge (Oh) sont calculés pour nos décharges. Ces nombres adimensionnels permettent de classer les différents régimes de fractionnement d'un jet de liquide tels qu'ils sont observés expérimentalement (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1). Pour rappel, le nombre de Reynolds mesure le rapport entre les forces d'inerties et les forces visqueuses et s'écrit :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_L \, u_L \, d_{buse}}{\mu_L} \tag{3.2}$$

où ρ_L est masse volumique du liquide, u_L la vitesse du liquide (cf. équation 3.1 Section 3.2.2), d_{buse} est le diamètre de buse et μ_L la viscosité dynamique du liquide ($\mu_{Novec} = 5{,}24.10^{-4}$ Pa.s [44] et μ_{eau}=1.10^{-3} Pa.s). Appliqué à notre cas, on estime Re = 213 130 pour le Novec1230$^{\text{TM}}$ et Re = 88 300 pour l'eau, ce qui correspond à un régime turbulent dans les deux cas. Le nombre de Weber quant à lui, caractérise la capacité d'une goutte provenant d'un jet ou d'un ligament à résister aux forces aérodynamiques grâce aux forces de tension de surface, autrement dit à ne pas se désagréger en de nombreuses petites gouttes, et s'écrit :

$$\mathrm{We} = \frac{\rho_L \, {u_L}^2 \, d_{buse}}{\sigma_L} \tag{3.3}$$

où σ est la tension superficielle liquide/air ($\sigma_{Novec} = 11{,}08.10^{-3}$ N/m [44] et $\sigma_{eau} = 71,97.10^{-3}$ N/m). On l'estime à We = 703 544 pour le Novec1230$^{\text{TM}}$ et We = 108 335 pour l'eau. À partir

de ces deux grandeurs, on peut en déduire le nombre d'Ohnesorge qui est défini tel que :

$$\mathrm{Oh} = \frac{\sqrt{\mathrm{We}}}{\mathrm{Re}} \tag{3.4}$$

Il est utilisé pour introduire l'effet de la viscosité du liquide dans le processus de déstabilisation d'une goutte, par glissement dans le gaz ou lors de collisions entre gouttes. On l'estime à Oh = $3{,}94.10^{-3}$ pour le Novec1230™et Oh = $3{,}73.10^{-3}$ pour l'eau. Le Tableau 3.2 résume les valeurs de ces trois nombres adimensionnels calculées sur la base de la vitesse initiale u_L déterminée plus haut (cf. équation 3.1). Comme expliqué plus haut, la vitesse du liquide en fin de décharge ne diminue que de 13%, ce qui n'impact que très faiblement ces trois grandeurs. Les régimes sont donc identiques.

Grandeur	Wat00CO_2Hot	Nov00CO_2Hot
Re	$8{,}83.10^4$	$2{,}13.10^5$
We	$1{,}08.10^5$	$7{,}04.10^5$
Oh	$3{,}73.10^{-3}$	$3{,}94.10^{-3}$

TABLE 3.2 – Nombre de Reynolds (Re), nombre de Weber (We) et nombre de Ohnesorge (Oh) pour les décharges d'eau et de Novec1230™pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante.

En reportant ces valeurs sur la classification des différents régimes de fractionnement d'un jet liquide (cf. Figure 3.3) [1, 7], on peut en déduire qu'on se retrouve très vite dans le régime d'atomisation. Encore une fois, ces classifications s'appliquent généralement aux jets monophasiques.

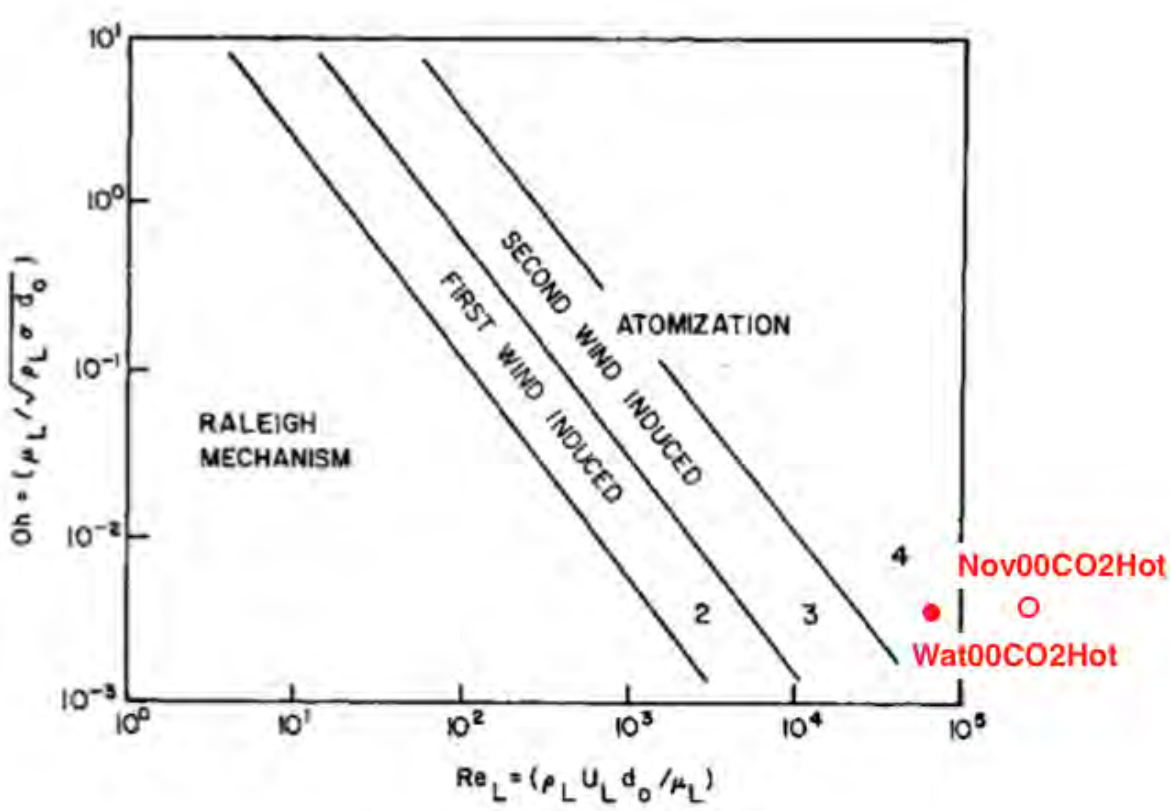


FIGURE 3.3 – Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]) (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1). Le point rouge plein et creux représentant le régime rencontré dans le cadre de notre étude.

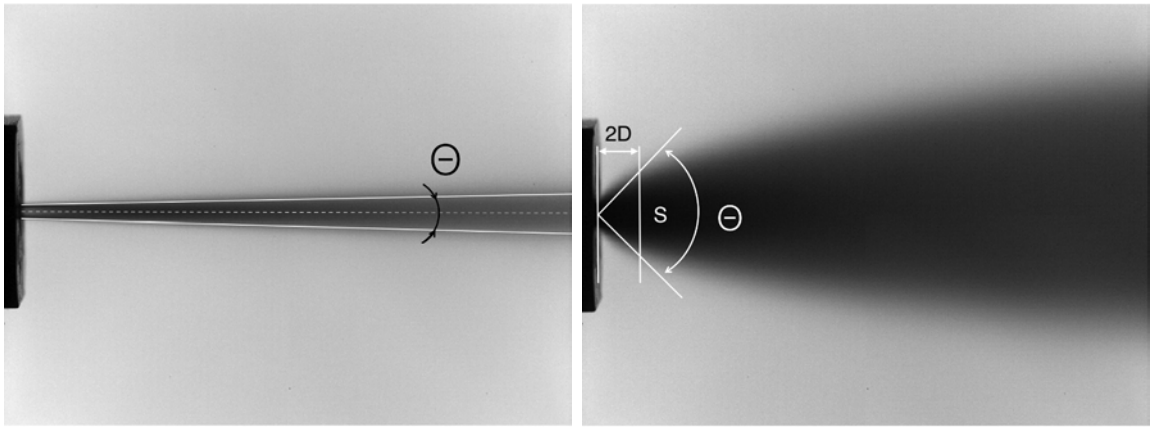
Mesure de l'angle du spray Θ

Afin d'évaluer l'angle moyen du cône du spray, on réalise une image moyenne du spray à partir d'une série d'images instantanées. Les rayons lumineux étant déviés lors de la traversée d'une interface non orthogonale à la direction de propagation, il existe un lien (non-trivial) entre l'intensité lumineuse et la densité d'interface au travers du spray. Ainsi, plus la probabilité de passage d'une goutte à une position donnée est faible, plus le pixel correspondant dans l'image moyenne est clair. Il est nécessaire dans un premier temps d'appliquer une moyenne glissante sur une série d'images instantanées notée N correspondant à $d_N\%$ du temps de la décharge. Une moyenne d'image est appliquée toutes les n images, on obtient donc N/n images moyennes de spray. Cette méthode permet de déterminer à quel moment le spray est dans une phase dite *établie* et donc à partir de combien d'images on peut réaliser l'image moyenne.

Pour les décharges d'eau et de Novec1230^{TM}pressurisés à l'azote, on applique une moyenne d'image glissante sur $N = 15\ 000$ images instantanées correspondant à une série d'images comprise entre 40 et 100% du temps de la décharge soit $d_N = 60\%$ du

temps de décharge. Visuellement, le spray n'est pas établi avant 40% du temps de décharge. Une moyenne d'image est ensuite appliquée toutes les $n = 1\ 000$ images. On obtient donc au final $N/n = 15$ images moyennes de spray. On observe qu'à partir de la troisième image moyenne et jusqu'à la dernière, l'image est identique, ce qui signifie que le spray est *établi* et que l'on peut réaliser une image moyenne du spray à partir de 54% du temps de décharge. Nous avons également réalisé la moyenne d'image avec un pas d'images n plus petit, mais le résultat était le même donc nous avons gardé un pas de $n = 1\ 000$ images.

La Figure 3.4 présente les images moyennes pour les décharges d'eau et de Novec1230™ réalisées à partir d'une suite de $N = 5\ 000$ images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge, ce qui équivaut à 1 s de la décharge.



(a) Wat00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Hot

FIGURE 3.4 – Image moyenne de 5 000 images instantanées prises entre 80 et 95% de la décharge.

L'angle du spray Θ est défini comme étant l'angle tangent à la buse pour un spray régulier tel que observé dans le cas d'une décharge d'eau pressurisée à l'azote (cf. (a) sur la Figure 3.4). Le jet a un diamètre de la taille de l'orifice dès la sortie de la buse, c'est-à-dire 1 mm puis s'évase d'un angle $\Theta = 2,4°$. Dans le cas du Novec1230™, l'éclatement du jet est évident dès la sortie de la buse et le cône du spray prend une forme dite *parabolique*. Dans ce cas, la mesure de l'angle ne peut pas s'appliquer comme à un spray régulier dû à la dispersion extrême de la phase juste en sortie de buse [3]. Pour faciliter la mesure, l'angle du spray est défini tel que $\Theta = 2\,arctan(S/4D)$, où D est le diamètre de l'orifice et S est la largeur du spray à $2D$ en aval de la buse comme représenté dans le cas du Novec1230™(b) sur la Figure 3.4 où l'angle est mesuré à $\Theta = 91°$.

Pour la mesure de l'angle du spray, un critère a été choisi pour la mesure de la

largeur du spray S. Ce critère est fixé à 20% du niveau de gris pour tous les essais comme représenté sur la Figure 3.5. L'incertitude sur la mesure de l'angle est de $\pm$ 0,5°.

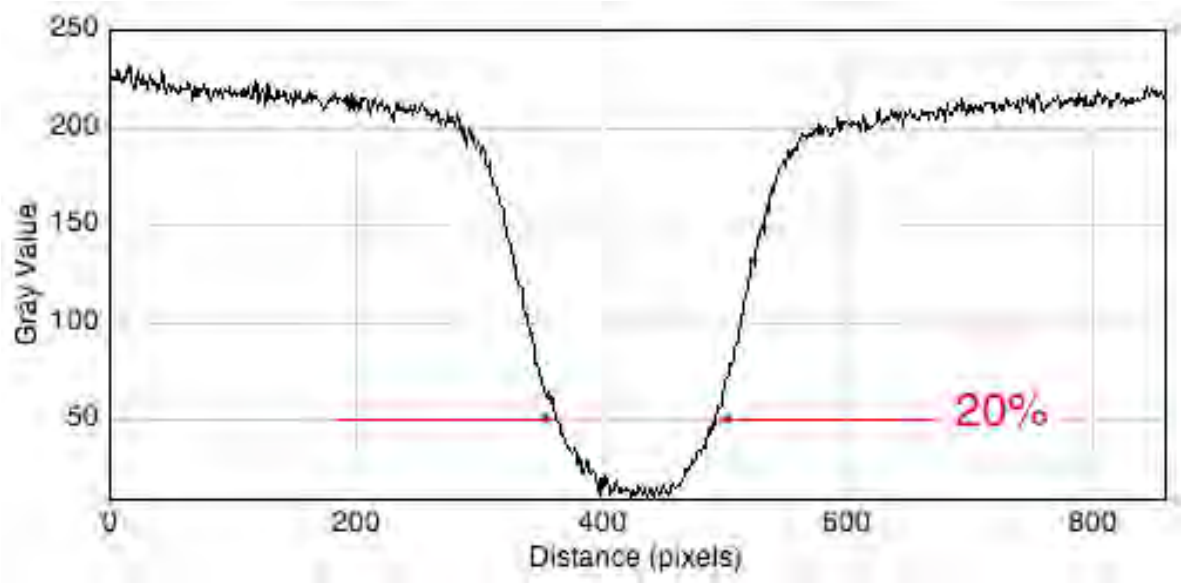


FIGURE 3.5 – Critère pour la mesure de l'angle du spray, fixé à 20% du niveau de gris.

On peut également déduire de ces images moyennes, le niveau de gris dans l'axe du spray. Chaque pixel de l'image est associé à un niveau de gris compris entre 0 (noir) et 255 (blanc) représentant le niveau de luminosité observé. La Figure 3.6 présente les niveaux de gris obtenus pour les décharges d'eau et de Novec1230^{TM}.

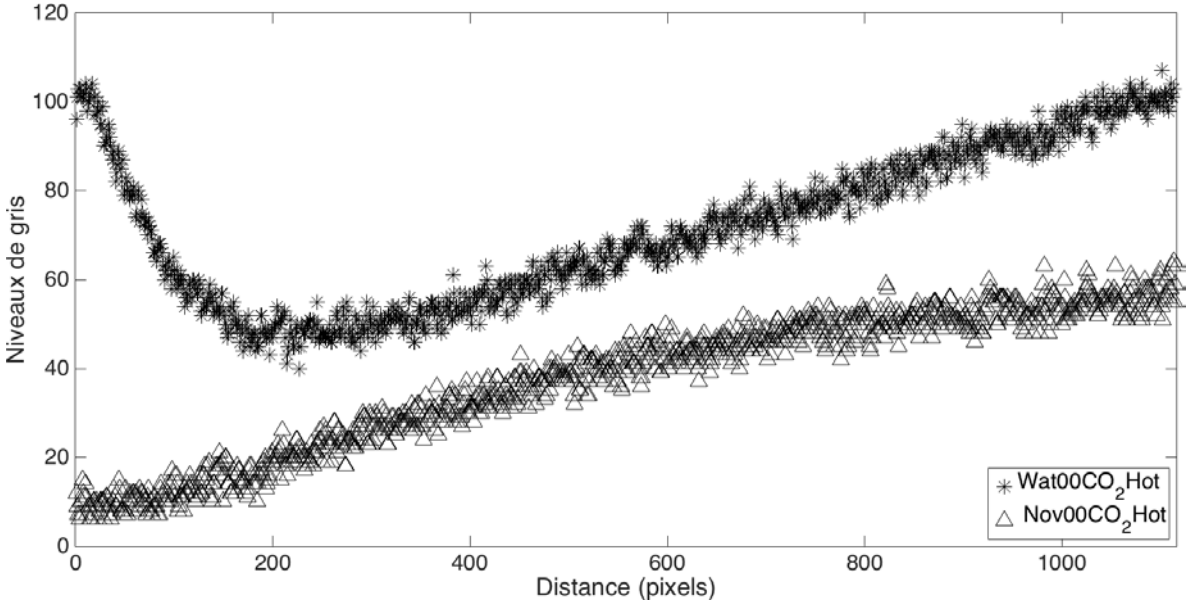


FIGURE 3.6 – Niveaux de gris sur l'axe du spray ($x = 0$) pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante. Échelle des niveaux de gris : 0 (noir) à 255 (blanc).

Mesurer les niveaux de gris nous donne une information de la structure sur l'axe du spray (à $x = 0$). Si le rayon de lumière traversant est fortement dévié, l'intensité lumineuse sera très faible et le niveau sera donc proche du noir. C'est le cas lorsque le rayon est dévié soit par une goutte soit par exemple lorsque le rayon traverse un nuage de gaz avec des variations de gradient de vapeur importantes. Dans le cas contraire, lorsque le rayon traverse une phase complètement liquide ou complètement gazeuse, il sera faiblement dévié, le niveau sera donc proche du blanc. Dans le cas de l'eau, le jet qui est un écoulement de liquide permet aux rayons lumineux de traverser facilement sans être déviés. L'intensité lumineuse est donc plus proche du blanc que du noir, excepté aux endroits où les interfaces liquide/gaz résultantes du cisaillement sont importante. Dans le cas du Novec1230™, le spray est dense et les rayons de lumière sont fortement déviés, l'intensité lumineuse est donc plus faible et on se rapproche du noir. Plus la présence de gouttes ou de vapeur est importante et plus la probabilité que les rayons de lumières soient déviés est importante.

Visualisation de l'écoulement dans la veine transparente

On utilise maintenant la caméra rapide pour visualiser l'écoulement en amont de la buse dans la veine transparente. Pour cette condition, la caméra fonctionne à une fréquence de 5 000 Hz et une résolution de 1280 x 800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 10 μs. La section du tube étant 10 fois plus grande que l'orifice de la buse, les vitesses débitantes sont donc dans les mêmes ratio. Ainsi, les images seront nettes

et nous avons un suivi temporel malgré un temps d'exposition 10 fois supérieur au cas précédent. Avec ces réglages, la caméra permet l'acquisition de 66 772 images consécutives, soit un temps d'enregistrement de 13,35 secondes.

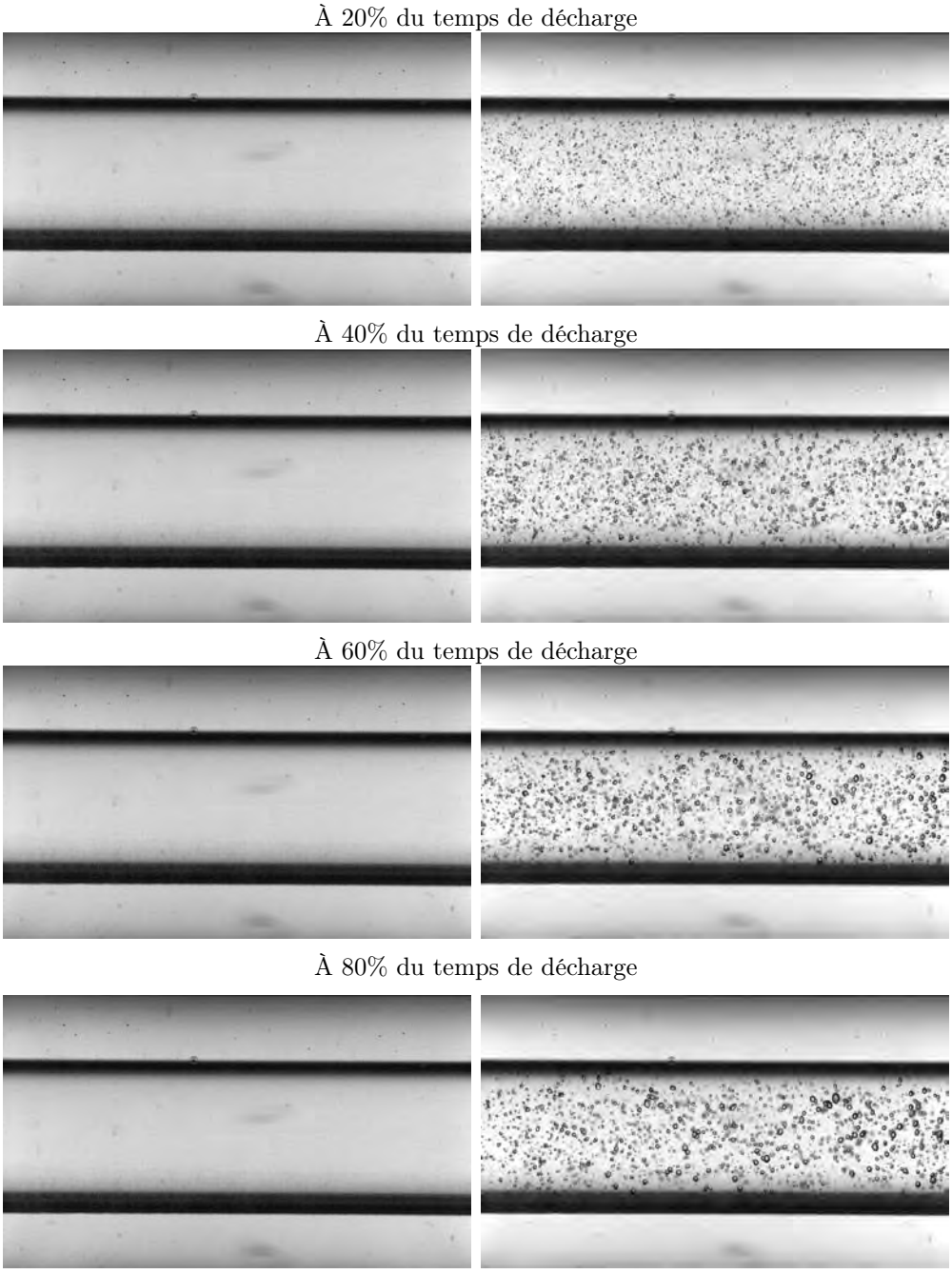
La Figure 3.7 présente les images instantanées obtenues pour la décharge à l'eau (colonne de gauche) et au Novec1230™ (colonne de droite). Le sens de l'écoulement est de la gauche vers la droite et quatre stades de la décharge sont présentés : 20%, 40%, 60% et 80% du temps de décharge. Le champ de la caméra est de 40 mm dans la direction de l'écoulement.

Dans le cas de l'eau, le tube est toujours parfaitement clair, indiquant un régime monophasique liquide tout le long de la décharge. Cependant, dans le cas du Novec1230™ à tous les stades de la décharge on observe de nombreuses bulles dans la veine transparente, nous sommes donc en présence d'un régime dit à *bulles* [24, 45]. En utilisant le logiciel Prosim, on peut calculer la composition initiale des phases dans la bouteille et donc déterminer la quantité d'azote en solution dans le liquide initialement. À la pression initiale de 40 bar et à 23°C, la masse d'azote dissoute dans l'eau est inférieure à 0,1% alors que pour le Novec1230™ elle vaut 1,4%. Le Tableau 3.3 présente la composition des phases calculée par ProSim en fonction des conditions initiales.

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Liquide	N_2	Liquide	N_2
Wat00CO2Hot	86%		14%	
	>99,9%	0,0006%	0,05%	99,95%
Nov00CO2Hot	88%		12%	
	98,6%	1,4%	18%	82%

TABLE 3.3 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

On peut donc en déduire que les bulles présentes sont le résultat d'une nucléation, autrement dit, du dégazage de l'azote suite à la baisse de pression au cours de la décharge. Ces bulles semblent plus fines à 20% de la décharge mais ont des diamètres similaires aux autres temps de décharge avec une taille de bulle caractéristique mesurée manuellement de l'ordre de 0,8 mm. Cette nucléation semble être une nucléation homogène. En effet, les bulles naissent au sein du liquide avec une distribution homogène, grossissent et sont présentes dans l'écoulement durant toute la décharge [11, 12]. La présence d'inclusions gazeuses a trois conséquences directes :



(a) Wat00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Hot

FIGURE 3.7 – Visualisations de l'écoulement dans la veine transparente en amont de la buse pour les décharges d'eau (a) et Novec1230^{TM}(b) pressurisés à l'azote, en condition de température ambiante.

1. **La diminution de la masse volumique moyenne**. Toutes choses étant égales par ailleurs, cette diminution de la masse volumique moyenne par les bulles dimi-

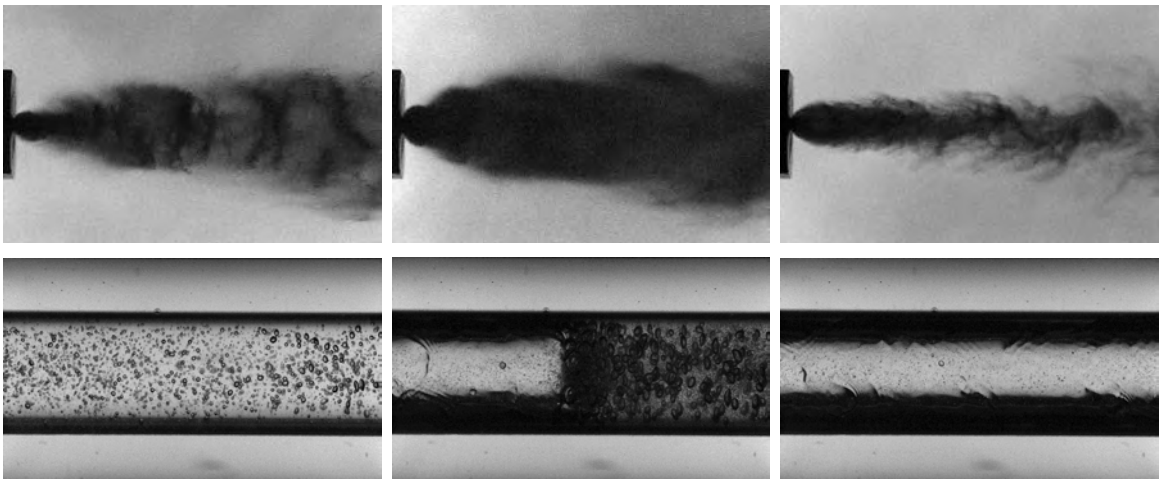
nue le débit massique de liquide, ce qui est consistant avec le temps de décharge plus long comme nous l'avons constaté pour la décharge au Novec1230™ pressurisé à l'azote (cf. Figure 3.1).

2. **La modification de la perte de charge**. Néanmoins cet effet est difficile à quantifier.

3. **La modification du spray**. Comme montré sur la Figure 3.2, le spray est radicalement différent entre les deux cas et on peut imputer ce changement à la présence des bulles dans l'écoulement en amont de la buse.

On peut faire la corrélation de ces résultats avec la littérature sur l'atomisation *effervescente* et *aérée* qui montrent que la présence de bulles dans l'écoulement en amont de la buse améliore l'atomisation et produit un spray de forme parabolique [3]. De plus, cette présence de bulles caractérisée par un taux de vide, influence la taille des gouttes obtenues dans le spray en sortie. Plus le ratio gaz/liquide (GLR) augmente et plus la taille des gouttes (SMD) et le débit massique diminuent [1, 33, 34]. L'influence des gaz dissous est étudiée dans le Chapitre 4.

Afin de finaliser cette étude de l'écoulement dans la veine transparente, on observe la transition entre la vidange du liquide (régime *hydraulique*) et la purge du ciel gazeux (régime *pneumatique*) dans le cas du Novec1230™. Une analyse image par image présentée Figure 3.8 montre comment le liquide chargé en bulles est chassé. L'écoulement prend ensuite une forme annulaire avec un jet central de gaz et un film de liquide le long de la paroi du tube [19, 24, 45]. Cette transition s'observe dans toutes les décharges, à l'eau ou au Novec1230™, que ce soit à froid ou en conditions de température ambiante.



(a) 95% (b) Transition (c) 105%

FIGURE 3.8 – Séquence de fin de la décharge Nov00CO_2Hot. (a) écoulement diphasique, (b) transition et (c) écoulement annulaire.

3.3 Influence de la température du système

On étudie maintenant pour le cas du Novec1230™ l'influence de la température initiale de la bouteille en réalisant des essais à froid (-20°C). La préparation d'un test en conditions de température froide débute par le remplissage de la bouteille de décharge à condition ambiante avec 200 mL de Novec1230™. La bouteille est ensuite pressurisée à l'azote jusqu'à la pression test (40 bar) puis on remplit le caisson de neige carbonique afin de refroidir la bouteille jusqu'à -20°C. Lors du refroidissement, la dissolution de l'azote augmente dans le Novec1230™. Comme expliqué Chapitre 1 Section 1.5, la solubilité d'un gaz augmente lorsque la température diminue [28]. En utilisant le logiciel ProSim, on peut calculer la composition initiale des phases de notre système dans ces nouvelles conditions. À la pression test de 40 bar et à une température de -20°C, la masse d'azote dissoute dans le Novec1230™ est de 1,5%, donc légèrement plus qu'à température ambiante de 23°C (1,4% en masse). La dissolution va engendrer une baisse de pression dans la bouteille de décharge jusqu'à la pression de 34 bar. Une surpressurisation de quelques bar permet d'être à la pression test de 40 bar, la quantité d'azote sera donc légèrement supérieure pour une décharge à froid que pour une décharge à l'ambiant. Lorsque la pression et la température de la bouteille sont stabilisées, le système est alors prêt pour une décharge. Le Tableau 3.4 présente la composition des phases calculée par ProSim en fonction des conditions initiales pour les décharges de Novec1230™. Les proportions liquide/gaz sont les mêmes dans les deux cas. Néanmoins on remarque qu'à froid, la masse de Novec1230™ en phase vapeur est beaucoup moins importante (3,3%) qu'en conditions de température ambiante (18%).

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Novec1230™	N_2	Novec1230™	N_2
Nov00CO2Hot	88%		12%	
	98,6%	1,4%	18%	82%
Nov00CO2Cold	87%		13%	
	98,5%	1,5%	3,3%	96,7%

TABLE 3.4 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante (23°C) et froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

3.3.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge

La Figure 3.9 présente l'évolution de la pression dans la bouteille au cours du temps pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote dans les deux conditions de températures.

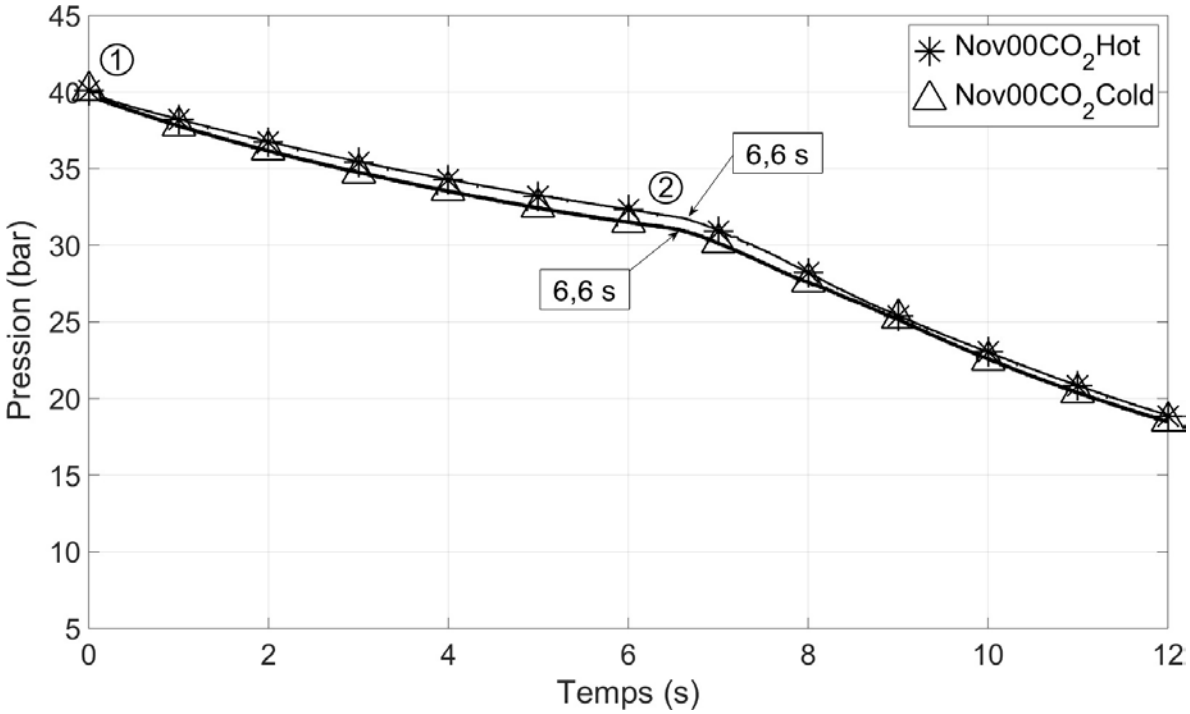


FIGURE 3.9 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C) et froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

L'ouverture de l'électrovanne a lieu à $t = 0$ s (point 1 sur la Figure 3.9). On retrouve les régimes décris section 3.2.1 : le régime *hydraulique* du point 1 au point 2, et le régime *pneumatique* à partir du point 2. Un delta de température de plus de 40°C séparent ces deux essais. Les temps de décharge mesurés sont les mêmes pour les deux décharges.

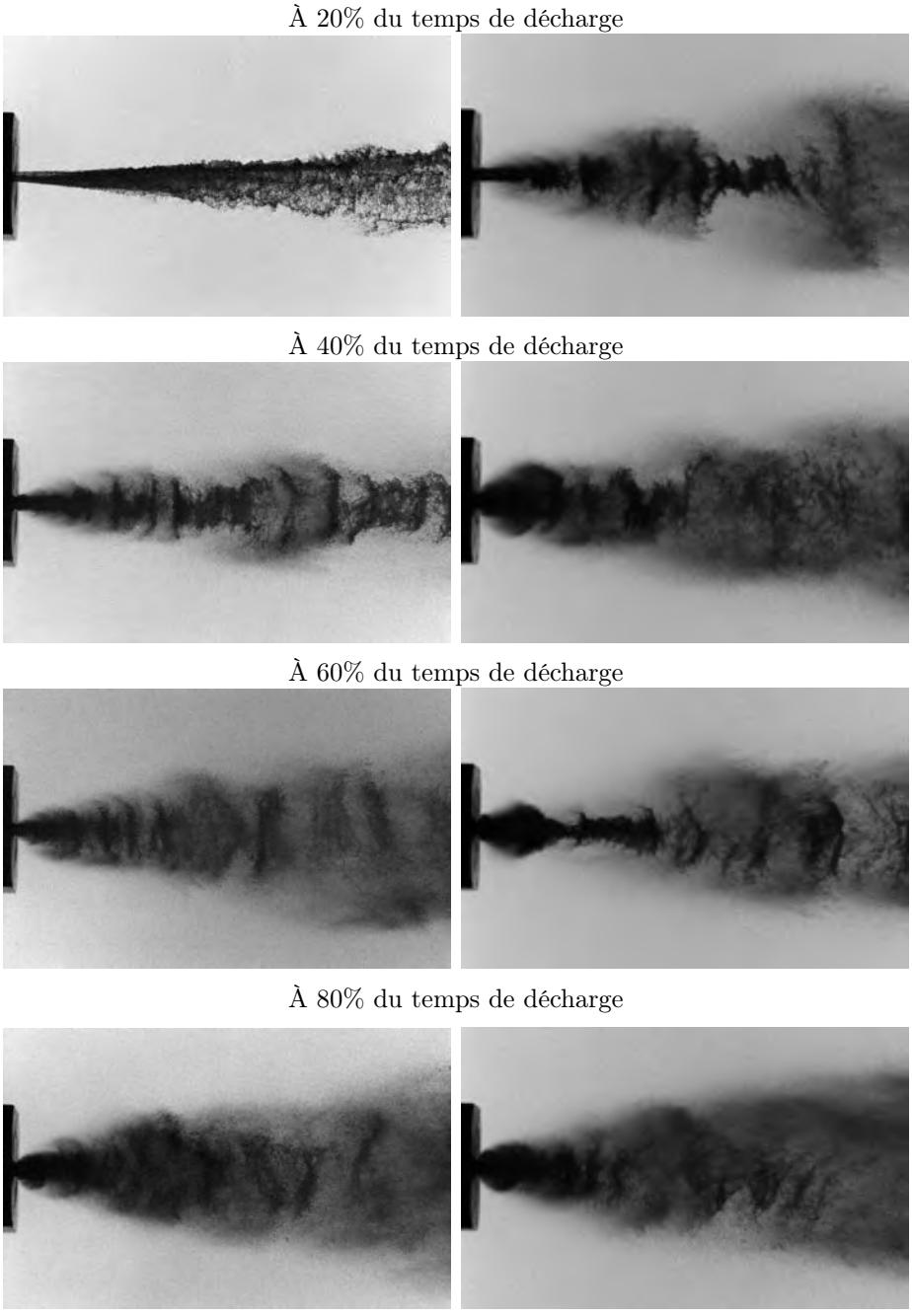
3.3.2 Visualisation du spray

Pour la visualisation du spray en conditions de température froide en sortie de buse, la caméra fonctionne à une fréquence de 5 000 Hz et une résolution de 1280 x 800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 1 μs. Avec ces réglages, la caméra permet l'acquisition de 90 000 images consécutives, soit un temps d'enregistrement de 9 secondes, ce qui permet de couvrir complètement la phase de décharge du liquide.

La Figure 3.10 compare les images instantanées obtenues pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et froide (-20°C). Pour les deux cas, les images sont présentées à 20%, 40%, 60% et 80% du temps de décharge correspondant. L'écoulement va de gauche à droite et le champ de la caméra est de 47 mm dans la direction de l'écoulement.

La colonne de gauche (a) correspond au spray pour la décharge de Novec1230™ en conditions de température ambiante étudiée Section 3.2.2, et la colonne de droite (b) correspond au spray pour la décharge de Novec1230™ en conditions de température froide. Nous observons que les images obtenues sont similaires. Il est difficile de différencier les deux décharges. À 20% de la décharge, le jet à une forme cylindrique et les forces aérodynamiques résultant du cisaillement avec l'air ambiant déforment l'interface. Le jet reste relativement compact puis à 40% le jet subit une extension radiale avec la présence de nombreuses gouttes autours de amas verticaux. Afin d'évaluer l'angle moyen du spray, on réalise une image moyenne du spray à partir d'une série d'images instantanées avec la même méthode expliquée Section 3.2.2 page 111. Pour la décharge de Novec1230™ en conditions de température froide, on applique une moyenne glissante sur $N = 30\ 000$ images instantanées correspondant à une série d'images comprise entre 45 et 100% du temps de décharge. Une moyenne d'image est appliquée toutes les $n = 1\ 000$ images. On obtient donc $N/n = 30$ images moyennes de spray. On observe qu'à partir de la septième image moyenne et jusqu'à la dernière, l'image est identique, ce qui signifie que le spray est *établi* et que l'on peut réaliser une image moyenne du spray à partir de 65% du temps de décharge. La Figure 3.11 compare les images moyennes des décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante et à froid.

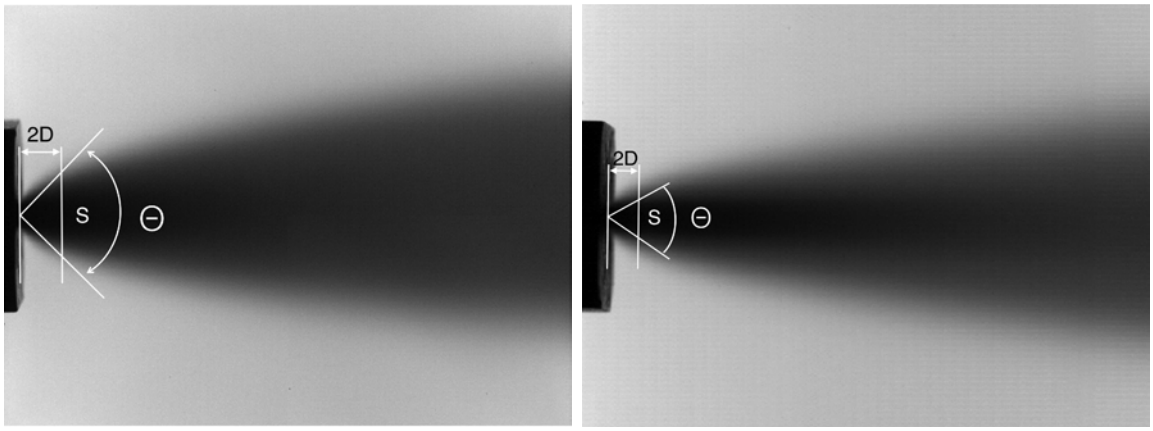
Dans le cas à l'ambiant, l'angle du spray Θ est mesuré à $\Theta = 91°$ (cf. Section 3.2.2). Dans le cas à froid (b), le jet est également éclaté dès la sortie de la buse et le spray prend aussi une forme *parabolique*, l'angle du spray Θ est donc déterminé suivant la même méthode que dans le cas à l'ambiant et est mesuré à $\Theta = 62°$.



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Cold

FIGURE 3.10 – Comparaison des visualisations expérimentales du spray pour les décharges de Novec1230^{TM}pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C) (a) et froid (-20°) (b).

On déduit également le niveau de gris de ces images moyennes dans l'axe du spray. Chaque pixel de l'image est associé à un niveau de gris compris entre 0 (noir) et 255



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Cold

FIGURE 3.11 – (a) Image moyenne de 5 000 images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge pour le cas à l'ambiant. (b) Image moyenne de 10 000 images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge pour le cas à froid.

(blanc) représentant le niveau de luminosité observé. La Figure 3.12 présente les niveaux de gris pour les décharge d'eau et de Novec1230™ aux deux températures. On observe

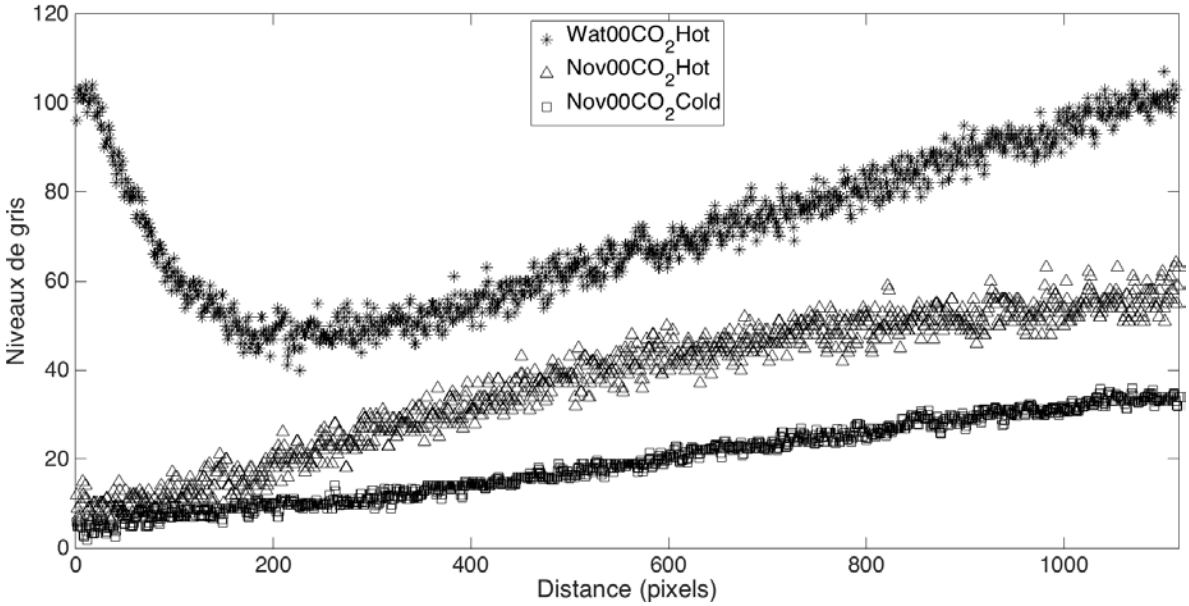


FIGURE 3.12 – Niveaux de gris sur l'axe du spray ($y = 0$) pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote en conditions de température ambiante et froide. Échelle des niveaux de gris : 0 (noir) à 255 (blanc).

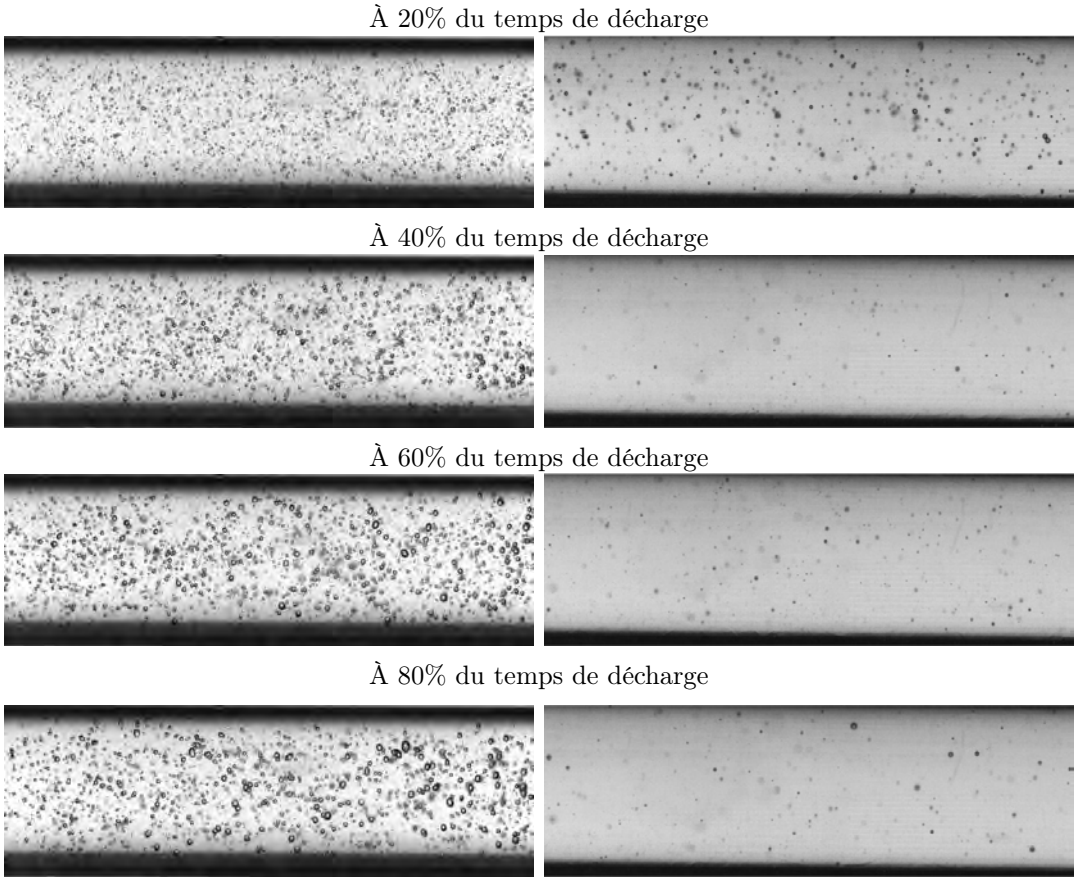
que dans le cas du Novec1230™ à froid, l'intensité lumineuse est encore plus faible qu'à l'ambiant. Les rayons lumineux sont encore plus déviés par la présence de filaments de

liquide entourés du nuage de gouttelettes.

3.3.3 Visualisation de l'écoulement en amont de la buse

On visualise maintenant l'écoulement en amont de la buse dans la veine transparente. Pour cette condition, la caméra fonctionne à la fréquence de 5 000 Hz et une résolution de 1 280 x 800 pixels. Le temps d'exposition est fixé à 10 μs. Avec ces réglages, la caméra permet l'acquisition de 158 000 images consécutives, soit un temps d'enregistrement de 31,6 secondes.

La Figure 3.13 compare les images instantanées obtenues lors de la visualisation de l'écoulement en amont de la buse pour une décharge au Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C) et à froid (-20°C). Le sens de l'écoulement est de la gauche vers la droite et les images sont présentées à 20%, 40%, 60% et 80% du temps de décharge. Le champ de la caméra est de 40 mm dans la direction de l'écoulement. La colonne de gauche (a) correspond à l'écoulement en amont



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov00CO_2Cold

FIGURE 3.13 – Visualisations de l'écoulement dans la veine transparente en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (a) et à froid (b) pressurisé à l'azote.

de la buse lors d'une décharge de Novec1230™ en conditions de température ambiante étudiée Section 3.7, et la colonne de droite (b) correspond à l'écoulement en amont de la buse lors d'une décharge de Novec1230™ à froid.

À froid, nous sommes également dans un régime d'écoulement à bulles. Nous sommes donc en présence d'une nucléation homogène. Cependant, il y a beaucoup moins de bulles qu'à l'ambiant et ces bulles ont un diamètre plus petit. On peut mesurer manuellement la taille de ces bulles. Leurs diamètres vont jusqu'à 0,3 mm (0,8 mm à l'ambiant). Pour deux températures, l'effervescence n'est pas la même. C'est un effet que l'on retrouve fréquemment dans le champagne ou les vins effervescents [46]. Plus la température est élevée et plus l'effervescence sera importante et les bulles d'autant plus grosses [11, 12, 47]. Dans le cas à froid, on remarque qu'à 20% du temps de décharge il y a plus de bulles qu'aux autres moments de la décharge. Si nous observons les images de l'écoulement dans la veine au tout début de la décharge, on voit apparaître les premières bulles à 1% du temps de décharge comme présentées sur la Figure 3.14. Il y a une forte densité de bulles à ce moment là, qui va diminuer au cours de la décharge jusqu'à 33% du temps de décharge, moment où l'écoulement ne compte plus que quelques bulles jusqu'à la fin de la décharge. Ces visualisations permettent de mettre en évidence la nucléation hétérogène par rapport à la nucléation homogène. Les premières bulles, qui sont ensuite évacuées dans l'écoulement à 33% du temps de décharge, sont le résultat de la nucléation hétérogène. Les bulles restantes durant toute la décharge sont le résultat de la nucléation homogène. La nucléation hétérogène est toujours présente, mais lorsqu'une nucléation homogène se produit il est difficile de les distinguer.

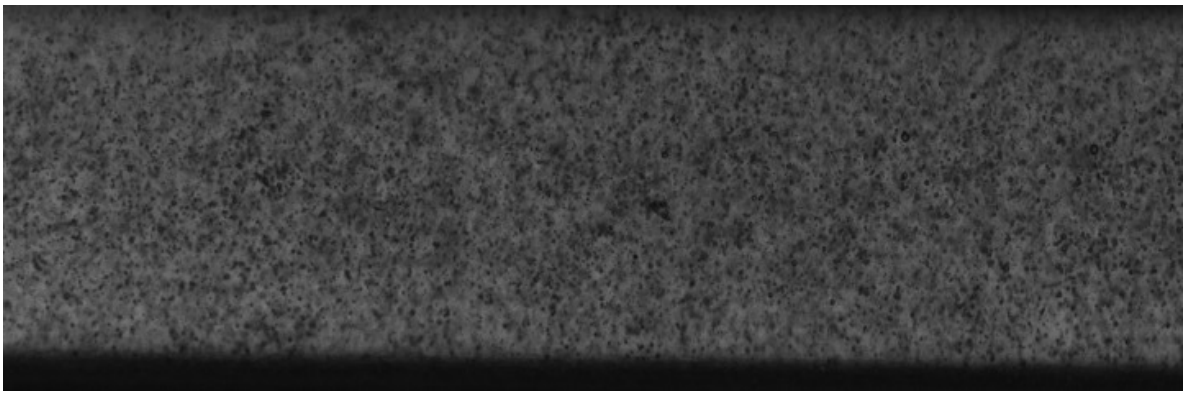
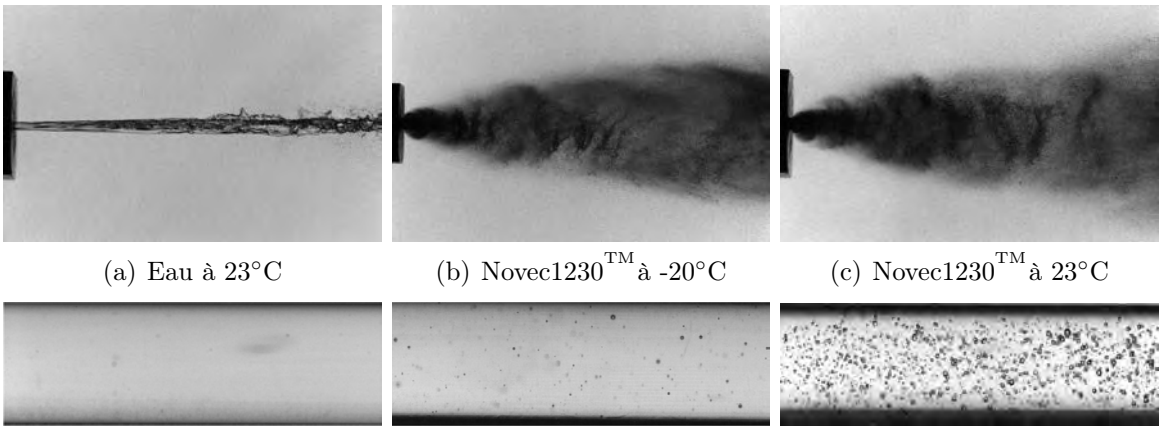


FIGURE 3.14 – Visualisation de l'écoulement dans la veine transparente à 1% du temps de décharge pour le cas Nov00CO_2Cold.

Les images acquises de l'écoulement en amont de la buse et du spray pour les décharges à l'eau et au Novec1230™ pour les deux températures étudiées sont résumées Figure 3.15 et permet de mettre en avant le fait que même à très faible taux de vide et avec le fort ΔP en sortie, le spray est fortement modifié.



(a) Eau à 23°C (b) Novec1230™ à -20°C (c) Novec1230™ à 23°C

FIGURE 3.15 – Comparaison des visualisations expérimentales pour les trois cas à 80% du temps de décharge.

3.4 Modélisation de l'évolution de la pression au cours d'une décharge

L'objectif est de modéliser les décharges expérimentales afin d'avoir un modèle prédictif (effet de la pression et de la température initiale) de notre banc de décharge. Pour cela, les équations thermodynamiques nous permettent d'obtenir une bonne approximation de l'évolution de la pression dans la bouteille en fonction du temps lors d'une décharge de liquide pressurisé avec un gaz propulsif (très faiblement soluble), ici l'azote. Dans un premier temps, nous modélisons la détente du gaz pur pour la comparer avec une détente expérimentale de notre système (cf. Section 3.4.1). Puis, nous modélisons la décharge d'un liquide pressurisé à l'azote (cf. Section 3.4.2). Il s'agit d'un modèle à phases séparées. Il permet de prédire la fin de décharge de l'agent. Pendant la décharge, on suppose qu'il n'y a pas d'échange de chaleur et qu'il y a conservation de la masse de la phase liquide et de la phase vapeur. Toutes les unités pour les équations sont en unité du Système International SI.

3.4.1 Modèle d'une détente de gaz pur

Dans un premier temps, nous modélisons la détente d'un gaz pur, ici l'azote, et nous vérifions que nous l'obtenons bien expérimentalement. L'écoulement est considéré

comme adiabatique, il n'y a pas de transfert de chaleur entre le système et l'extérieur, la décharge étant rapide, $\dot{Q} = 0$. Pour étudier le comportement thermodynamique, nous avons besoin de l'équation de continuité et de l'équation de conservation d'énergie. L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho \, dV + \int_S \rho \, u \cdot dS = 0 \tag{3.5}$$

Sous l'hypothèse que l'écoulement est quasi-stationnaire, la masse volumique ρ est uniforme dans tout le volume, on peut donc l'extraire de l'intégrale. Le volume de la bouteille V est également constant, on peut donc également l'extraire de la dérivée par rapport au temps, laissant la masse volumique dépendant du temps. En connaissant la formule du débit massique, $\dot{m} = \rho \, u \, S = \frac{P}{RT} \, u \, S$, l'équation de continuité devient :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\dot{m}}{V} = 0 \tag{3.6}$$

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t}\int_V e_T \, \rho \, dV + \int_S (e_T + p \, V)\rho \, u \cdot dS \tag{3.7}$$

Les forces de cisaillement sont négligées, soit $\dot{W} = 0$. L'écoulement étant adiabatique, $\dot{Q} = 0$. L'énergie interne e est définie telle que :

$$e_T = e + \frac{u^2}{2} + gz \tag{3.8}$$

En l'incluant dans l'équation 3.7, et en supposant que l'écoulement est à 1 dimension et que l'énergie potentielle gravitationnelle est négligée ($gz = 0$), l'équation de continuité peut être écrite en fonction de l'enthalpie. En résolvant l'intégrale, on obtient l'équation finale :

$$\frac{d}{dt}(\rho \, e) + \frac{\dot{m}}{V} \, h = 0 \tag{3.9}$$

En combinant ensuite l'équation de continuité et d'énergie pour supprimer le débit massique et le volume comme variable, on obtient :

$$\frac{d}{dt}(\rho \, e) - \frac{d\rho}{dt} \, h = 0 \tag{3.10}$$

Le fluide étant considéré comme parfait, $P = \rho \, R \, T$ et, C_v et C_p sont constants.

$$e = C_v \, T \tag{3.11}$$

$$h = C_p \, T \tag{3.12}$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \tag{3.13}$$

En utilisant ces formules dans l'équation 3.10, on obtient les équations d'un processus isentropique telles que :

$$T^* = \frac{T}{T_i} = \left(\frac{P}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \tag{3.14}$$

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_i} = \left(\frac{P}{P_i}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \tag{3.15}$$

L'indice i correspond à l'état initial. Dû à la différence de pression élevée entre la pression dans la bouteille et la pression extérieure, l'écoulement correspond à un écoulement amorcé en sortie (Mach = 1) [48]. On dit qu'il est choqué. Dans ce cas, le débit massique s'exprime par la formule de Fliegner, qui est indépendant de la pression et dépendant de l'indice adiabatique γ. Sachant que $\dot{m} = \rho\, uS = \frac{P}{RT} uS$ et $c = \sqrt{\gamma\, R\, T}$, on peut écrire le débit massique ainsi :

$$\dot{m} = S \frac{P}{R\,T} \sqrt{\gamma\, R\, T} \tag{3.16}$$

$$\dot{m} = S\, P \sqrt{\frac{\gamma}{R\,T}} \tag{3.17}$$

$$\dot{m} = S\, P_i \left(\frac{P}{P_i}\right) \left(\frac{\gamma}{R\,T_i}\right)^{1/2} \left(\frac{T_i}{T}\right)^{1/2} \tag{3.18}$$

Sachant que pour un écoulement choqué, $M = 1$, on a,

$$\frac{T_i}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M = \frac{1+\gamma}{2} \tag{3.19}$$

$$\frac{P_i}{P} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2}\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{3.20}$$

$$\frac{\rho_i}{\rho} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2}\right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \tag{3.21}$$

Le débit massique devient alors :

$$\dot{m} = SP_i \left[1 + \frac{\gamma-1}{2}\right]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{\gamma}{RT_i}\right)^{1/2} \left[\frac{1+\gamma}{2}\right]^{1/2} \tag{3.22}$$

Après simplification des exposants, on obtient :

$$\dot{m} = \frac{SP_i}{\sqrt{R\,T_i}} \sqrt{\gamma} \left[1 + \frac{\gamma-1}{2}\right]^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \tag{3.23}$$

Soit,

$$m^* = \frac{\dot{m}\sqrt{RT_i}}{SP_i} = \sqrt{\gamma}\left[1 + \frac{\gamma - 1}{2}\right]^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \tag{3.24}$$

En introduisant cette équation dans l'équation de continuité 3.6, on obtient :

$$\frac{d\rho^*}{dt^*} + \frac{m^*}{\sqrt{\gamma}}\frac{P^*}{\sqrt{T^*}} = 0 \tag{3.25}$$

Avec $\rho^* = \rho/\rho_i$, $P^* = P/P_i$ et $T^* = T/T_i$. En remplaçant les variables par les relations isentropiques, on peut exprimer l'évolution de la pression en fonction du temps :

$$P^* = \left[1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right)\left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} t^*\right]^{\frac{-2\gamma}{(\gamma-1)}} \tag{3.26}$$

Avec $t^* = t/t_{char}$, et $t_{char} = V/(C_d\, S\, c_{gaz})$. c_{gaz} étant la vitesse du son initiale du gaz et C_d étant le coefficient de décharge fixé à 0,61 pour une buse simple orifice [1, 49]. Le coefficient de décharge C_d permet de relier le modèle idéalisé de Bernoulli à la réalité. Il caractérise la contraction locale de l'écoulement liée à la présence d'un orifice. C'est une constante sans dimension allant de 0,61 à 0,81 selon le système [1].

La Figure 3.16 présente les courbes de l'évolution temporelle de la pression pour une décharge d'azote pur. On remarque que nous avons un écart allant jusqu'à 8 % par rapport au modèle.

3.4.2 Modèle d'une décharge de liquide pressurisé avec un gaz propulsif

Dans cette section on modélise la décharge d'un liquide pressurisé avec un gaz propulsif. D'une part une décharge d'eau pressurisée à 40 bar d'azote. Et d'autre part, une décharge de Novec1230™ pressurisé à 40 bar d'azote. Il s'agit d'un modèle à phases séparées. Les pertes de charges sont faibles (de l'ordre de quelques bar) dans le système donc négligées dans le modèle. Les pertes de charge singulières sont principalement pilotées par la buse en sortie. Par exemple, l'électrovanne, qui est le plus gros élément du banc, est représentée par deux coudes successif. Le coefficient de perte de charge ξ d'un coude est de 2, donc $\xi_{EV} = 4$ dans notre cas. Les pertes de charge singulières s'expriment ainsi :

$$\Delta P = \xi_{EV}\,\frac{1}{2}\,\rho_L\,u_L^2 = \xi_{EV}\,\frac{1}{2}\,\rho_L\left(\frac{S_{buse}}{S_{EV}}\,u_{buse}\right)^2 = 40\,305\,\text{Pa} \quad \text{soit } 0,403\,\text{bar} \tag{3.27}$$

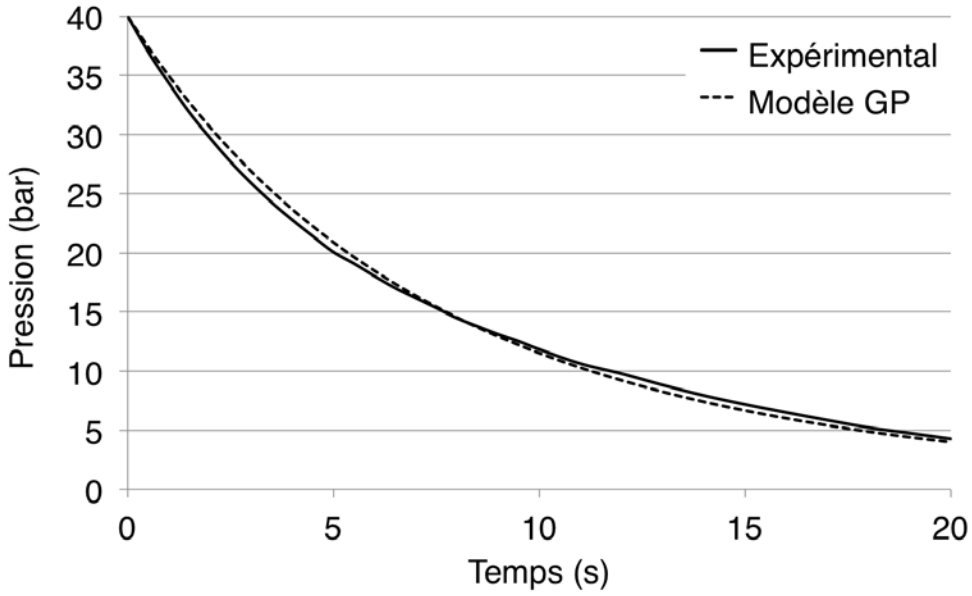


FIGURE 3.16 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une détente d'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$, $c_{N2} = 350,7\ m/s$ et $\gamma = 1,4$.

Modèle de décharge idéale.

On considérant un processus isentropique et une phase vapeur idéale (ciel gazeux dans la bouteille), la Loi de Laplace (second principe de la thermodynamique) donne :

$$P_G\, V_G^{\gamma} = 0 \tag{3.28}$$

Avec P_G la pression du gaz, V_G le volume du gaz (ciel gazeux dans la bouteille). On applique une dérivée logarithmique par rapport au temps à l'équation (3.28) et on obtient :

$$\frac{1}{P_G}\,\frac{dP_G}{dt} + \frac{\gamma}{V_G}\,\frac{dV_G}{dt} = 0 \tag{3.29}$$

La vidange du liquide est considérée comme un écoulement incompressible, on peut donc écrire :

$$\frac{d\,(V_L + V_G)}{dt} = 0 \tag{3.30}$$

$$\frac{dV_L}{dt} = -\frac{dV_G}{dt} \tag{3.31}$$

Avec V_L le volume de liquide. On exprime le débit volumique de liquide en fonction de la vitesse du liquide u_L :

$$\frac{dV_L}{dt} = -u_L\, S_{buse} \tag{3.32}$$

$$u_L = C_d \sqrt{\frac{2\,(P_G - P_a)}{\rho_L}} \tag{3.33}$$

Avec P_a la pression atmosphérique, S_{buse} la section de sortie de la buse, ρ_L la masse volumique du liquide et C_d le coefficient de décharge. Ce coefficient de décharge est une constante propre à la buse utilisée, dans notre cas on utilise une buse à simple orifice. Le coefficient de décharge est de 0,61 [1, 49]. À partir de l'équation 3.29 et l'équation 3.32, on exprime le débit volumique du gaz :

$$\frac{dV_G}{dt} = -\frac{V_G}{\gamma\, P_G}\frac{dP_G}{dt} = u_L\, S_{buse} \tag{3.34}$$

On peut également écrire :

$$P_G\, V_G^{\gamma} = P_i\, V_i^{\gamma} \tag{3.35}$$

Avec P_i la pression initiale et V_i le volume de la bouteille. On peut ainsi exprimer, à partir de l'équation 3.34 et l'équation 3.35 la variation temporelle de la pression du gaz P_G :

$$\frac{dP_G}{dt} = -\frac{\gamma\, P_G\, S_{buse}}{\left(\frac{P_i}{P_G}\right)^{1/\gamma}\, V_i}\, u_L \tag{3.36}$$

$$\frac{dP_G}{dt} = -\frac{\gamma\, S_{buse}}{(P_i)^{1/\gamma}\, V_i} {P_G}^{\frac{1+\gamma}{\gamma}}\, u_L \tag{3.37}$$

Finalement on en déduit :

$$\frac{dP_G}{dt} = -\alpha\, {P_G}^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \sqrt{P_G - P_a} \tag{3.38}$$

Avec α une constante telle que :

$$\alpha = \frac{C_d\, \gamma\, S_{buse}}{V_i\, {P_i}^{1/\gamma}} \sqrt{\frac{2}{\rho_L}} \tag{3.39}$$

Si on discrétise l'équation (3.38) grâce à la méthode d'Euler du premier ordre, on obtient :

$$P_{G,i+1} = P_{G,i} - \alpha\, \Delta t\, {P_{G,i}}^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \sqrt{P_{G,i} - P_a} \tag{3.40}$$

Avec Δt, le pas de temps appliqué.

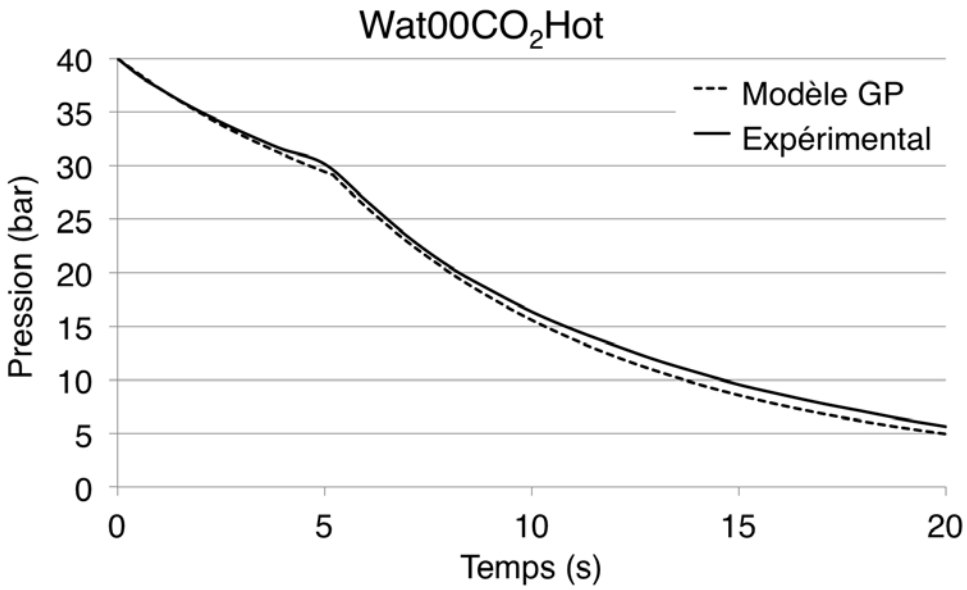


FIGURE 3.17 – Évolution temporelle de la pression pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$.

Comparaison des courbes expérimentales et théoriques.

La Figure 3.17 présente l'évolution temporelle de la pression pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote expérimentale et théorique. L'indice adiabatique γ est de 1,4. Le modèle est adapté à la modélisation d'une décharge de liquide pressurisée l'azote pour une température de 23°C et une pression initiale de 40 bar. La Figure 3.18 présente l'évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote expérimentale et théorique en conditions de température ambiante (23°C). Le temps de décharge calculé par le modèle est de 6,5 secondes et est assez bien prédit, le temps de décharge expérimental mesuré étant de 6,63 secondes. Néanmoins on remarque que le modèle n'est pas adapté à la modélisation de cette décharge. On observe un décalage en pression en fin de décharge. Expérimentalement, le liquide est totalement déchargé à 31,6 bar alors que la pression de fin de décharge calculée par le modèle est de 29,2 bar soit une différence de 2,4 bar. Pour expliquer cette différence de pression, la phase liquide contient initialement 1,4% en masse d'azote dissous (cf. Tableau 3.4) soit 4,4 grammes d'azote sous forme liquide. D'autre part, dans la bouteille, le ciel gazeux (Novec1230™ + N_2) représente une masse totale de 43,3 grammes. Par conséquent, si tout l'azote dissout dans le liquide venait à se dégazer entièrement du Novec1230™ lors d'une décharge, ceci pourrait conduire à une hausse de pression de l'ordre de 10%, soit environ 3 bar. Ceci est une hypothèse car ces calculs sont basés sur les chiffres donnés par ProSim sur la composition des phases. Néanmoins, ce raisonnement qualitatif pourrait être une piste d'explication de l'écart observé entre le modèle et les données

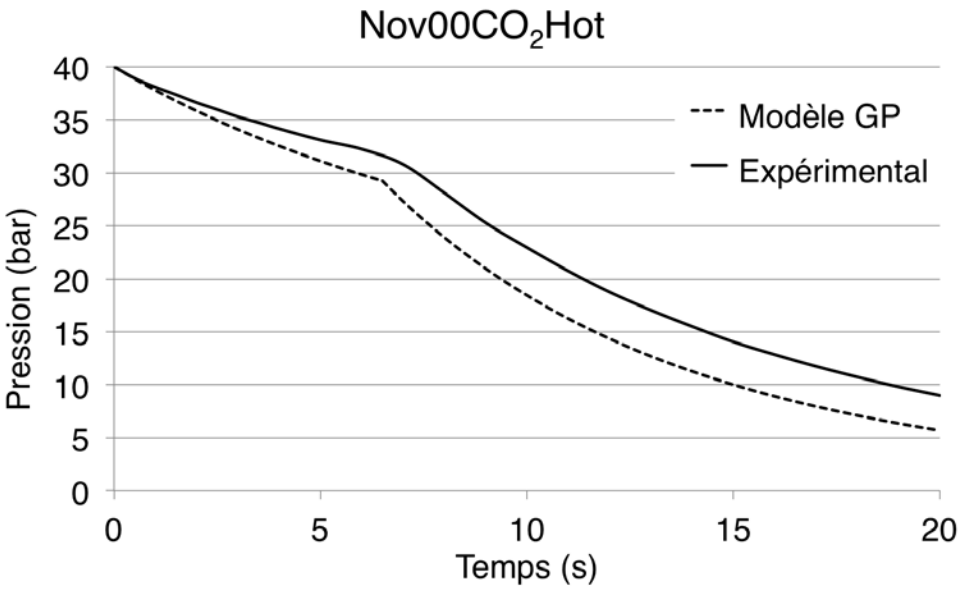


FIGURE 3.18 – Évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$.

expérimentales Figure 3.18.

La Figure 3.19 présente l'évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote expérimentale et théorique à froid (-20°C). Nous remarquons que le temps de décharge calculé par le modèle coïncide avec le temps de décharge expérimental. Concernant les pressions en fin de décharge, nous observons toujours un décalage dû à l'azote dissous qui semble plus faible qu'à l'ambiant. Conformément aux visualisations de l'écoulement dans le tube Figure 3.13, le dégazage est nettement plus faible. Expérimentalement, le liquide est totalement déchargé à 31 bar alors que la pression de fin de décharge calculée par le modèle est de 29,3 bar soit une différence de 1,7 bar. Les compositions initiales dans le ciel gazeux sont différentes (cf. Tableau 3.4). L'azote compose majoritairement la phase vapeur, ce qui est plus proche du modèle à phases séparées. Nous appliquons la même méthode de calcul qu'à ambiant pour avoir une approximation de la haute de pression dû au gaz dissous. La phase liquide contient initialement 1,5% en masse d'azote dissous (cf. Tableau 3.4) soit 4,7 grammes d'azote sous forme liquide. D'autre part, dans la bouteille, le ciel gazeux (Novec1230™ + N_2) représente une masse totale de 55,9 grammes. Par conséquent, si tout l'azote dissout dans le liquide venait à se dégazer entièrement du Novec1230™ lors d'une décharge, ceci pourrait conduire à une hausse de pression de l'ordre de 8%, soit environ 2,5 bar.

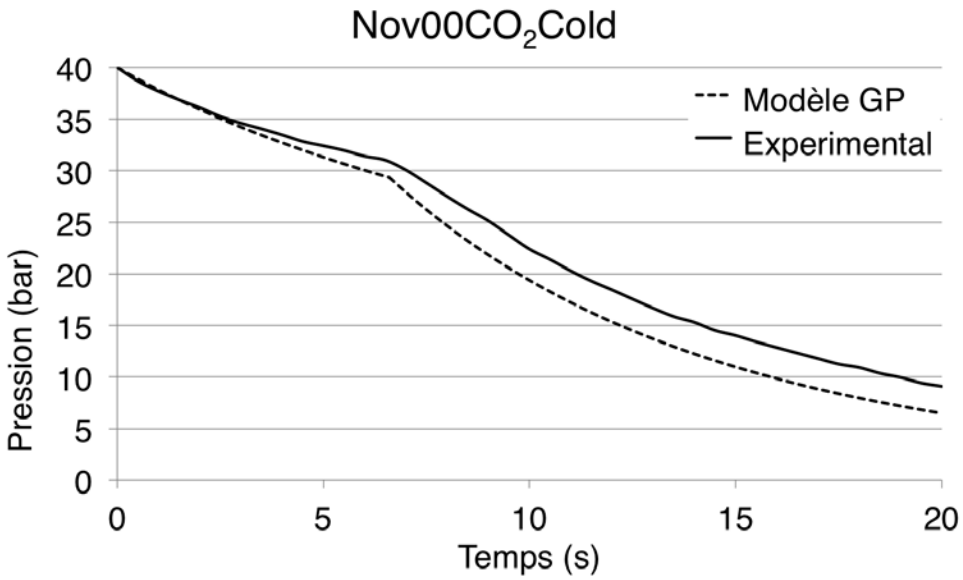


FIGURE 3.19 – Évolution temporelle de la pression pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote à froid (-20°C). Pression initiale : 40 bar, $C_d = 0,61$ et $\gamma = 1,4$.

Ce modèle permet d'obtenir une bonne approximation de l'évolution de la pression dans la bouteille en fonction du temps lors d'une décharge pressurisé avec un gaz propulsif comme c'est le cas pour une décharge d'eau/N_2. Dans le cas d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote, le temps de décharge est prédit. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de prédire le taux de vide induit par la présence de bulles due à la faible dissolution de l'azote, que ce soit en conditions de température ambiante ou à froid due à la complexité du problème.

3.5 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux de décharges de liquide pressurisé avec un gaz propulsif. Dans le cadre de notre étude, il s'agit de décharge d'eau et de Novec1230™ pressurisés à 40 bar d'azote, un gaz très peu soluble dans les deux liquides. Ces décharges sont réalisées à iso-volume de liquide (200 mL) et à deux températures de bouteille : à chaud (+23°C) et à froid (-20°C).

Les données de pression acquises dans la bouteille de décharge au cours d'une décharge, permettent d'obtenir l'évolution de la pression au cours du temps. D'après les courbes de pression et grâce au suivi temporel des décharges par caméra rapide, on peut déterminer le temps de chaque décharge.

En conditions de température ambiante (+23°C), pour une décharge eau/N_2, le temps de décharge est mesuré à 5 secondes et pour une décharge Novec1230^{TM}/N_2 le temps de décharge mesuré est de 6,6 secondes. À froid (-20°C), le temps de décharge pour une décharge Novec1230^{TM}/N_2 est également de 6,6 s. On distingue deux régimes lors d'une décharge : un régime hydraulique correspondant à la vidange du liquide pressurisé, et un régime pneumatique correspondant à la purge du ciel gazeux restant dans la bouteille de décharge. La durée d'une décharge est pilotée par la pression test initiale et le volume initial de liquide, qui sont les mêmes pour les deux liquides. Les propriétés chimiques jouent un rôle dans le temps de décharge. Le Novec1230^{TM}a une masse volumique plus importante que l'eau ce qui contribue à l'augmentation du temps de décharge.

Les visualisations par caméra rapide ont montré la présence de bulles dans l'écoulement en amont de la buse lors des décharges de Novec1230^{TM}/N_2. Cette présence de bulles est dû au dégazage de l'azote dissous. Le logiciel ProSim confirme qu'une faible quantité d'azote, inférieure à 2% en masse, se dissout dans le Novec1230^{TM}, que ce soit en conditions de température ambiante et froide. Cependant, on observe que le dégazage est plus faible à froid qu'à chaud, la température jouant un rôle important sur la dissolution et le dégazage, d'où une présence de bulles moins importante. Plus la température sera élevée et plus l'effervescence sera importante avec des bulles d'autant plus grosses.

Les images du spray ont montrés que la présence de bulles en amont de la buse modifiait la structure du spray en sortie. Pour une décharge eau/N_2, le jet est de forme cylindrique d'un diamètre de la taille de l'orifice (1 mm), et les forces aérodynamiques résultant du cisaillement de l'air ambiant déforment l'interface. Le jet reste relativement compact puis à une dizaine de diamètres se forment des ligaments et les premières gouttes sont arrachées. Nous sommes en présence d'un processus d'atomisation globalement inefficace. Pour une décharge Novec1230^{TM}/N_2, le spray est considérablement modifié. En conditions de température ambiante, l'angle d'ouverture est mesuré à 91°. Les bulles en amont de la buse provoquent l'éclatement du liquide en filaments et gouttelettes dès la sortie, et la détente rapide des bulles favorisent la fragmentation de ces filaments en gouttelettes. Ces résultats montrent qu'à très faible quantité de gaz dissous, le spray est fortement modifié. C'est également le cas à froid. Néanmoins, l'angle d'ouverture est plus faible qu'à chaud. Il est mesuré à 62°. C'est également ce qu'ont observé Elliott et al. ainsi que Yang et al. [5, 19] lors de décharge d'Halon1301 ou d'agents alternatifs pressurisés à l'azote : à froid, l'angle du spray est plus étroit.

Un modèle du banc de décharge est mis en place. Ce modèle prédictif (effet de la pression et de la température initiale) basé sur les équations thermodynamique permet d'obtenir l'évolution de la pression dans la bouteille de décharge en fonction des conditions initiales. Ce modèle nous permet d'obtenir une bonne approximation de l'évolution de la pression dans la bouteille en fonction du temps lors d'une décharge

pressurisée avec un gaz propulsif comme c'est le cas pour une décharge d'eau/N_2. Dans le cas d'une décharge de Novec1230^{TM} pressurisé à l'azote, le temps de décharge est prédit. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de prédire le taux de vide induit par la présence de bulles due à la faible dissolution de l'azote, que ce soit en conditions de température ambiante (1,4% en masse d'azote) ou à froid (1,5% en masse d'azote) due à la complexité du problème.

Nous sommes donc en présence du phénomène d'atomisation effervescente. Ces premiers résultats expérimentaux permettent d'avoir un point de référence pour l'étude de l'impact des gaz dissous sur le processus d'atomisation, détaillé en Chapitre 4.

Chapitre 4

Effet du dioxyde de carbone, un gaz hautement soluble, sur le processus d'atomisation

4.1 Objectifs

Dans le Chapitre 3, nous avons observé que pour le cas d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote, une faible quantité d'azote (inférieure à 2% en masse) se dissolvait dans l'agent que ce soit en conditions de température ambiante (+23°C) ou à froid (-20°C). Cette faible quantité de gaz dissous a pour conséquence la formation de bulles dans l'écoulement en amont de la buse au cours de la décharge. La présence de bulles diminue la masse volumique moyenne du fluide et donc diminue le débit massique, ce qui a pour conséquence d'augmenter le temps de décharge du liquide. Les images acquises ont également montré que la présence de bulles modifiait la structure du spray et son angle. Le spray subit une extension radiale très rapide en aval de la buse avec la formation d'un nuage de gouttes autours de ligaments verticaux dont il n'est pas possible de déterminer s'il s'agit d'une phase continue ou d'une phase dispersée dense. La littérature nous permet de faire la corrélation avec le type de structure obtenu dans le cas de l'atomisation dite "effervescente" et "aérée". Dans ce chapitre, on s'intéresse donc aux mécanismes fondamentaux qui interviennent lors de la décharge d'un liquide contenu dans une bouteille pressurisée avec un gaz hautement soluble dans ce liquide, le dioxyde de carbone. L'eau et le Novec1230™ sont testés et une variation de la composition initiale (variation de la quantité de CO_2) dans la bouteille de décharge permet d'étudier l'influence de la quantité de gaz dissous sur les phénomènes intervenant lors d'une décharge. L'azote, qui reste le gaz propulsif faiblement soluble, vient compléter certains cas tests afin d'être à iso-pression initiale de 40 bar à chaque essai. De plus, on étudie pour le cas du Novec1230™ l'influence de la température initiale de la bouteille en réalisant des essais à -20°C. Le Tableau 4.1 résume les conditions expérimentales pour les essais étudiés dans ce chapitre. Deux moyens de diagnostic sont mis en oeuvre

Temp. [°C]	Liquide	Gaz	Nomenclature	$\%_{masse}$ CO_2
+23	Eau	CO_2	Wat21CO_2Hot	21%
	Novec1230™	CO_2 + N_2	Nov17CO_2Hot	17%
		CO_2	Nov33CO_2Hot	33%
+11			Nov50CO_2Hot	50%
-20		CO_2 + N_2	Nov17CO_2Cold	17%
			Nov33CO_2Cold	33%
			Nov50CO_2Cold	50%

TABLE 4.1 – Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés au dioxyde de carbone et à l'azote.

(cf. Chapitre 2). On enregistre d'une part l'évolution temporelle de la pression dans la bouteille de décharge. Ces données permettent de mesurer en particulier la durée d'une décharge. D'autre part, on utilise la caméra rapide pour visualiser l'écoulement dans la veine transparente ainsi que le spray en sortie de buse. Tous ces diagnostics sont synchronisés avec l'ouverture de l'électrovanne. L'objectif étant de contrôler la bonne atomisation et vaporisation du liquide, on sera particulièrement attentif aux phénomènes affectant la forme du spray et sa dynamique.

4.2 Influence du dioxyde de carbone à concentration modérée

Dans un premier temps, des décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à concentration modérée de CO_2, 21% et 17% en masse respectivement, en conditions de température ambiante, sont présentées. Ces décharges sont également comparées aux décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote présentées Chapitre 3. La préparation d'un essai débute par le remplissage de la bouteille de décharge avec 200 mL de liquide. La bouteille est ensuite pressurisée au dioxyde de carbone et complétée à l'azote dans le cas du Novec1230™, jusqu'à la pression test de 40 bar. Comme expliqué Chapitre 2 Section 2.1.6, la quantité de CO_2 est exprimée en pourcentage de la masse du mélange (définie comme étant la somme de la masse de Novec1230™ et de CO_2) qui est directement liée à la pression de CO_2 injectée dans la bouteille. Autrement dit, une décharge d'eau pressurisée à 40 bar de dioxyde de carbone correspond à 21% en masse de CO_2 injecté et une décharge de Novec1230™ pressurisé à 20 bar de dioxyde de carbone (puis complété de 20 bar d'azote) correspond à 17% en masse de CO_2. Le Tableau 4.2 reprend les conditions expérimentales des cas présentés dans cette section. La stabilisation de la pression et de la température de la bouteille nous indique que le

système est à l'équilibre. La bouteille est alors prête pour une décharge.

Temp. [°C]	Liquide	Gaz	Nomenclature	$\%_{masse}$ CO_2
+23	Eau	N_2	Wat00CO_2Hot	0%
		CO_2	Wat21CO_2Hot	21%
	Novec1230™	N_2	Nov00CO_2Hot	0%
		CO_2 + N_2	Nov17CO_2Hot	17%

TABLE 4.2 – Conditions expérimentales pour les décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à concentration modérée de dioxyde de carbone.

4.2.1 Décharge d'eau pressurisée à concentration modérée de CO_2

Évolution de la pression au cours d'une décharge

La Figure 4.1 présente l'évolution de la pression dans la bouteille au cours du temps pour l'eau en conditions de température ambiante (cf. Tableau 4.2). Comme expliqué dans le Chapitre 3, on distingue un régime *hydraulique* et un régime *pneumatique* pour les décharges avec une rupture de pente entre les deux. L'ouverture de l'électrovanne a lieu à $t = 0$ s (point 1 sur la Figure 4.1) et tous les diagnostics sont synchronisés sur ce temps. La rupture de pente au point 2 permet la détermination du temps de décharge. Dans le cas d'une décharge d'eau pressurisé à l'azote (Wat00CO_2Hot), le temps de décharge est mesuré à 5 secondes (cf. Chapitre 3), et pour une décharge d'eau pressurisé au dioxyde de carbone (Wat21CO_2Hot), le temps de décharge est mesuré à 5,2 secondes. Le temps de décharge du liquide est déterminé au premier ordre par la pression initiale dans la bouteille et le volume initial de liquide (taux de remplissage). Ces deux grandeurs sont identiques pour tous les tests. Dans le Chapitre 3, nous avons mis en avant que la présence d'un gaz dissous augmentait le temps de décharge du liquide. On observe également une différence de pression de 1 bar en fin de décharge, nous pouvons donc supposer qu'il a un dégazage du gaz initialement dissous dans l'eau lors de la décharge. En utilisant le logiciel ProSim, on peut calculer la composition initiale des phases dans la bouteille et donc déterminer la quantité de dioxyde de carbone en solution dans l'eau initialement. Le Tableau 4.3 résume la composition initiale des phases pour les décharges d'eau à la pression initiale de 40 bar et à +23°C. La masse de CO_2 dissoute dans l'eau, bien qu'elle reste très faible, est supérieure à la quantité d'azote dissoute (0,1% en masse de CO_2 contre 0,0006% en masse d'azote), ce qui est consistant avec le temps de décharge un peu plus long dans le cas à 21% en masse de CO_2. Les images de l'écoulement en amont de la buse présentées ci-après nous permettent d'avoir d'autres éléments pour la compréhension physique de ces décharges.

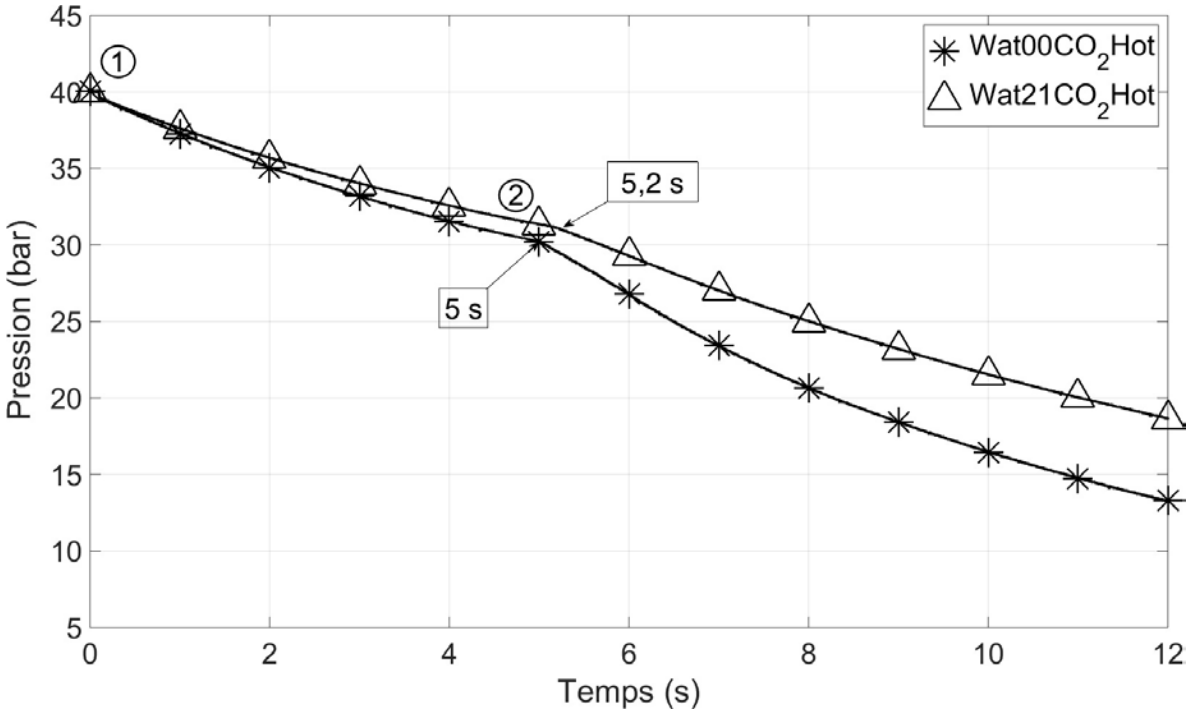


FIGURE 4.1 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge d'eau pressurisé à l'azote (Wat00CO_2Hot) et d'une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone (Wat21CO_2Hot) en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Eau	Gaz	Eau	Gaz
Wat00CO2Hot	86%		14%	
	>99,9%	0,0006%	0,05%	99,95%
Wat21CO2Hot	84%		16%	
	99,9%	0,1%	0,04%	99,96%

TABLE 4.3 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C). Pression : 40 bar.

La Figure 4.2 présente l'évolution temporelle expérimentale et théorique de la pression pour les décharges d'eau. Dans le cas du dioxyde de carbone, on utilise l'équation d'état de Peng-Robinson (PR) pour modéliser la décharge. Le temps de décharge est prédit mais on remarque que le modèle n'est pas adapté à la modélisation de cette décharge. En effet, le modèle fait l'hypothèse que l'écoulement est à phases séparées et s'il y a un flux entre les deux phases, tel qu'un dégazage ou la présence de bulles

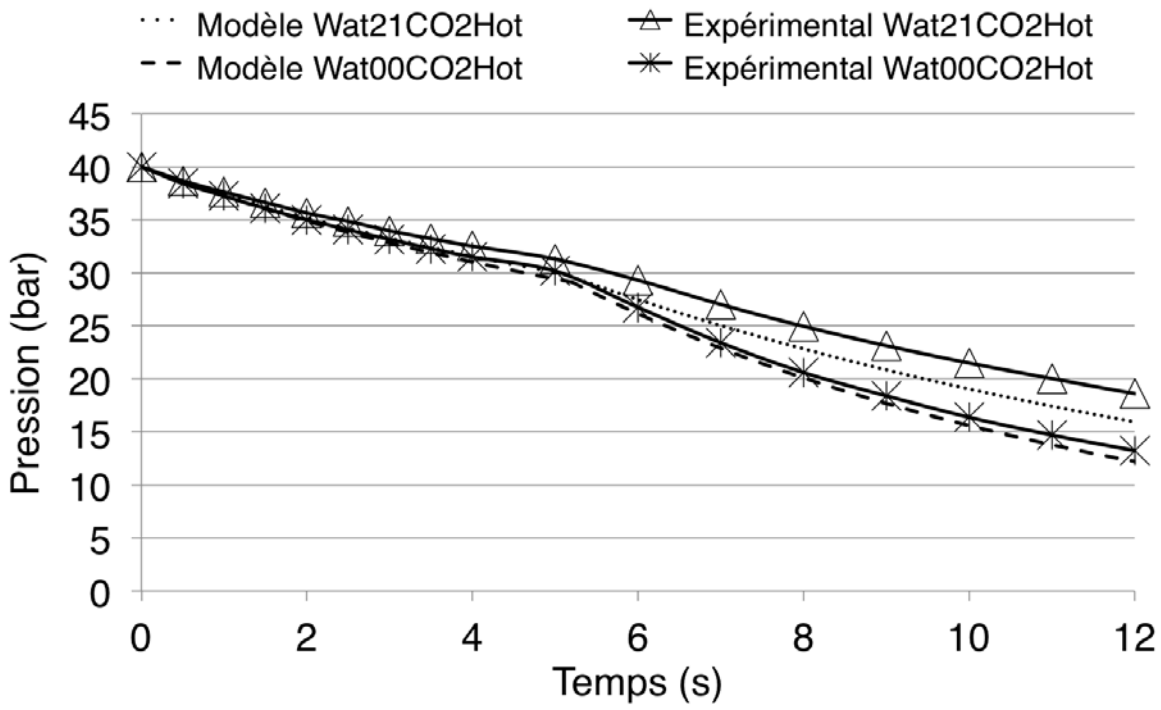


FIGURE 4.2 – Évolution temporelle théorique et expérimentale de la pression dans la bouteille au cours des décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C). Pression : 40 bar, $C_d = 0,61$.

dans le liquide, alors la pression dans la bouteille ainsi que le débit de liquide en sortie seront faux. Expérimentalement, l'eau est totalement déchargée à 31,2 bar alors que la pression de fin de décharge calculé par le modèle est de 30 bar, soit une différence de 1,2 bar. Nous reprenons notre hypothèse présentée Chapitre 3 pour expliquer cet écart de pression en fin de décharge. La phase liquide contient initialement 0,1% en masse de CO_2 dissous (cf. Tableau 4.3) soit 0,21 grammes de dioxyde de carbone sous forme liquide. D'autre part, dans la bouteille, le ciel gazeux (eau + CO_2) représente une masse totale de 41,9 grammes. Par conséquent, si tout le dioxyde de carbone sous forme liquide venait à se dégazer entièrement de l'eau dans le ciel gazeux de la bouteille de décharge, lors d'une décharge, ceci pourrait conduire à une hausse de pression de l'ordre de 0,5%, soit environ 0,15 bar. Ce résultat est lié à l'hypothèse du dégazage des gaz dissous car ces calculs sont basés sur les chiffres donnés par ProSim sur la composition des phases. Néanmoins, ce raisonnement qualitatif pourrait être une des pistes d'explication de l'écart de pression observé en fin de décharge entre le modèle et les données expérimentales, car l'écart obtenu n'est pas du même ordre de grandeur que dans le cas d'une décharge à l'azote. D'autres facteurs doivent donc être pris en compte.

Imagerie par caméra rapide

Les réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie de buse et de l'écoulement en amont dans la veine transparente pour une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante, sont résumés Tableau 4.4. Le sens de l'écoulement va de gauche à droite et le champ de la caméra est de 40 mm pour l'écoulement dans la veine transparente, et de 47 mm pour le spray dans la direction de l'écoulement.

Visualisation	f [Hz]	Expo. [μs]	Résolution [px]	Nb d'images	Tps d'enreg. [s]
Spray	5 000	1	1280 x 800	40 000	8
Veine transparente	5 000	100	1280 x 304	66 772	13,35

TABLE 4.4 – Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges d'eau pressurisée au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

La Figure 4.3 présente les images obtenues pour une décharge à l'eau pressurisée à 40 bar d'azote (Wat00CO_2Hot). Ces images sont représentées en fonction du pourcentage du temps de décharge correspondant et sont étudiées Chapitre 3. L'écoulement est monophasique liquide tout au long de la décharge. Les points et taches qu'on aperçoit sur les images sont des défauts du verre et ne font pas partie de l'écoulement. En sortie de buse, le jet a une forme cylindrique et les forces aérodynamiques résultant du cisaillement avec l'air ambiant déforment l'interface. Le jet reste relativement compact et à une dizaine de diamètres, des ligaments se forment et les premières gouttes sont arrachées. La forme du spray ne dépend quasiment pas de la phase de la décharge, la baisse de pression au cours de la décharge a pour effet de diminuer la vitesse du liquide en sortie, ce qui a tendance à encore atténuer les processus menant à la formation de gouttes. Cet effet est cependant modeste car la pression baisse seulement de 25% entre le début et la fin de la décharge.

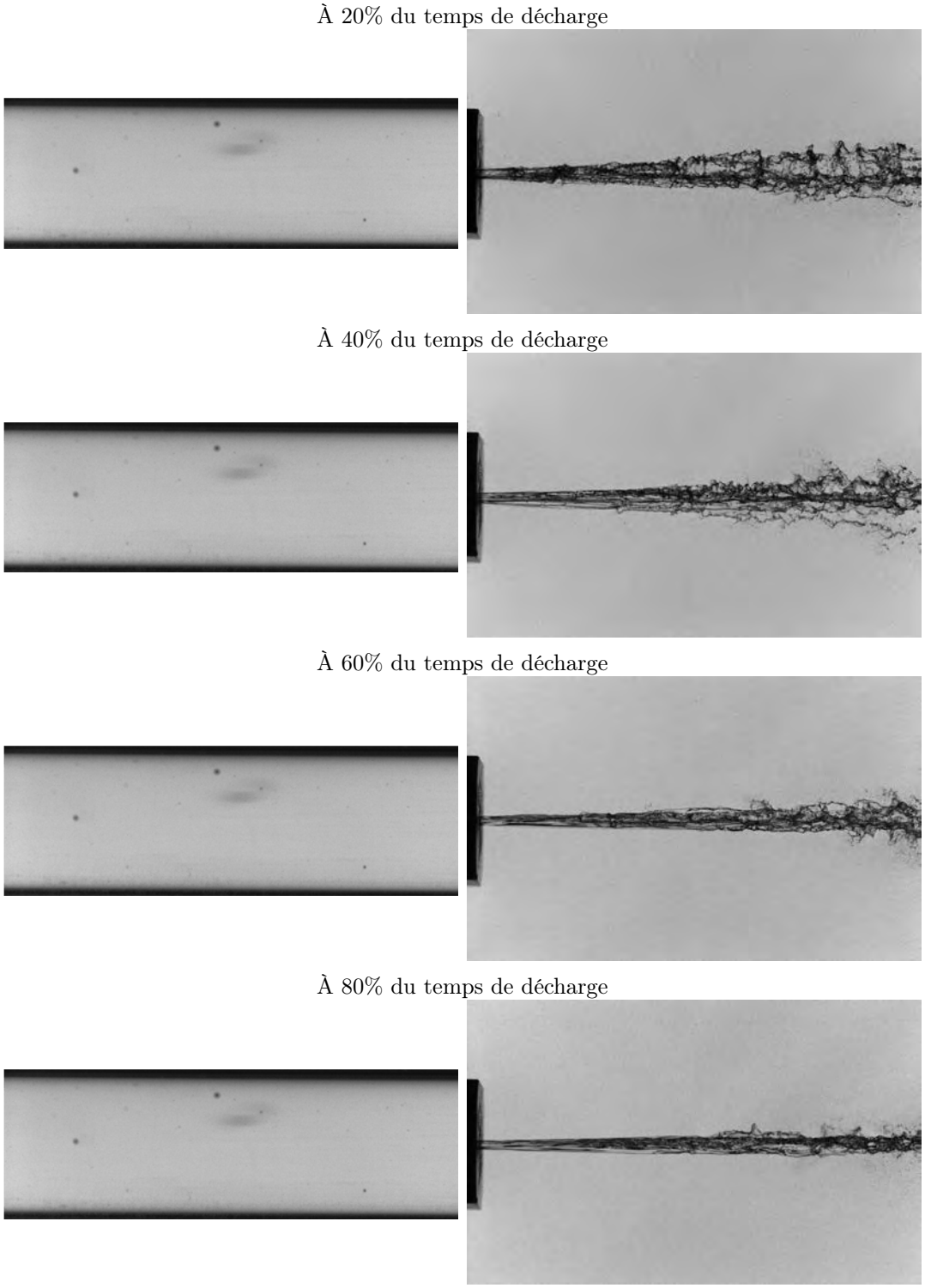
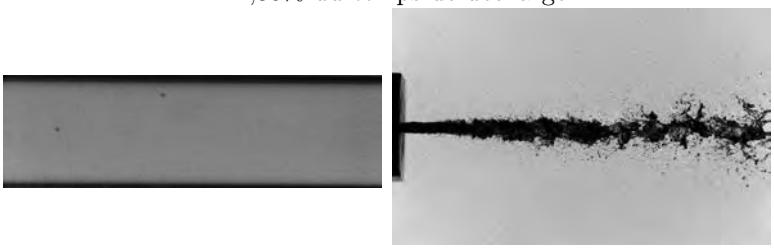


FIGURE 4.3 – Visualisations expérimentales pour une décharge d'eau pressurisée à l'azote, en conditions de température ambiante (+23°C).

On s'intéresse maintenant aux décharges d'eau pressurisée à 40 bar de dioxyde de carbone (Wat21CO_2Hot), ce qui correspond à 21% en masse de CO_2. Elles sont présentées Figure 4.4. Au début de la décharge, à 1,35% du temps de décharge, on observe que l'écoulement dans le tube devient plus sombre avec la présence de très petites bulles, tellement petites qu'elles apparaissent comme des points sur les images. Puis on voit apparaître les premières bulles à 4% de la décharge, qui grossissent, et qui sont complètement évacuées de l'écoulement à 35% du temps de décharge. Le tube redevient quasiment transparent jusqu'à la fin de la décharge. Cette présence de bulles en tout début de décharge nous laisse penser que nous sommes en présence d'une nucléation hétérogène. En effet, la quantité de gaz dissous est très faible et ce type de nucléation intervient à partir de germes gazeux pré-existants sur toutes les irrégularités de la paroi de la bouteille (cf. Chapitre 1 Section 1.5.2). Après l'apparition de ces premières bulles, les cavités ne contiennent plus de gaz et le rayon des germes, inférieur au rayon critique [11, 12], ne permet pas aux bulles de grossir ni de coalescer, elles sont donc rapidement évacuées dans l'écoulement. Nous pouvons donc supposer que ces bulles sont le résultat du dégazage du dioxyde de carbone suite à la baisse de pression au cours de la décharge.

Concernant la structure du spray obtenu, elle n'est pas la même que dans le cas de l'eau pressurisée à l'azote, même lorsque l'écoulement dans le tube est monophasique.En effet, jusqu'à 20% du temps de la décharge, le jet d'eau pressurisée au CO_2 a une forme similaire au jet d'eau pressurisée à l'azote. Néanmoins, il est plus sombre, ce qui indique une densité d'interface plus importante rencontrée par les rayons lumineux. Le jet est de plus en plus déstabilisé. On note une différence importante dans la structure du spray entre 40% et 60% : le jet n'est plus cylindrique immédiatement en aval de buse et subit une extension radiale avec la formation d'un nuage de gouttes autours de filaments de liquide. Le comportement du gaz lors de sa détente en sortie n'est pas le même.

À 1,35% du temps de décharge



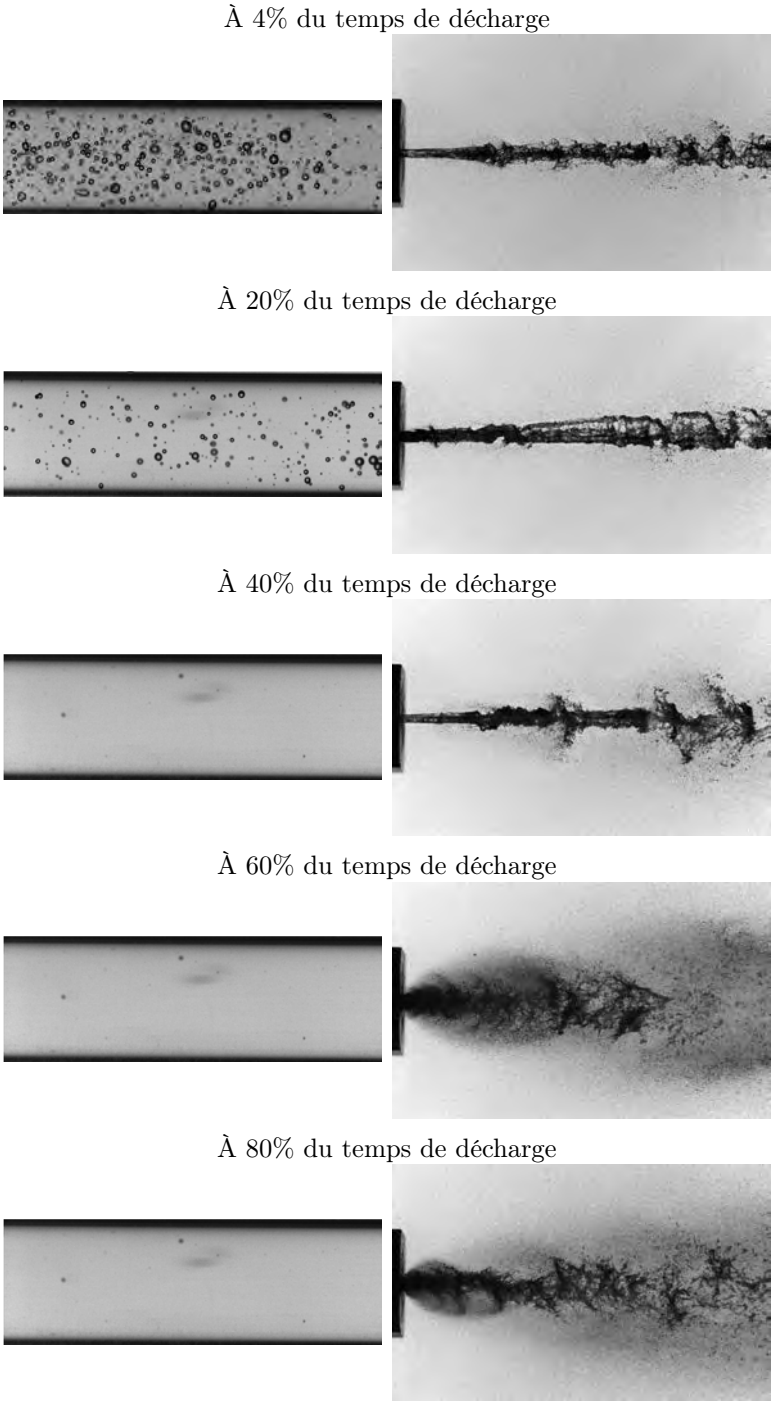


FIGURE 4.4 – Visualisations expérimentales de l'écoulement en amont de la buse pour une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante (+23°C).

Une soustraction d'images est réalisée à l'aide du logiciel ImageJ. Le principe consiste

à éliminer par soustraction numérique pixel par pixel, toutes les structures communes aux deux images produites à des temps différents. Il n'apparaît alors sur l'image finale que les pixels dont les valeurs sont différentes. En faisant la différence entre le fond de l'image correspondant à l'état du tube initial (avant une décharge) et l'image brute au temps de décharge correspondant, nous obtenons une image qui permet de faire ressortir les densités d'interfaces présentes dans l'écoulement. La Figure 4.5 présente ces images et les histogrammes des niveaux de gris correspondant à 1,35%, 4%, 20% et à partir de 40% du temps de décharge. Sur les histogrammes, le pic correspond au fond de l'image et la queue du pic à gauche correspond aux bulles. Sur l'histogramme à 40% du temps de décharge, le pic est situé complètement à droite soit à 255 (blanc), ce qui signifie qu'il n'y a pas d'interface. Toutes les bulles ont été évacuées, mêmes les plus fines. Sur l'histogramme à 1,35% du temps de décharge, le pic est décalé à gauche par rapport à l'histogramme à 40%, ce qui signifie qu'il y a la présence d'interface à petite échelle qui dévie les rayons incidents dans tout l'espace. Sur l'histogramme à 4% du temps de décharge, on observe l'apparition de "grosses" bulles qui est caractérisée par la queue à gauche du pic sur l'histogramme. Le fond s'éclaircit également, le pic est légèrement décalé à droite. À 20% du temps de décharge, la queue à gauche du pic s'estompe ce qui signifie que la présence de bulles est moins importante. Le pic est d'avantage décalé vers la droite, ce qui signifie que le fond de l'image s'éclaircit et donc qu'il y a moins d'interfaces à petite échelle.

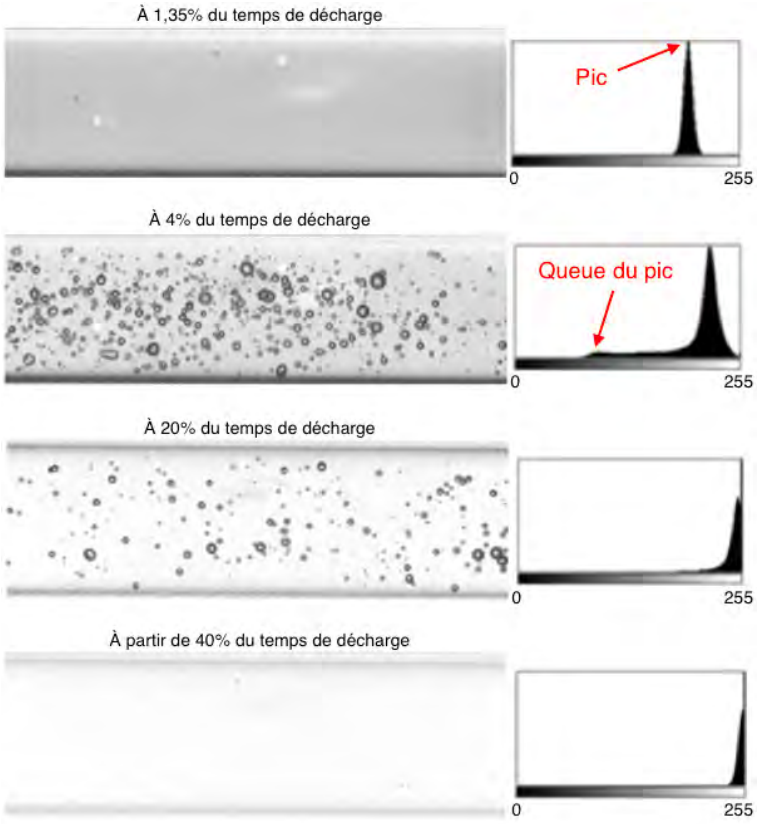
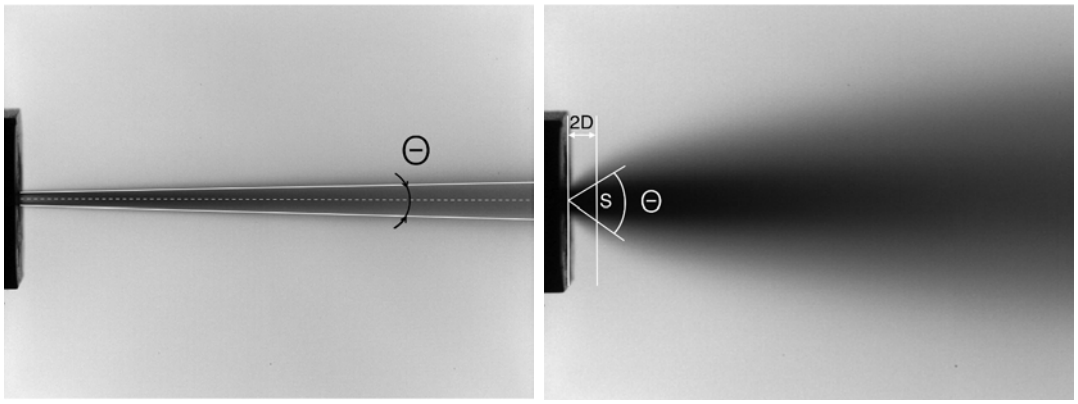


FIGURE 4.5 – Histogrammes des niveaux de gris (noir 0 à blanc 255) pour les visualisations de l'écoulement dans la veine transparente pour une décharge d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante (+23°C).

Une image moyenne du spray permet d'évaluer l'angle moyen du cône du spray. La décharge Wat00CO_2Hot est étudiée Chapitre 3. On utilise la même méthode de moyenne glissante décrite Section 3.2.2 page 111 pour la décharge Wat21CO_2Hot. Une moyenne glissante est appliquée sur une série de $N = 15\,000$ images instantanées ce qui correspond à une série d'images comprise entre 42 et 100% du temps de décharge. On observe qu'à partir de la troisième image moyenne et jusqu'à la dernière, le spray est *établi* et nous pouvons réaliser une image moyenne du spray à partir de 54% du temps de décharge. La Figure 4.6 présente les images moyennes pour les décharges d'eau en conditions de température ambiante, réalisées à partir d'une suite de $N = 5\,000$ images instantanées prises entre 85% à 95% du temps de décharge, ce qui équivaut à 1 s de la décharge. L'angle du cône du spray Θ pour la décharge Wat00CO_2Hot est mesuré Section 3.2.2 du Chapitre 3 à $\Theta = 2,4°$. Pour la décharge Wat21CO_2Hot, le cône du spray prend une forme *parabolique* et la mesure de l'angle donne $\Theta = 67°$. Le CO_2 a donc un effet considérable sur le processus d'atomisation. Le spray subit une extension radiale dès la sortie de l'orifice avec la formation d'un nuage de gouttes autours de filaments de liquide. Le comportement du gaz lors de sa détente en sortie n'est pas le même.



(a) Wat00CO_2Hot (b) Wat21CO_2Hot

FIGURE 4.6 – Images moyennes de 5 000 images instantanées des décharges d'eau en conditions de température ambiante (+23°C), prises entre 80 et 95% du temps de décharge.

Le CO_2 étant peu soluble dans l'eau et très soluble dans le Novec1230™ (cf. Chapitre 1), nous nous intéressons maintenant à l'influence d'une quantité modérée de CO_2 sur l'atomisation du Novec1230™ Section 4.2.2.

4.2.2 Décharge de Novec1230™ pressurisé à concentration modérée de CO_2

Évolution de la pression au cours d'une décharge

On s'intéresse maintenant aux décharges de Novec1230™. La Figure 4.7 présente l'évolution de la pression au cours du temps pour le Novec1230™ à température ambiante (cf. Tableau 4.2). On retrouve également un régime *hydraulique* et un régime

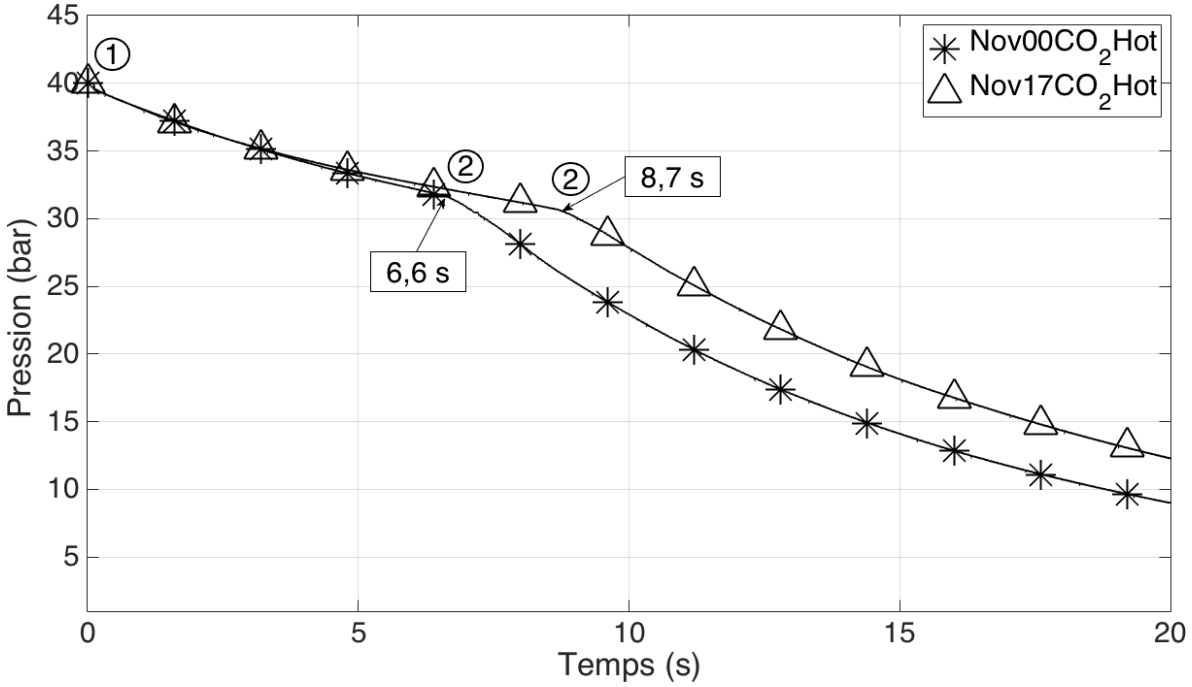


FIGURE 4.7 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante (+23°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

pneumatique pour les décharges avec une rupture de pente entre les deux. Dans le cas d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote (Nov00CO_2Hot), le temps de décharge est mesuré à 6,6 secondes (cf. Chapitre 3). Pour une décharge de Novec1230™ pressurisé au dioxyde de carbone (Nov17CO_2Hot), le temps de décharge est mesuré à 8,7 secondes, ce qui signifie qu'à concentration modérée de CO_2, on obtient une augmentation de 32% du temps de décharge par rapport à une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et donc une diminution du débit liquide, sans doute causée par la présence de bulles dans l'écoulement. Les temps de décharge mesurés pour les essais à l'eau et au Novec1230™ sont résumés dans le Tableau 4.5.

Nomenclature	Temps de décharge [s]
Wat00CO_2Hot	5
Wat21CO_2Hot	5,2
Nov00CO_2Hot	6,6
Nov17CO_2Hot	8,7

TABLE 4.5 – Durées des décharges à l'eau et au Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C).

Imagerie par caméra rapide

Les réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie de buse et de l'écoulement dans la veine transparente pour une décharge de Novec1230™ pressurisée au dioxyde de carbone, en conditions de température ambiante, sont résumés Tableau 4.6.

Visualisation	f [Hz]	Expo. [μs]	Résolution [px]	Nb d'images	Tps d'enreg. [s]
Spray	5 000	1	1280 x 800	50 000	10
Veine transparente	5 000	10	1280 x 800	66 772	13,35

TABLE 4.6 – Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges d'eau pressurisée au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

La Figure 4.8 présente les images obtenues pour une décharge au Novec1230™ pressurisé à 40 bar d'azote (Nov00CO_2Hot) étudiées Chapitre 3. La Figure 4.9 présente les images obtenues pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 20 bar de CO_2 (et complété jusqu'à 40 bar d'azote), ce qui correspond à 17% en masse de CO_2 (Nov17CO_2Hot). Ces images sont représentées en fonction du pourcentage du temps de décharge correspondant. Le sens de l'écoulement va de gauche à droite et le champ de la caméra est de 40 mm pour l'écoulement dans la veine transparente, et de 47 mm pour le spray dans le sens de l'écoulement.

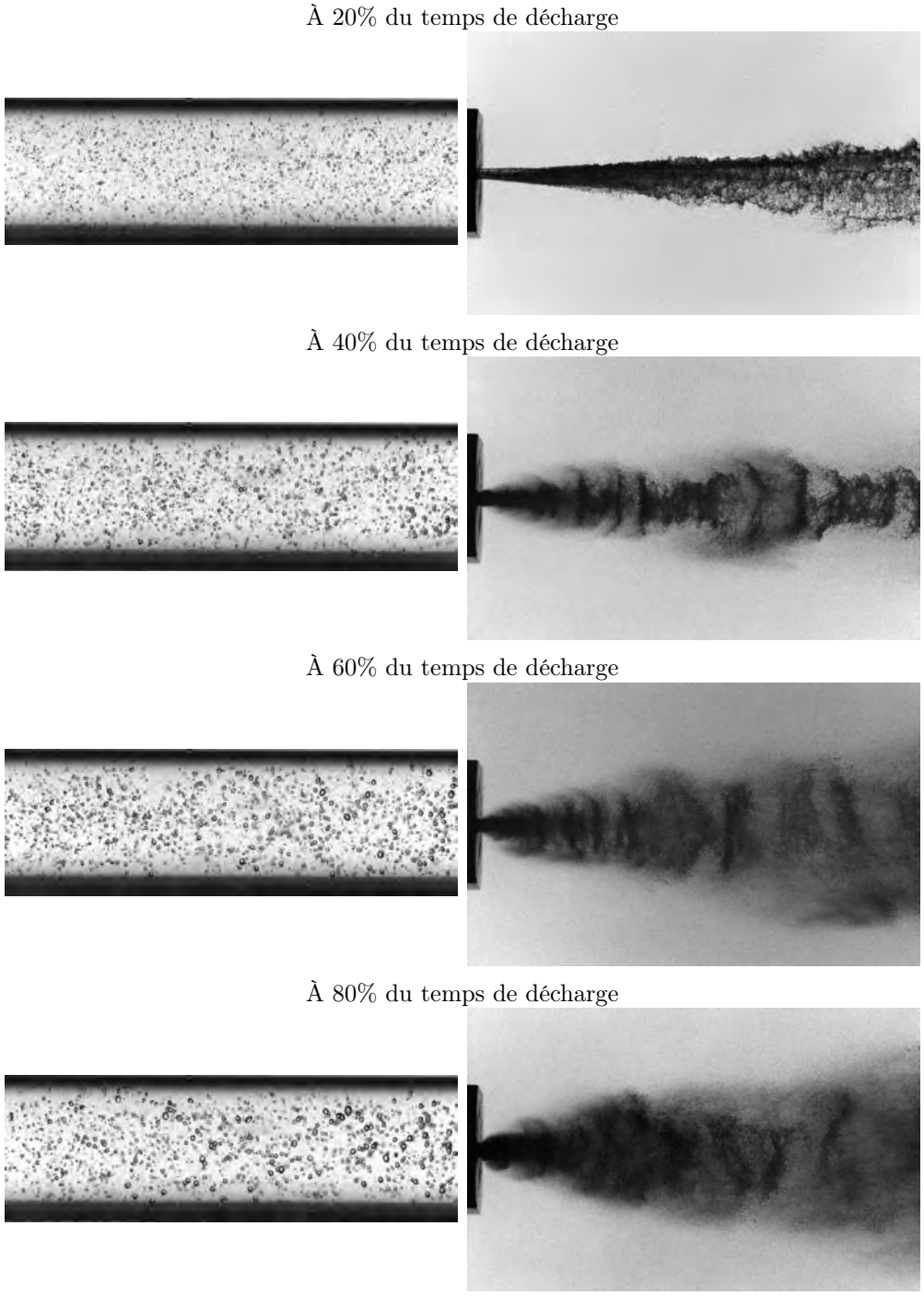


FIGURE 4.8 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante (+23°C).

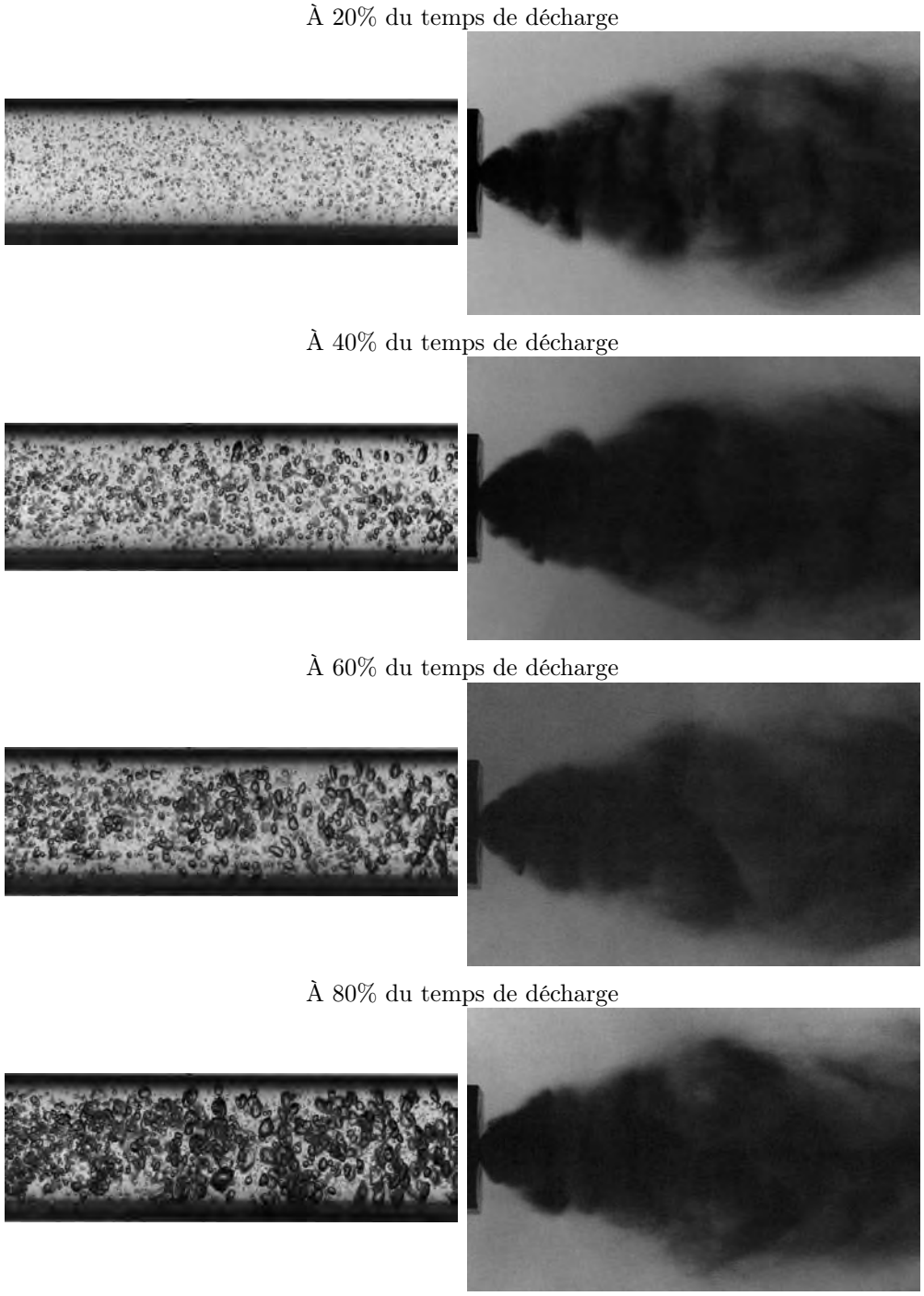


FIGURE 4.9 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé au CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

La décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote Figure 4.8 est étudiée Chapitre 3. Nous sommes dans un régime dit à *bulles* durant toute la décharge. On voit apparaître

les premières bulles à 3% du temps de décharge. Elles vont grossir de plus en plus jusqu'à atteindre une taille de l'ordre de 0,8 mm que nous mesurons manuellement. Nous sommes en présence d'une nucléation homogène. En effet, les bulles naissent au sein du liquide avec une distribution homogène, grossissent et sont présentes dans l'écoulement durant toute la décharge [11, 12]. Concernant le spray, à 20% du temps de la décharge, le jet de Novec1230™ a une forme similaire au jet d'eau pressurisée au dioxyde de carbone (cf. Figure 4.4). À 40% du temps de décharge, le jet subit une extension radiale rapide avec la formation de très nombreuses gouttes. On observe également la formation d'amas verticaux séparés par des zones peu chargées en gouttelettes qui sont de plus en plus importantes avec l'augmentation des tailles de bulles. Avec les moyens de diagnostic mis en oeuvre, il n'est pas possible de déterminer la structure de ces amas : s'il s'agit d'une phase continue ou d'une phase dispersée dense. On s'intéresse ici aux décharges de Novec1230™ pressurisé à 17% en masse de CO_2 Figure 4.9. On retrouve également un régime d'écoulement à *bulles* pendant toute la décharge. On voit apparaître les premières bulles à 2,3% du temps de décharge qui sont également le résultat d'une nucléation homogène. Ces bulles vont grossir de plus en plus et coalescer jusqu'à atteindre une taille de l'ordre de 1,2 mm.

En utilisant ProSim, on peut calculer la composition initiale dans la bouteille et donc déterminer la quantité de dioxyde de carbone en solution dans le Novec1230™. Le Tableau 4.7 résume la composition initiale des phases pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante. Pour rappel, dans le cas Nov17CO_2Hot, la bou-

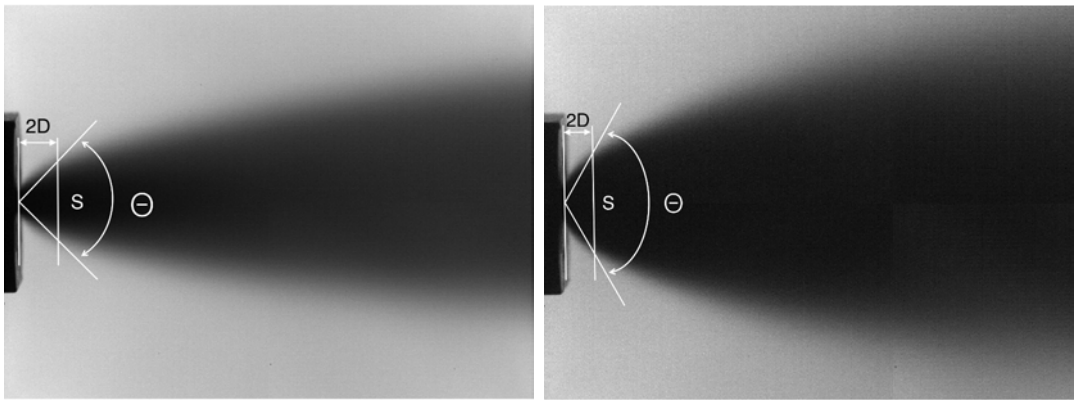
Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Novec1230™	Gaz	Novec1230™	Gaz
Nov00CO2Hot	88%		12%	
	98,6%	1,4%	18%	82%
Nov17CO2Hot	91%		9%	
	90%	10%	16%	84%

TABLE 4.7 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C).

teille est pressurisée à 20 bar de CO_2 puis complété à l'azote jusqu'à la pression test de 40 bar. La composition des phases donnée pour cette condition correspond donc à une pressurisation à 20 bar de CO_2. D'après ProSim, il y a initialement 10% en masse de CO_2 en solution dans le Novec1230™. Cette quantité de gaz dissous, caractérisée par la présence d'inclusions gazeuses dans l'écoulement en amont de la buse lors d'une décharge, diminue la masse volumique moyenne et donc le débit massique du liquide (cf. Figure 4.7) et modifie considérablement la structure du spray et son angle. Comme nous l'observons Figure 4.9, le spray est fortement modifié. Immédiatement en aval de

la buse, le cône du spray prend une forme parabolique et subit une extension radiale très rapide formant un nuage de gouttes dès le début de la décharge.

Les images moyennes de ces décharges permettent de mesurer l'angle d'ouverture du spray et sont présentées Figure 4.10. Pour la décharge Nov00CO_2Hot (cf. Chapitre 3),



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov17CO_2Hot

FIGURE 4.10 – Images moyennes des décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C).

la moyenne glissante (méthode expliquée Section 3.2.2 page 111) montre que le spray est *établi* à 54% du temps de décharge. L'image moyenne du spray est obtenue à partir de $N = 5\ 000$ images instantanées prises entre 80 et 95% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge. Pour la décharge Nov17CO_2Hot, la moyenne glissante faite sur $N = 15\ 000$ images montre que le spray est *établi* à 42% du temps de décharge. L'image moyenne du spray est obtenue à partir de $N = 3\ 000$ images prises entre 83 et 95% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge. Les angles du cône du spray Θ sont mesurés manuellement selon la méthode utilisée précédemment pour un cône de forme *parabolique*. Pour la décharge Nov00CO_2Hot, l'angle est mesuré Section 3.2.2 du Chapitre 3 à $\Theta = 91°$. Pour la décharge Nov17CO_2Hot, la mesure de l'angle donne $\Theta = 121$. Pour une concentration modérée de CO_2, l'angle du spray augmente fortement. Les mesures des angles du spray de ces décharges en conditions de température ambiante sont résumées Tableau 4.8.

Nomenclature	Angle d'ouverture du spray [°]
Wat00CO_2Hot	2,4
Wat21CO_2Hot	67
Nov00CO_2Hot	91
Nov17CO_2Hot	121

TABLE 4.8 – Angles d'ouverture du spray pour les décharges d'eau et de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C).

La littérature nous permet de faire la comparaison avec les résultats obtenus dans le cas de l'atomisation dite "effervescente" et "aérée". Nous allons donc positionner nos premiers résultats en particulier les angles de spray obtenus en fonction de la concentration en gaz dissous par rapport aux résultats présents dans la littérature, et en déduire quel serait l'ordre de grandeur des tailles de gouttes en sortie de système. Les travaux de Rashkovan et al. [2] s'inscrivent dans le contexte de l'optimisation de la combustion en couplant l'atomisation effervescente du fuel avec du CO_2 à une buse *pressure-swirl* (cf. Chapitre 1). Pour une pression supérieure à 23 bar, l'utilisation du dioxyde de carbone dissous améliore l'atomisation et a un effet important sur le SMD. La Figure 4.11

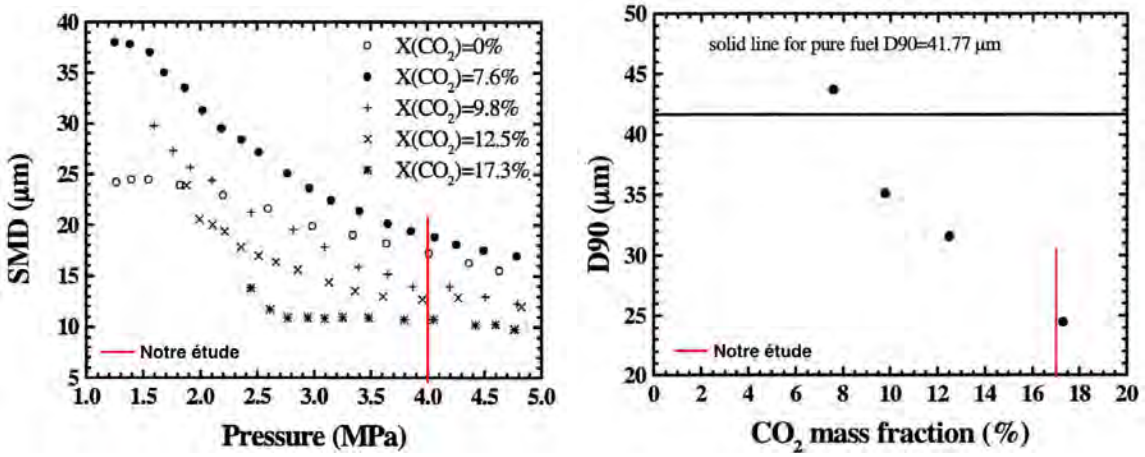


FIGURE 4.11 – SMD en fonction de la pression et de la quantité de CO_2 et D_{90} en fonction de la fraction massique de CO_2 pour une pression de 47 bar. Buse *pressure-swirl*, $L/D = 2,32$. (Source : Rashkovan et al. [2]). La ligne rouge correspond à notre étude.

reprend leurs résultats de mesure du SMD en fonction de la pression et du D_{90} (cf. Section 1.3.2) en fonction de la quantité de CO_2 avec nos points de mesure. Dans leur étude, ils utilisent une buse *pressure-swirl* avec un rapport L/D = 2,32. Dans notre cas, nous utilisons une buse simple orifice avec un rapport L/D = 2. Il faut donc bien prendre en compte que la configuration mécanique n'est pas la même. Une décharge

de Novec1230™ pressurisé à 17% en masse de CO_2 et à 40 bar de pression, produirait alors un spray de gouttelettes d'un SMD de l'ordre de 11 μm et un D_{90} (de l'ordre de 25 μm). La Figure 4.12 reprend leurs résultats de mesure de SMD en fonction de la

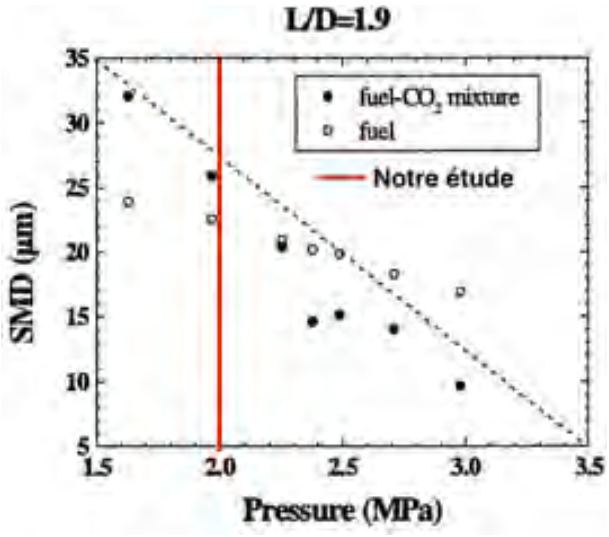


FIGURE 4.12 – SMD en fonction de la pression (et donc de la quantité de CO_2) pour un L/D = 1,9. La ligne rouge correspond à notre étude. (Source : Rashkovan et al. [2]).

pression (donc liée à une concentration en CO_2) pour une décharge de fuel pressurisé à l'azote et une décharge fuel/CO_2. Dans notre étude nous venons de présenter le cas d'une décharge de Novec1230™ pressurisée à 17% en masse de CO_2, ce qui correspond à une pression de 20 bar (puis complétée avec de l'azote jusqu'à 40 bar), représentée par la ligne rouge sur le graphique où le SMD est de l'ordre de 26 μm. La littérature montre que le SMD tend à diminuer en augmentant la concentration en gaz dissous, ce qui est intéressant vis à vis de notre objectif qui est d'obtenir des tailles gouttes les plus petites possible pour être acheminées dans toutes les zones feux du moteur lors d'une décharge.

Zhen et al. [3] ont également obtenu des résultats similaires en atomisation effervescente. Les résultats montrent que le SMD diminue lorsque la pression augmente et lorsque la concentration en gaz dissous est inférieure à une certaine limite, appelée concentration de transition. Passé ce seuil, le SMD atteint un minimum quelque soit la pression. Plus la quantité de gaz dissous augmente et plus le spray subit une expansion dès la sortie de l'orifice et forme un spray avec un cône parabolique. L'angle du spray augmente graduellement lorsque la concentration en gaz dissous est inférieure à la concentration de transition. Passé ce seuil, l'angle du spray devient large et constant. Dans leur étude, la concentration de transition se situe entre 7,84% et 29,24% en masse de CO_2. Dans leur étude, les concentrations sont présentées en volume, nous les avons donc converti en massique pour faciliter la comparaison avec nos valeurs. La Figure 4.13 reprend leur résultats de mesure de SMD et d'angle du spray θ en fonction de la pression afin de visualiser où nous nous situons par rapport à notre étude. La buse utilisée

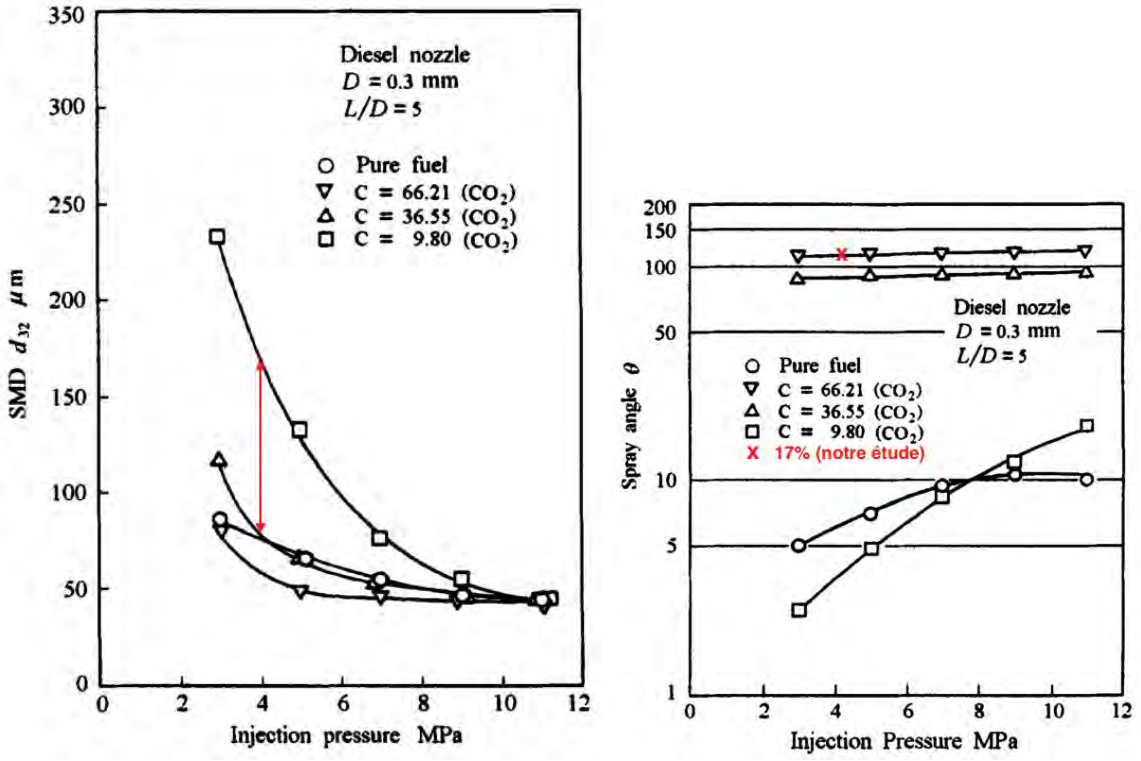


FIGURE 4.13 – Le SMD et l'angle du spray θ en fonction de la pression. Le point rouge correspondant à notre cas à 17% en masse de CO_2. (Source : Zhen et al. [3]).

est une buse simple orifice de diamètre D = 0,3 mm avec un rapport L/D =5. Les concentrations massiques donnent : 7,84, 29,24 et 52,97. Pour savoir si nous pouvons comparer nos résultats avec leurs valeurs, le nombre de Reynolds Re, le nombre de Weber We et le nombre d'Ohnesorge Oh (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1) sont estimés pour leurs décharges afin de connaître dans quel régime ils se placent pour une pression de 40 bar et un diamètre de buse de 0,3 mm. On estime dans un premier temps la vitesse du liquide $u_{fuel} = 97,6$ m/s avec une masse volumique ρ_{fuel} de 840 kg/m^3. On estime ensuite le nombre de Reynolds Re $= 8,42.10^4$ avec une viscosité dynamique $\mu_{fuel} = 2,92.10^{-4}$ Pa.s, le nombre de Weber We $= 9,23.10^4$ avec la tension superficielle $\sigma_{fuel} = 2,60.10^{-2}$ N/m, et enfin le nombre d'Ohnesorge Oh $= 3,61.10^{-3}$. En reportant ces valeurs sur la classification des différents régimes de fractionnement d'un jet liquide [1, 7], Figure 4.14, on peut en déduire qu'ils se situent dans le régime d'atomisation, le même régime où nous nous situons dans notre étude pour les décharges de Novec1230^{TM}.

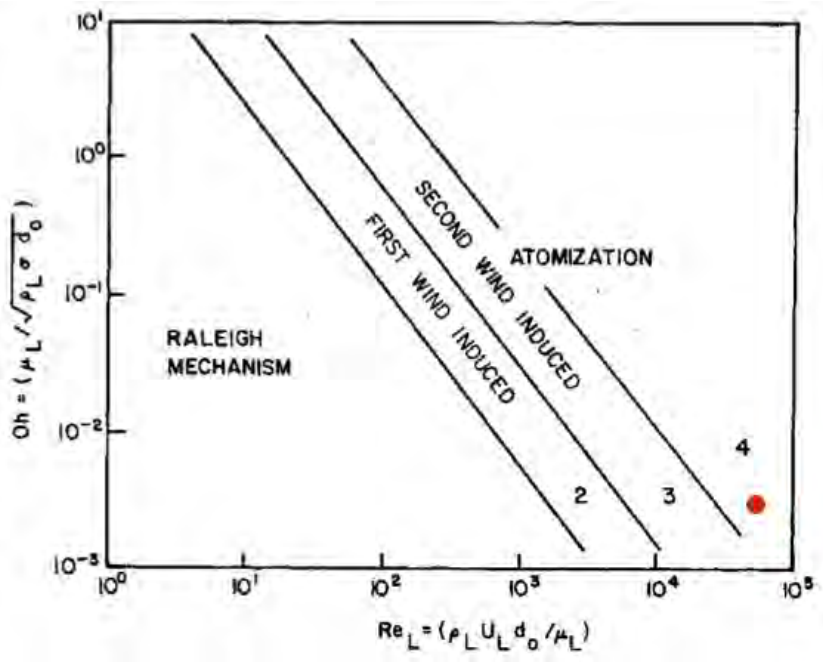


FIGURE 4.14 – Classification des régimes de rupture d'un jet de liquide (Source : Lefebvre [1], Reitz [7]) (cf. Chapitre 1 Section 1.3.1). Le point rouge représentant le régime dans lequel se situe l'étude de Zhen et al. [3].

Dans le cadre de notre étude, si on place nos points expérimentaux sur ces figures (cf. Figure 4.13), à 40 bar de pression pour une décharge de Novec1230™ à 17% en masse de CO_2, le SMD se situe entre 80 et 170 μm environ. Concernant l'angle du spray, dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé leur technique pour mesurer l'angle d'un spray parabolique. Pour notre cas à 17% en masse de CO_2 et à 40 bar de pression nous obtenons un angle de spray de 121,03°. Or, dans leur étude, Zhen et al. obtiennent une valeur d'angle similaire mais pour une concentration plus importante de l'ordre de 52,97% en masse (cf. Figure 4.13) et leur concentration de transition se situe entre 7,84% et 29,27% en masse de CO_2. Ce qui signifierait que dans le cas d'une décharge de Novec1230™, notre concentration de transition se situerai plus bas. L'étude de l'influence de la quantité de gaz dissous dans le Novec1230™, présentée Section 4.3, nous informera si nous avons atteint une limite d'angle d'ouverture du spray, et dans ce cas, que la concentration de transition est inférieure à 17% en masse de CO_2. La concentration de transition dépend sans doute de la solubilité du gaz dans le liquide car celle-ci impact la formation des bulles dans l'écoulement.

Les différentes études réalisées montrent que l'effervescence améliore considérablement le processus d'atomisation. La présence de bulles dans l'écoulement en amont de la buse est caractérisée par un taux de vide influençant la taille des gouttes obtenue dans le spray en sortie [1, 33, 34]. Plus le GLR augmente et plus la taille des gouttes

(SMD) et le débit massique diminuent (cf. Figure 4.7). Les angles de spray produits par une buse simple orifice dans l'atomisation aérée ont été étudiés par Chen et Lefebvre [50], Wade et al. [51] et Sovani et al. [52] à travers des essais à basses et hautes pressions (jusqu'à 380 bar). Tous ont montré que l'angle du cône du spray augmentait avec la pression d'injection. Wade et al. ainsi que Sovani et al. ont observé que l'angle du spray s'élargissait également avec une augmentation du GLR (Gas Liquid Ratio). Chen et Lefebvre mettent en évidence que les sprays produits par atomisation aérée ont un angle plus large (d'un facteur 2) dû à la l'expansion rapide des bulles à la sortie de l'orifice par rapport à une atomisation simple-fluide. Ils ont également observé que l'angle mesuré atteignait une valeur limite puis diminuait. Cette diminution est due à l'évolution du régime d'écoulement en amont de la buse [52]. En effet, plus le taux de vide augmente continuellement et plus le régime d'écoulement évoluera d'un écoulement à bulles vers un écoulement annulaire (cf. Chapitre 1 Section 1.4). Dans cette section nous avons présenté l'influence d'une quantité modérée de CO_2. L'influence de la quantité de CO_2 sur l'atomisation du Novec1230™est donc abordée Section 4.3.

4.3 Influence de la quantité de dioxyde de carbone sur l'atomisation du Novec1230™

Dans cette section, seul le Novec1230™est testé et une variation de la composition initiale (variation de la quantité de CO_2) dans notre bouteille permettra d'étudier l'influence de la quantité de gaz dissous sur les phénomènes intervenant lors d'une décharge. Ces décharges sont comparées à la décharge de Novec1230™pressurisé à l'azote présentée Chapitre 1 et Section 4.2.2 de ce chapitre. La préparation d'un essai débute par le remplissage de la bouteille de décharge avec 200 mL de Novec1230™. Pour les cas à 17% et 33% en masse de CO_2, la bouteille est ensuite pressurisée au dioxyde de carbone et complétée à l'azote pour le cas à 17%, jusqu'à la pression test de 40 bar. Le Tableau 4.9 reprend les conditions expérimentales des cas présentés dans cette section. La stabilisation de la pression et de la température de la bouteille nous indique que le système est à l'équilibre. La bouteille est alors prête pour une décharge. La préparation pour une décharge à 50% en masse de CO_2 est différente des autres cas. Comme expliqué Chapitre 2, ce cas d'essai est motivé par la contrainte industrielle. Un mélange à 50% en masse étant envisagée, il fallait étudier cette composition. La procédure de remplissage doit s'effectuer en deux étapes grâce à un refroidissement de la bouteille de décharge. On pressurise la bouteille une première fois comme pour un cas à 33% en masse de CO_2, à température ambiante, puis on procède au refroidissement de la bouteille grâce à la neige carbonique. Le refroidissement engendre une baisse de pression dû à la dissolution du CO_2 dans le Novec1230™. On peut ainsi procéder à une deuxième pressurisation pour atteindre les 50% en masse. Une fois les 50% de CO_2 atteint, on retire la neige carbonique. La température de la bouteille va donc remonter ainsi que la pression. Lorsque la pression test de 40 bar est atteinte (il n'y a donc pas d'ajout d'azote), la bouteille atteint une température de $+11°C$. Comme nous réalisons l'étude

à pression fixe de 40 bar, nous ne pouvons pas attendre d'atteindre la température ambiante et nous devons décharger la bouteille à +11°C.

Temp. [°C]	Liquide	Gaz	Nomenclature	$\%_{masse}$ CO_2
+23	Novec1230™	N_2	Nov00CO_2Hot	0%
		CO_2 + N_2	Nov17CO_2Hot	17%
		CO_2	Nov33CO_2Hot	33%
+11		CO_2	Nov50CO_2Hot	50%

TABLE 4.9 – Conditions expérimentales pour les décharges de Novec1230™ pressurisé au dioxyde de carbone et à l'azote.

4.3.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge

La Figure 4.15 présente l'évolution de la pression au cours du temps pour le Novec1230™ en conditions de température ambiante (cf. Tableau 4.9). On retrouve un régime *hy-*

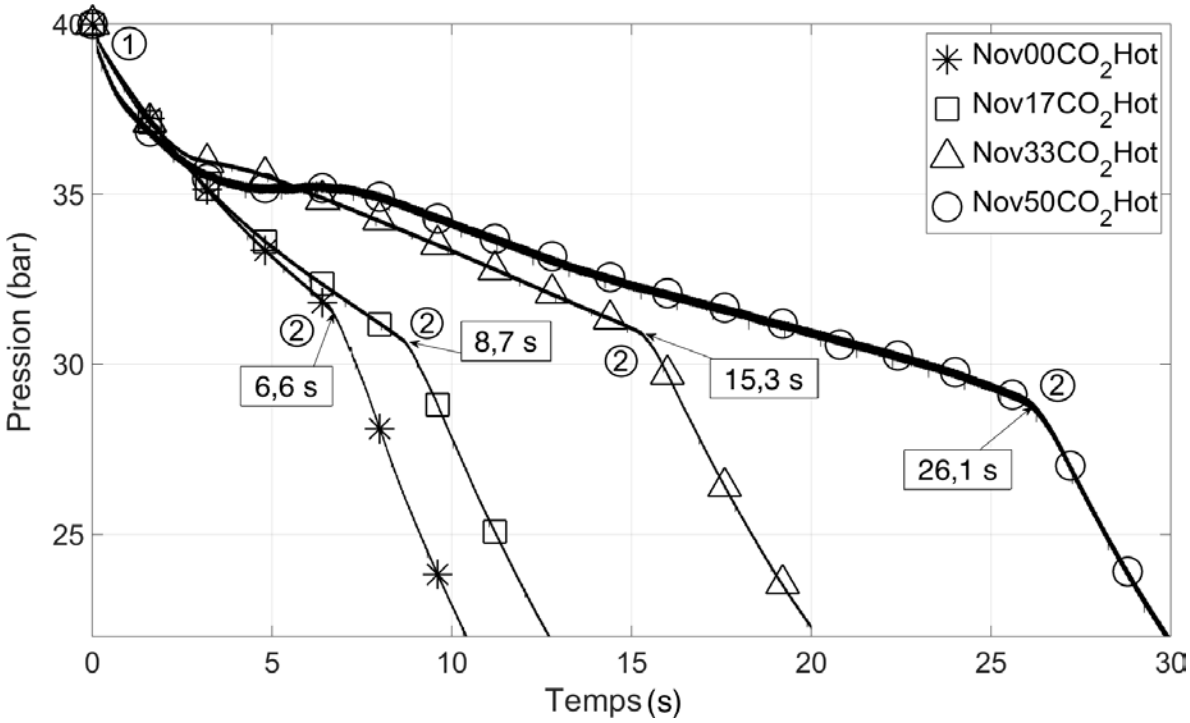


FIGURE 4.15 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante. Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

draulique et un régime *pneumatique* pour chaque décharge avec une rupture de pente entre les deux. On retrouve également les décharges à 0% et 17% en masse de CO_2 étudiées Section 4.2. Les temps de décharges mesurés pour ces essais sont résumés Tableau 4.10. La Figure 4.16 présente l'évolution temporelle adimensionnée de la pression.

Nomenclature	Temps de décharge [s]
Nov00CO_2Hot	6,6
Nov17CO_2Hot	8,7
Nov33CO_2Hot	15,3
Nov50CO_2Hot	26,1

TABLE 4.10 – Durée des décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante.

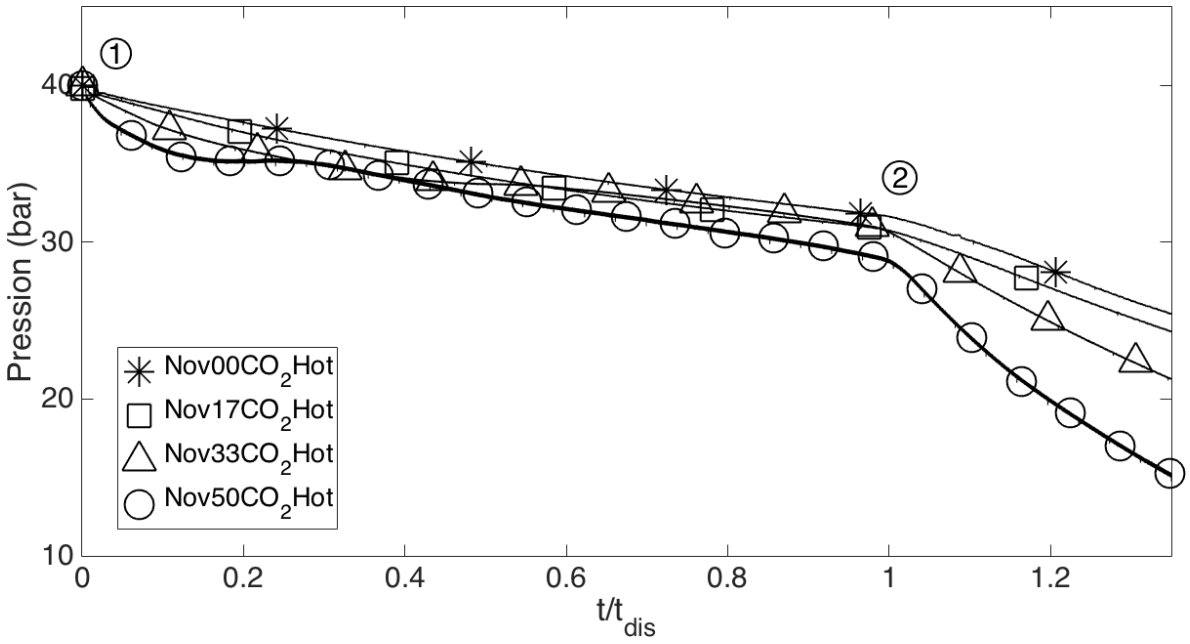


FIGURE 4.16 – Évolution temporelle adimensionnée de la pression dans la bouteille au cours d'une décharge de Novec1230™ pressurisé à l'azote et au dioxyde de carbone en conditions de température ambiante. t_{dis} le temps de décharge. Pression ($P_i = 40$ bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

À 33% en masse de CO_2, le temps de décharge est 2,3 fois plus important que le temps de décharge sans CO_2. Pour une décharge à 50% en masse de CO_2, le temps de décharge est 4 fois plus important. L'augmentation de la proportion de CO_2 diminue fortement le débit de liquide dû à la présence des bulles dans l'écoulement. De plus, on remarque qu'un évènement intervient au cours de la phase hydraulique pour les décharges à 33% et 50% en masse de CO_2 qui ne se produit pas pour les décharges à 0 et 17%. Dans le cas Nov33CO_2Hot, on remarque que la pression stagne à 35,8 bar à $t = 2,7$ secondes (soit à 18% du temps de décharge) pendant 1,4 secondes, puis la décharge continue jusqu'au point 2 qui marque la fin de la vidange du liquide. Dans le cas Nov50CO_2Hot, la pression chute jusqu'à 35 bar à $t = 4,6$ secondes (ce qui correspond également à 18% du temps de décharge), remonte jusqu'à 35,4 bar pendant 1,8 secondes, puis la décharge continue jusqu'au point 2. Ce phénomène a également été observé par Elliott et al. [19] ainsi que Yang et al. [5] pour des décharges de Halon1301 et d'agents alternatifs pressurisés à l'azote (cf. Chapitre 1 Section1.2.2). Ce phénomène est décrit comme étant le résultat d'un fort dégazage qui intervient à l'intérieur de la bouteille lors de la décharge, mais sans confirmations visuelles claires de chaque étape [18]. Ce fort dégazage, étant plus rapide que la décharge du liquide, provoque l'augmentation du volume de la phase liquide dans la bouteille par la formation de bulles. Cette augmentation de volume de la phase liquide vient comprimer le volume du ciel gazeux, ce qui engendre une légère augmentation de pression durant quelques secondes dans la bouteille. La pression à laquelle ce fort dégazage intervient est appelée "pression de dégazage" ou "pression de nucléation" et dépend entre autres de la tension superficielle entre le gaz et le liquide. La Figure 4.17 illustre schématiquement les étapes qui interviennent lors d'un fort dégazage au cours d'une décharge de Novec1230^{TM}. En reprenant la description de Elliott et al. [19] de chaque étape de la décharge, sur le schéma simplifié de la Figure 4.17, au point 1, c'est le début de la décharge de l'agent où le gaz reste dissous comme une solution saturée en déséquilibre thermodynamique. Durant cette phase, des bulles de gaz microscopiques se forment continuellement dans le liquide. À cause de la tension superficielle, qui augmente la pression dans les bulles, la pression du gaz dans ces bulles est égale à la pression initiale du gaz (la concentration en gaz dissous n'a pas changé). Les bulles ne grossissent pas pendant cette phase. Les bulles commencent à grossir une fois que la pression dans la bouteille chute suffisamment pour être est inférieure à la pression de nucléation. Nous sommes alors au point 2. Les bulles vont grossir de plus en plus et le volume de la phase liquide va augmenter, ce qui va comprimer le ciel gazeux et engendrer une augmentation de pression à l'intérieur de la bouteille de décharge jusqu'au point 3. On se retrouve alors avec un écoulement à bulles continu jusqu'à la vidange totale de la phase liquide au point 4.

Si l'augmentation de pression est liée au dégazage du gaz dissous, et si le processus de dégazage peut s'exprimer par la théorie de la nucléation homogène et être modélisé par un processus isotherme, alors la pression de nucléation homogène, d'après les travaux de Forest et Ward [23], dépend de la pression initiale, de la tension superficielle du mélange, la pression vapeur du liquide et de la solubilité du gaz dans le liquide à

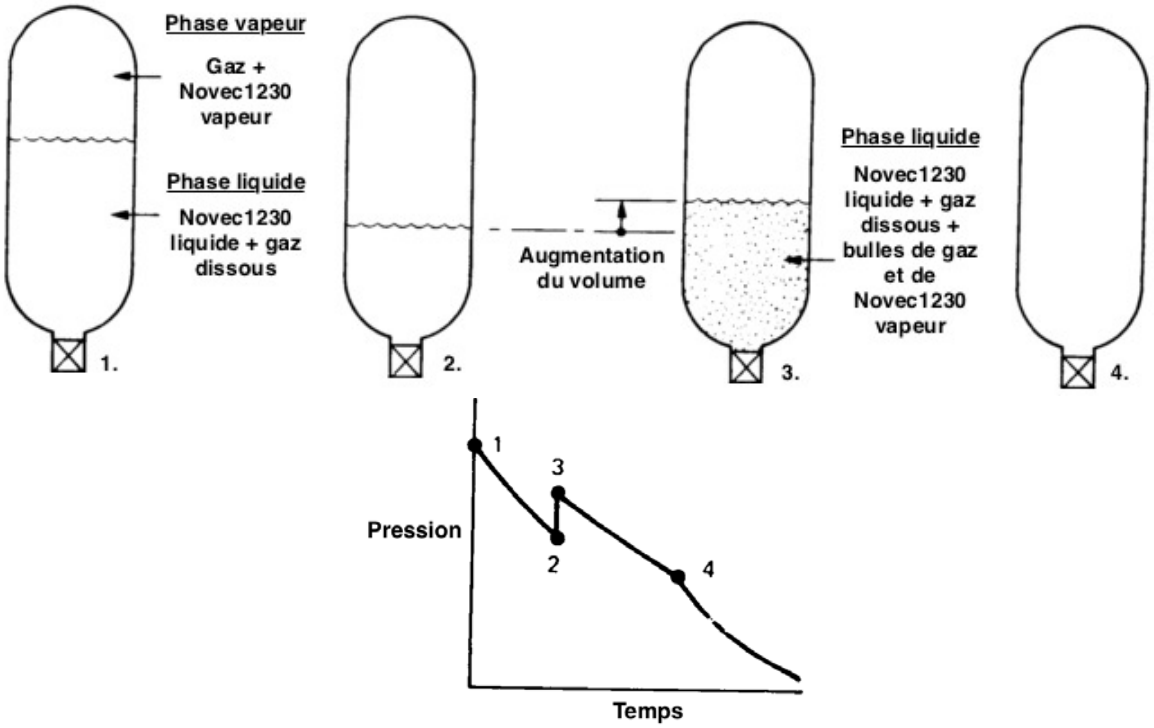


FIGURE 4.17 – Schéma de principe des étapes qui interviennent lors d'un fort dégazage au cours d'une décharge de Novec1230™.

une température donnée [5]. La pression de nucléation qui est la pression à laquelle la nucléation homogène intervient, peut être estimée par les équations données par Forest et Ward [23] (cf. Chapitre 1 Section1.2.2). Pour simplifier l'analyse, ils supposent que l'effet de la pression et de la concentration du gaz dissous sur la pression vapeur du liquide sont négligeables et que le mélange de vapeur dans les bulles est idéal. Yang et al. [5] propose donc une estimation de la pression de nucléation homogène P_h :

$$P_h = P_{sat} + \frac{C\,P_h}{C_s} - \left[\frac{16\pi\sigma^3}{3kT\,ln(Z/J)}\right]^{1/2} \tag{4.1}$$

Avec

$$ln\left[\frac{{f_n}^0(1+C_s)}{C_s}\right] = lnH + \frac{\nu_n P_h}{RT} \tag{4.2}$$

Et

$${f_n}^0 = P_h exp\left(\frac{P_h B_{nn}}{RT}\right) \tag{4.3}$$

Où P_{sat} est la pression vapeur de l'agent à la température T. C est le rapport des moles de gaz dissous sur les moles d'agent liquide. C_s est la concentration de gaz qui est présent dans l'agent liquide si la pression du ciel gazeux au-dessus du liquide est à

la pression totale P_h. σ est la tension superficielle, Z [$cm^{-3}.s^{-1}$] est une constante, J [$nuclei.s^{-1}.cm^{-3}$] est le taux de nucléation par volume. k est la constante de Boltzmann [$= 1,38048\ 10^{-16}$ dyne.cm.K^{-1}]. ${f_n}^0$ est la fugacité du gaz pur. H est la constante de Henry. ν_n est le volume partiel molaire du gaz dissous. B_{nn} est le second coefficient du viriel et R est la constante universel des gaz parfaits. Le rapport de mole C est déterminé à partir de la solubilité (fraction molaire) du gaz dans l'agent liquide à T et P_i par l'équation suivante :

$$C = \frac{x_n}{1 - x_n} \tag{4.4}$$

Où x_n est la solubilité du gaz.

Cependant, nous n'avons pas tous les éléments pour utiliser ce modèle dans le cas du Novec1230™ et du CO_2 car il nous manque des données, telles que la constante Z ou le taux de nucléation par volume J.

4.3.2 Imagerie par caméra rapide

Les réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie de buse et de l'écoulement dans la veine transparente pour les décharges de Novec1230™ aux différentes concentration de CO_2 étudiées dans cette section et en conditions de température ambiante, sont résumés Tableau 4.11.

Nomenclature	Visualisation	f [Hz]	Expo. [μs]	Résolution [px]	Nb d'images	Tps d'enreg. [s]
Nov33CO_2Hot	Spray	5 000	1	1280 x 800	66 772	13,35
	Veine transparente	5 000	10	1280 x 304	66 772	13,35
Nov50CO_2Hot	Spray	10 000	1	1280 x 800	199 233	19,92
	Veine transparente	5 000	10	1280 x 304	203 100	40,60

TABLE 4.11 – Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ pressurisé à différentes concentrations de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

La Figure 4.19 présente les images obtenues pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 33% en masse de CO_2 (Nov33CO_2Hot). La Figure 4.21 présente les images obtenues pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 50% en masse de CO_2 (Nov50CO_2Hot). Ces images sont représentées en fonction du pourcentage du temps de décharge correspondant. Le sens de l'écoulement va de gauche à droite et le champ de la caméra est de

40 mm pour l'écoulement dans la veine transparente, et de 47 mm pour le spray dans le sens de l'écoulement.

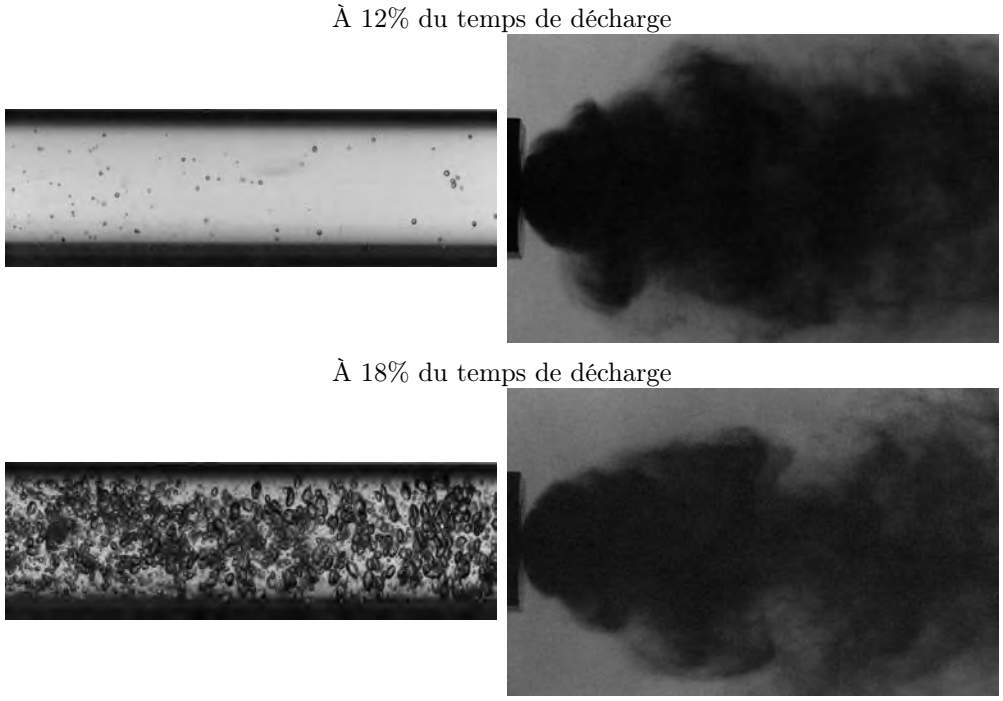


FIGURE 4.18 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 33% en masse de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

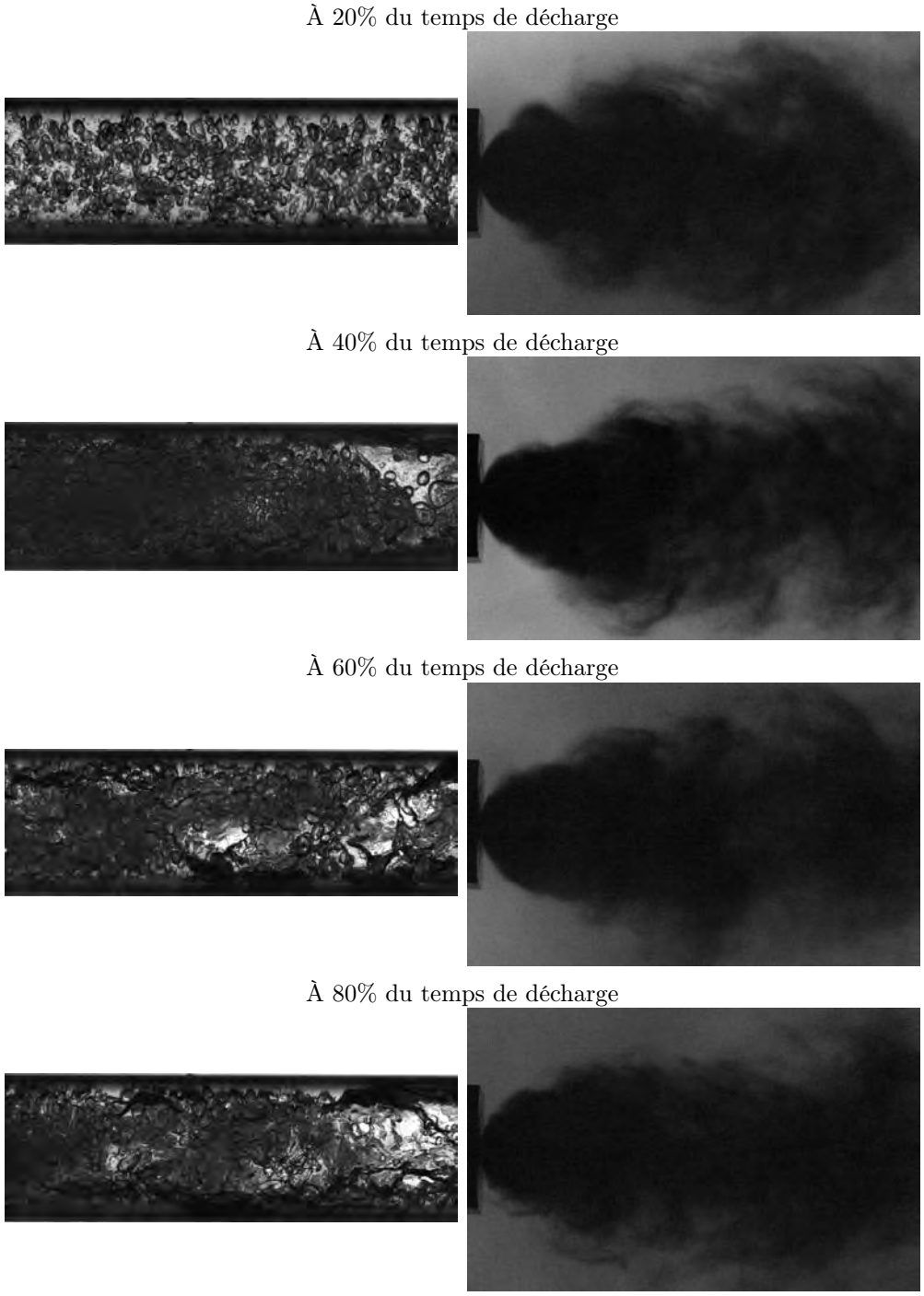


FIGURE 4.19 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 33% en masse de CO_2, en conditions de température ambiante (+23°C).

Pour le cas à 33% en masse de CO_2, on voit l'arrivée des premières bulles à 12% du temps de décharge, soit juste avant le plateau de pression observé à 18% du temps de décharge sur les courbes de pression Figure 4.15. Nous sommes en présence d'une nucléation homogène. Durant la décharge, nous passons d'un régime à bulles à un régime dit "churn", un écoulement "bouillonnant" avec la présence de poches de gaz. On observe ce régime d'écoulement lorsque la structure de l'écoulement devient instable avec de la coalescence, des ruptures de bulles et des oscillations de fluide se déplaçant de haut en bas, mais avec un déplacement principalement vers le haut (cf. Chapitre 1 Section 1.4). L'action des forces de cisaillement dans la direction opposée à la gravité provoquent ces instabilités. Le spray, quant à lui, s'élargit encore et son angle d'ouverture semble plus large en aval de la buse par rapport au cas à 17%. On remarque qu'en s'éloignant de la sortie de la buse, la largeur du spray augmente également.

Dans le cas à 50% en masse de CO_2, Figure 4.20, on observe l'arrivée d'une "émulsion" très dense, rendant l'image de la veine transparente toute noire, à 0,2% du temps de décharge. Cette émulsion opaque se transforme très rapidement, à 0,4% du temps de décharge, en de nombreuses petites bulles de l'ordre de 0,2 mm. Si nous augmentons la luminosité de l'image acquise à ce moment de la décharge de façon exagérée, nous apercevons ces paquets de petites bulles telles que présentées Figure 4.20.

Ces petites bulles vont grossir de plus en plus jusqu'à atteindre une taille de l'ordre de 1 mm et nous observons alors un écoulement dit à *bulles agglomérées*, et ce, jusqu'à la fin de la décharge. Nous sommes donc en présence d'une nucléation homogène. Les bulles agglomérées forment un réseau très serré et leurs interactions entre elles sont fortes. Il s'agit d'un régime intermédiaire, que l'on peut retrouver lorsque le taux de vide augmente, situé entre l'écoulement à bulles dispersées et l'écoulement à bouchons [53]. La population de bulles augmente, elles se rapprochent de plus en plus les unes des autres et finissent par se toucher pour former une sorte de paquet de bulles dans toute la section de la conduite. Par contre, le spray semble avoir atteint une limite d'extension radiale ainsi que son angle d'ouverture par rapport au cas à 33%. Cette diminution de l'angle a également été observé par Chen et Lefebvre [50] ainsi que par Sovani et al. [52]. Comme nous l'avons mentionné Section 4.2.2, cette diminution est due à l'évolution du régime d'écoulement en amont de la buse. En effet, plus le taux de vide augmente continuellement et plus le régime d'écoulement évoluera d'un écoulement à bulles vers un écoulement annulaire.

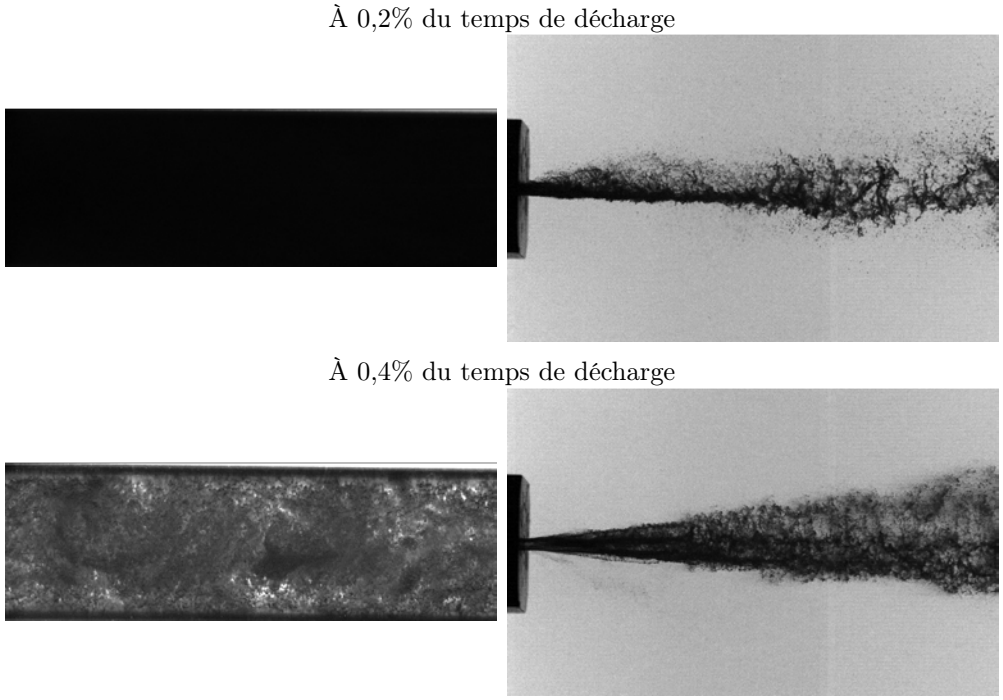


FIGURE 4.20 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 50% en masse de CO_2, à une température de +11°C, à 0,2% du temps de décharge et à 0,4% du temps de décharge (avec augmentation de la luminosité).

La Figure 4.22 reprend les images instantanées obtenues lors de la visualisation de l'écoulement dans la veine transparente pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante pour les cas de 0% à 33% en masse de CO_2 et à +11°C pour le cas à 50% en masse de CO_2.

On remarque bien que plus la quantité de dioxyde de carbone augmente, plus la présence de bulles et de poches de gaz est importante et de plus en plus tôt dans la décharge. Par exemple, on retrouve un écoulement à bulles à 20% du temps de décharge dans le cas à 33% en masse de CO_2, similaire à celui obtenu à 80% du temps de décharge dans le cas à 17%.

En utilisant ProSim, on peut calculer la composition initiale dans la bouteille et donc déterminer la quantité de dioxyde de carbone en solution dans le Novec1230™. Le Tableau 4.12 présente la composition initiale des phases pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante pour les cas de 0% à 33% en masse de CO_2 et pour le cas à 50% en masse de CO_2 (+11°C). Les proportions phase liquide/phase vapeur restent globalement stables pendant que la quantité de CO_2 en solution dans le Novec1230™ augmente avec la quantité de CO_2 injectée.

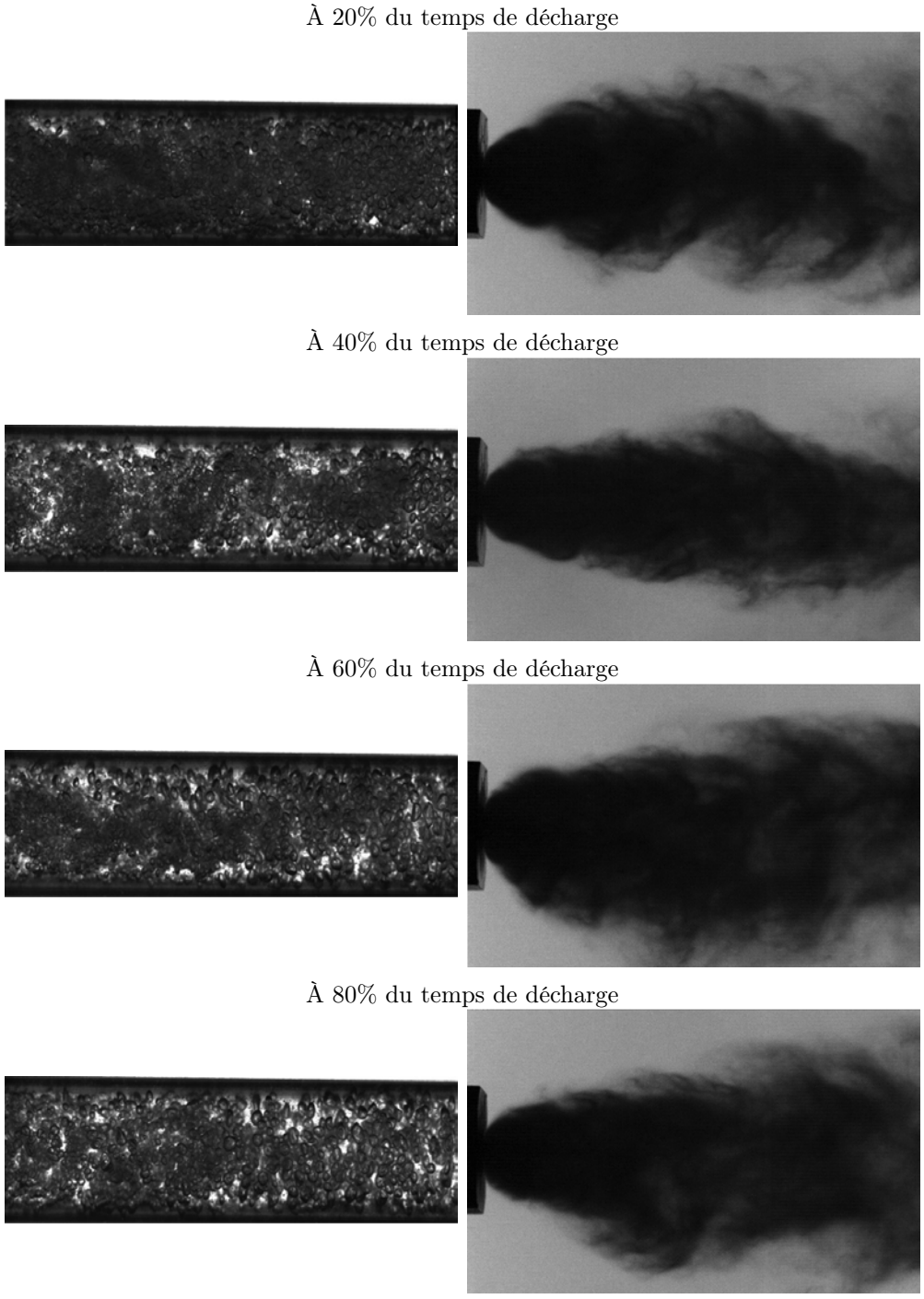
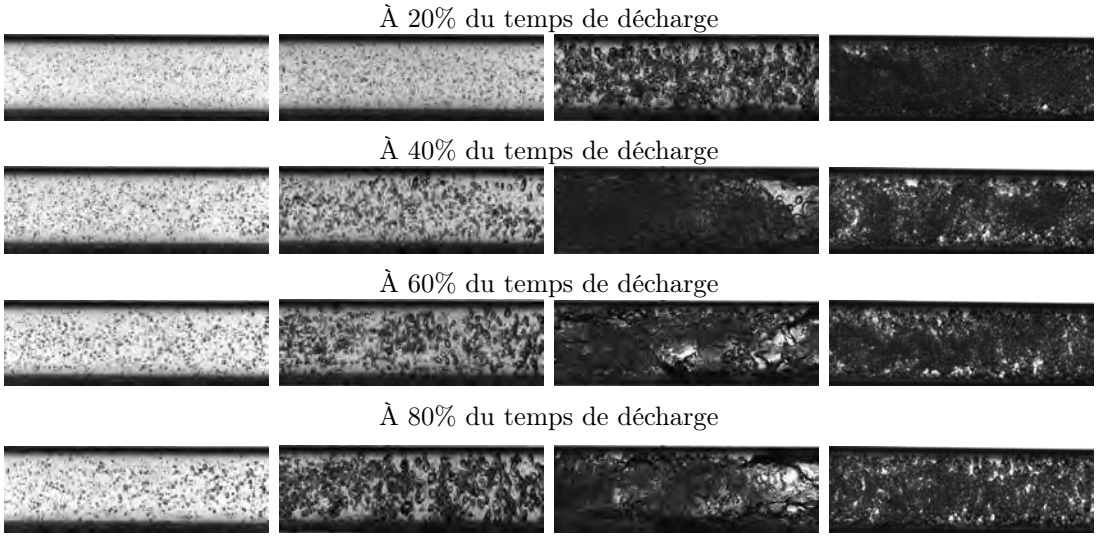


FIGURE 4.21 – Visualisations expérimentales pour une décharge de Novec1230™ pressurisé à 50% en masse de CO_2, à une température de +11°C.

Concernant le fort dégazage observé pour les décharges à 33% et 50% en masse de CO_2 sur les courbes Figure 4.15, il se produit au même moment dans la décharge, soit



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov17CO_2Hot (c) Nov33CO_2Hot (d) Nov50CO_2Hot

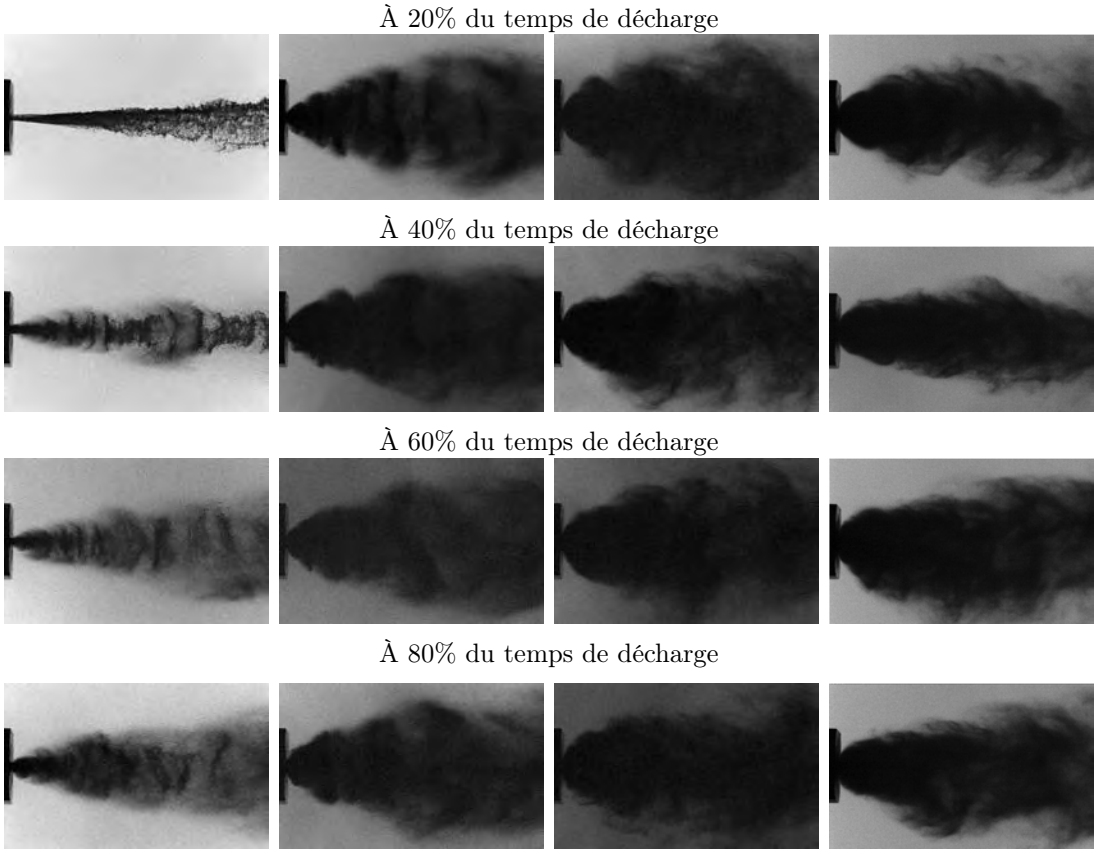
FIGURE 4.22 – Visualisations expérimentales de l'écoulement dans la veine pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à +11°C.

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Novec1230™	Gaz	Novec1230™	Gaz
Nov00CO2Hot	88%		12%	
	98,6%	1,4%	18%	82%
Nov17CO2Hot	91%		9%	
	90%	10%	16%	84%
Nov33CO2Hot	88%		12%	
	74%	26%	10%	90%
Nov50CO2Hot	93%		7%	
	53%	47%	4%	96%

TABLE 4.12 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C) sauf pour le cas à 50% en masse (11°C).

à 18%.

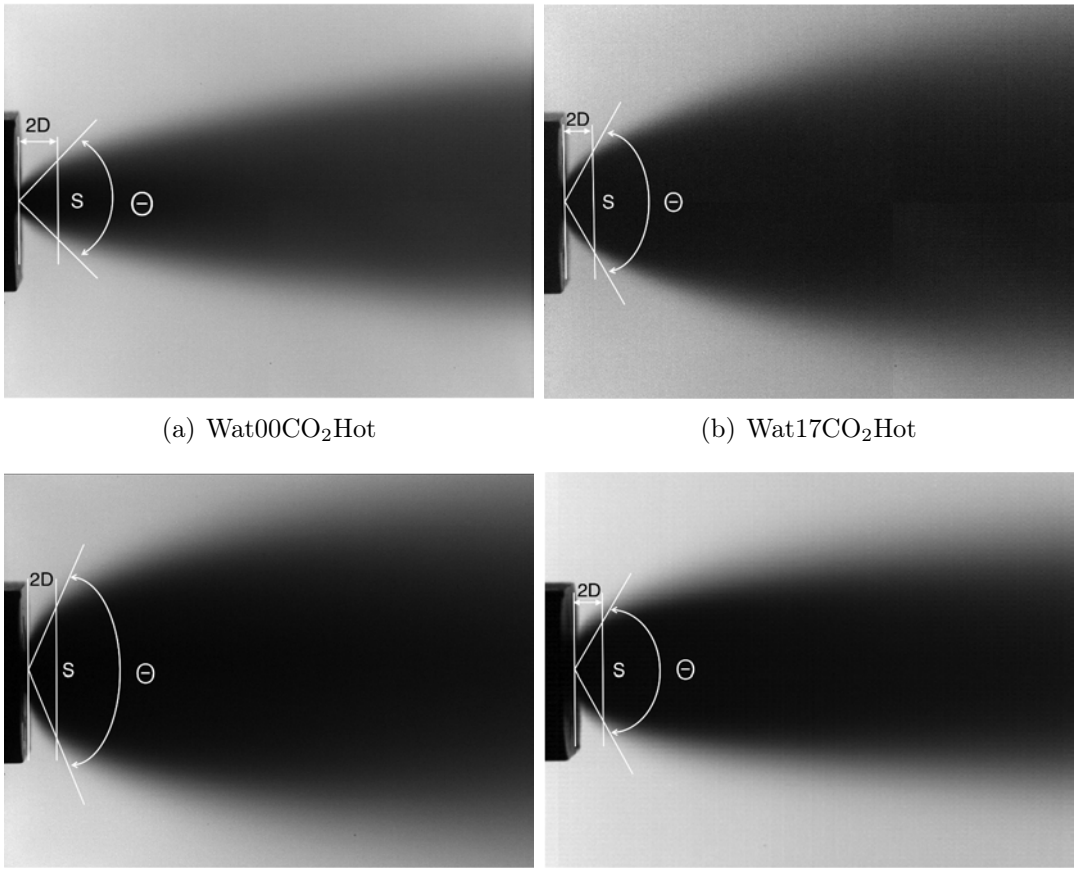
La Figure 4.23 reprend les images instantanées obtenues lors de la visualisations du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante pour les cas de 0% à 33% en masse de CO_2 et +11°C pour le cas à 50% en masse de CO_2.



(a) Nov00CO_2Hot (b) Nov17CO_2Hot (c) Nov33CO_2Hot (d) Nov50CO_2Hot

FIGURE 4.23 – Visualisations expérimentales du spray pour les décharges de Novec1230^{TM}en conditions de température ambiante (+23°C) et à 11°C.

Les images moyennes (méthode présentée Section 3.2.2 page 111) de ces décharges permettent de mesurer l'angle du cône du spray et sont présentées Figure 4.24. Pour la décharge Nov33CO_2Hot, la moyenne glissante faite sur $N = 15\ 000$ images montre que le spray est *établi* à 68%. L'image moyenne est obtenue à partir de $N = 5\ 000$ images instantanées prises entre 80 et 87% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge. Pour la décharge Nov50CO_2Hot, la moyenne glissante faite sur $N = 30\ 000$ images montre que le spray est *établi* à 65%. L'image moyenne est obtenue à partir de $N = 10\ 000$ images instantanées prisent entre 71 et 76% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge.



(a) Wat00CO_2Hot (b) Wat17CO_2Hot

(c) Wat33CO_2Hot (d) Wat50CO_2Hot

FIGURE 4.24 – Images moyennes des décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à 11°C.

Les angles du cône du spray Θ sont mesurés selon la méthode utilisée précédemment pour un cône de forme *parabolique* et sont résumés Tableau 4.13. D'après les valeurs

Nomenclature	Angle d'ouverture du spray [°]
Nov00CO_2Hot	91
Nov17CO_2Hot	121
Nov33CO_2Hot	132
Nov50CO_2Hot	121

TABLE 4.13 – Angles du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (+23°C) et à +11°C.

d'angles de sprays mesurées, on remarque qu'on atteint une valeur d'angle maximum à

33% en masse de CO_2, puis l'angle diminue. Ces résultats en lien avec le fort dégazage observé pour les décharges à 33% et 50% au même moment, soit à 18% du temps de décharge, montrent que la concentration de transition pourrait se situer plus bas que 17% en masse de CO_2.

4.4 Influence de la température du système

On étudie maintenant pour le cas du Novec1230™, l'influence de la température initiale de la bouteille en réalisant des essais à froid (-20°C). Ces décharges sont comparées aux décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante. La préparation d'un test à froid débute par le remplissage de la bouteille de décharge en conditions ambiante avec 200 mL de Novec1230™. La bouteille est ensuite pressurisée à l'azote pour le cas sans CO_2, et pour les cas à 17%, 33% et 50%, la bouteille est pressurisée au dioxyde de carbone et à l'azote jusqu'à la pression test de 40 bar. On refroidi ensuite la bouteille jusqu'à -20°C avec de la neige carbonique. Lors du refroidissement, la dissolution des gaz augmente dans le Novec1230™. Comme expliqué Chapitre 1 Section1.5, la solubilité d'un gaz augmente lorsque la température diminue [1, 28, 29]. Une sur-pressurisation à l'azote est alors nécessaire pour être à la pression test de 40 bar, la quantité d'azote sera donc supérieure pour une décharge à froid que pour une décharge à l'ambiant. En utilisant le logiciel ProSim, on peut calculer la composition initiale des phases de notre système dans ces nouvelles conditions. Le Tableau 4.14 présente la composition initiale des phases pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température froide et la Figure 4.15 rappelle la composition initiale des phases pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante pour comparer les valeurs. On remarque que la quantité de CO_2 en solution est légèrement supérieure à froid sauf pour le cas à 50%. On note également qu'à froid, la quantité de Novec1230™ en phase vapeur est plus faible qu'à l'ambiant. La vapeur saturante du Novec1230™ diminue donc avec la température dans la bouteille de décharge. La quantité de Novec1230™ en phase vapeur diminue également lorsque la quantité de CO_2 augmente.

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Novec1230™	Gaz	Novec1230™	Gaz
Nov00CO2Cold	87%		13%	
	98,5%	1,5%	3,3%	96,7%
Nov17CO2Cold	95%		5%	
	87%	13%	3%	97%
Nov33CO2Cold	95%		5%	
	70%	30%	1,4%	98,6%
Nov50CO2Cold	97%		3%	
	52%	48%	0,9%	99,1%

TABLE 4.14 – Composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C).

Nomenclature	Phase liquide		Phase vapeur	
	Novec1230™	Gaz	Novec1230™	Gaz
Nov00CO2Hot	88%		12%	
	98,6%	1,4%	18%	82%
Nov17CO2Hot	91%		9%	
	90%	10%	16%	84%
Nov33CO2Hot	88%		12%	
	74%	26%	10%	90%
Nov50CO2Hot	93%		7%	
	53%	47%	4%	96%

TABLE 4.15 – Rappel de la composition initiale des phases calculées par ProSim pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante (23°C) et à +11°C.

Lorsque la pression est à 40 bar et la température de la bouteille est à -20°C, le système est alors prêt pour une décharge. Le Tableau 4.16 reprend les conditions expérimentales des cas présentés dans cette section.

Temp. [°C]	Liquide	Gaz	Nomenclature	$\%_{masse}$ CO_2
+23	Novec1230™	N_2	Nov00CO_2Hot	0%
		CO_2 + N_2	Nov17CO_2Hot	17%
		CO_2	Nov33CO_2Hot	33%
+11			Nov50CO_2Hot	50%
-20		N_2	Nov00CO_2Cold	0%
		CO_2 + N_2	Nov17CO_2Cold	17%
			Nov33CO_2Cold	33%
			Nov50CO_2Cold	50%

TABLE 4.16 – Conditions expérimentales pour les décharges de Novec1230™ pressurisé au dioxyde de carbone et à l'azote.

4.4.1 Évolution de la pression au cours d'une décharge

La Figure 4.25 présente l'évolution de la pression dans la bouteille au cours du temps pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C) (cf. Tableau 4.16), la Figure 4.27 compare les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante à 23°C, à 11°C et froide à -20°C.

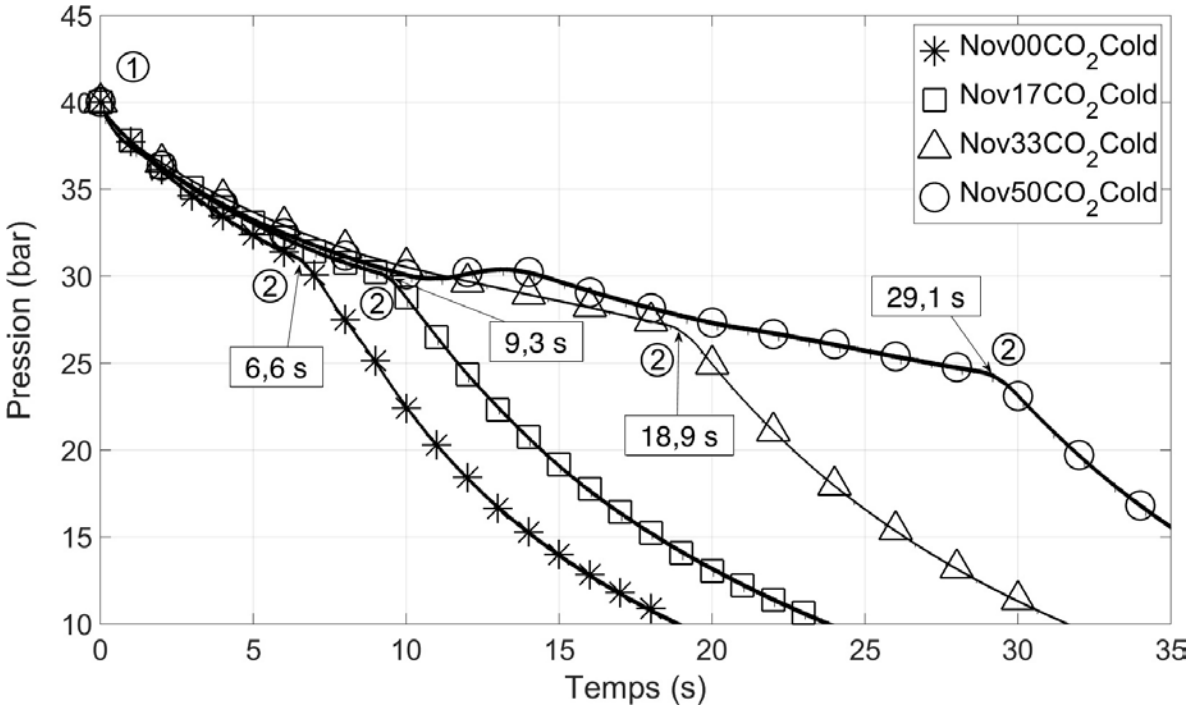


FIGURE 4.25 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C). Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

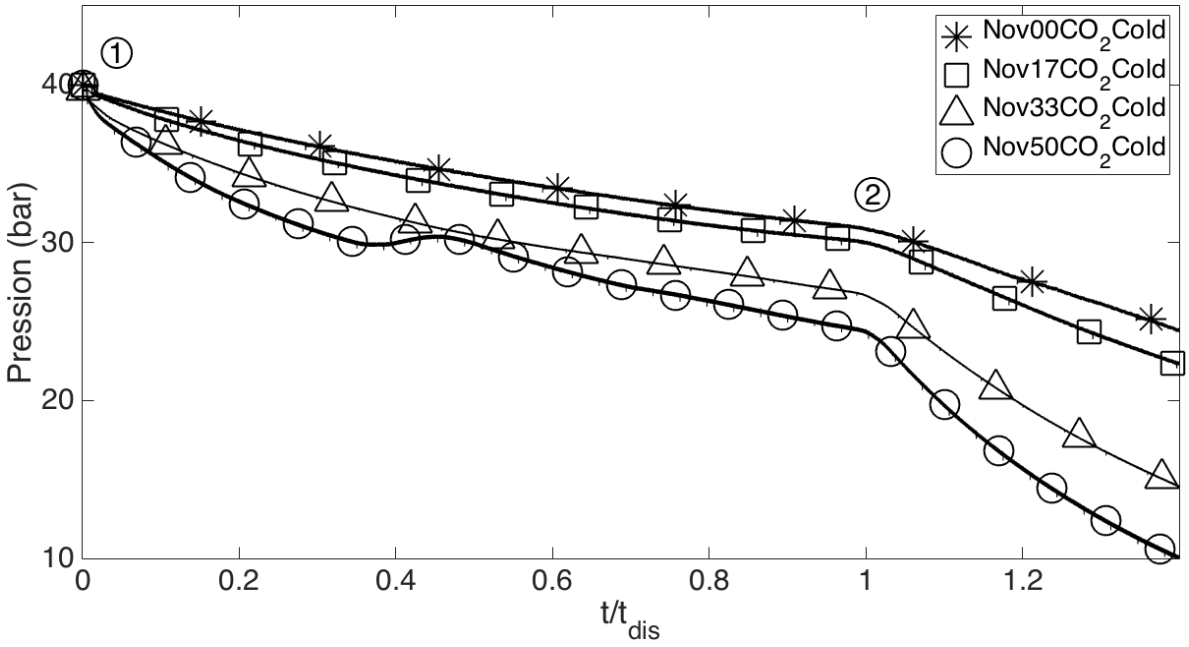


FIGURE 4.26 – Évolution temporelle adimensionnée de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C). t_{dis} le temps de décharge. Pression (P_i = 40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

À froid, dans le cas des décharges pressurisées au dioxyde de carbone, le débit de liquide est plus faible qu'à l'ambiant, et donc les temps de décharge sont plus grands. Un débit de liquide plus faible est attribué à une quantité de gaz dissout plus importante et d'après le Tableau 4.14, la quantité de CO_2 en solution est supérieure à froid par rapport à l'ambiant. Le Tableau 4.17 résume les temps de décharge pour ces essais en les comparant aux temps de décharge obtenus en conditions de température ambiante.

On remarque également que pour le cas à 33% en masse de CO_2, nous n'observons plus le fort dégazage obtenu (caractérisé par une augmentation de pression dans la bouteille) lors d'une décharge en conditions de température ambiante. Pour le cas à 50%, nous l'observons toujours mais beaucoup plus tard dans la décharge par rapport à une décharge à +11°C. La pression chute jusqu'à la pression de 29,7 bar à $t = 10,8$ secondes (soit 37% du temps de décharge, alors qu'à l'ambiant l'augmentation de pression est observé à 18% du temps de décharge), puis remontre jusqu'à 30,5 bar pendant 2,6 secondes, puis la décharge continue jusqu'au point 2 qui marque la fin de la décharge. Le dégazage est donc retardé. Ce qui est cohérent avec l'équation 4.1 de la pression de nucléation homogène P_h Section 4.3.1.

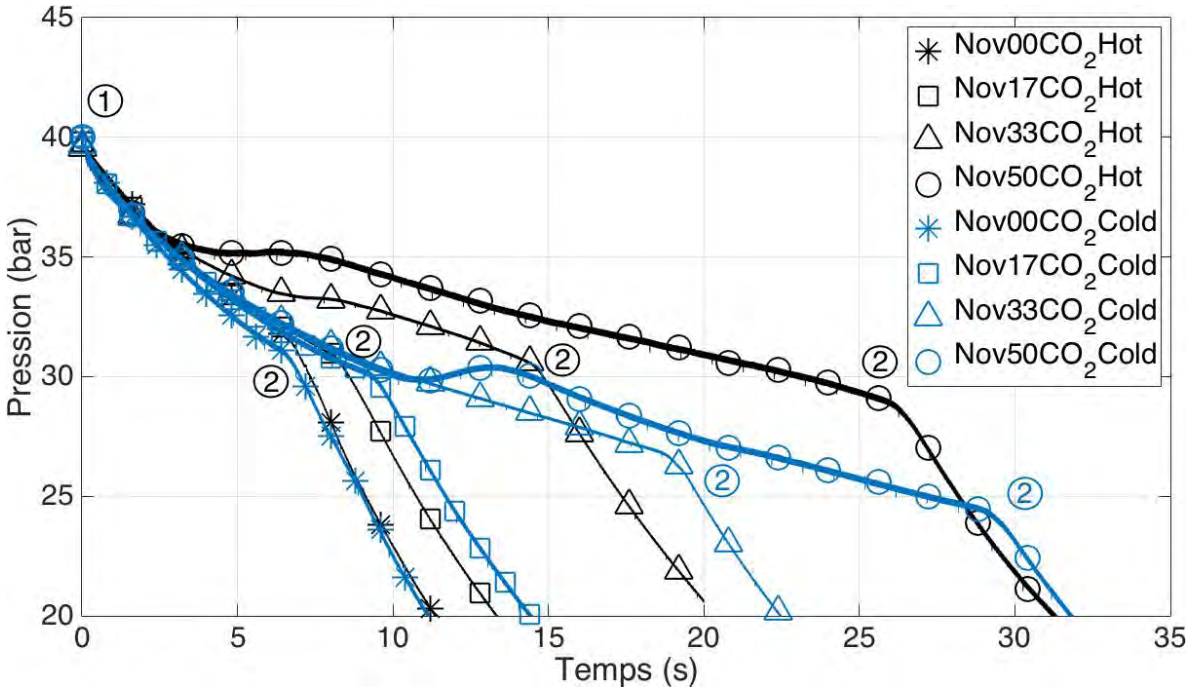


FIGURE 4.27 – Évolution temporelle de la pression dans la bouteille au cours des décharges de Novec1230™ en conditions de température froide (-20°C), ambiante (23°C) et à 11°C. Pression (40 bar) et volume de liquide (200 mL) initiaux identiques.

%CO_2 en masse	Temps de décharge à -20°C [s]	Temps de décharge à l'ambiant [s]
0%	6,6	6,6
17%	9,3	8,7
33%	18,9	15,3
50%	29,1	26,1

TABLE 4.17 – Temps décharges au Novec1230™ en conditions de température ambiante et froide.

4.4.2 Imagerie par caméra rapide

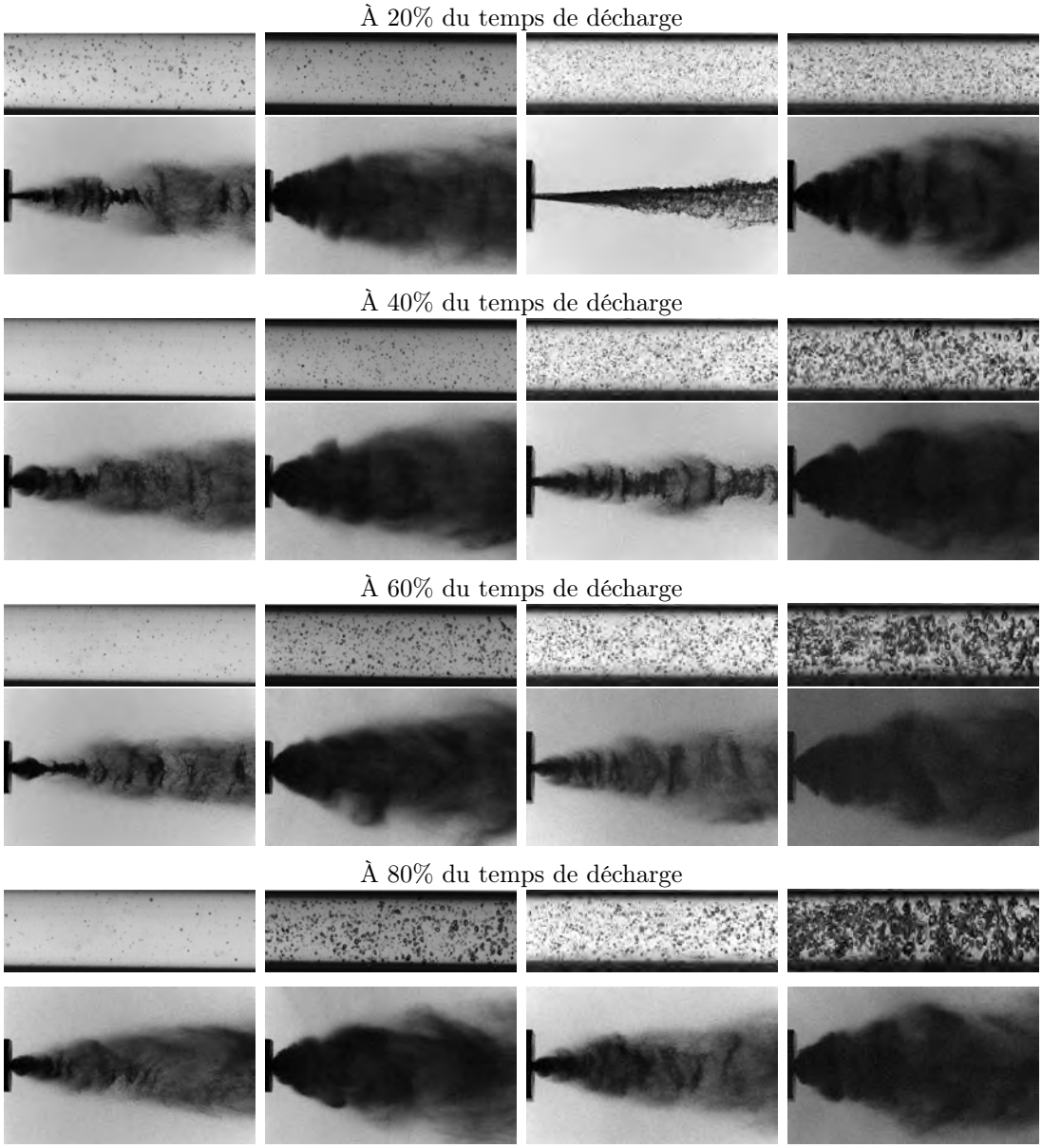
Les réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie de buse et de l'écoulement dans la veine transparente pour les décharges de Novec1230™ aux différentes concentration de CO_2 étudiées dans cette section et en conditions de température froide, sont résumés Tableau 4.18.

Nomenclature	Visualisation	f [Hz]	Expo. [μs]	Résolution [px]	Nb d'images	Tps d'enreg. [s]
Nov17CO_2Cold	Spray	10 000	1	1280 x 800	150 000	15
	Veine transparente	5 000	10	1280 x 304	120 000	24
Nov33CO_2Cold	Spray	10 000	1	1280 x 800	199 233	19,92
	Veine transparente	5 000	10	1280 x 304	160 000	31,9
Nov50CO_2Cold	Spray	10 000	1	1280 x 800	199 233	19,92
	Veine transparente	5 000	10	1280 x 304	214 090	42,8

TABLE 4.18 – Réglages de la caméra pour la visualisation du spray en sortie et de l'écoulement en amont de la buse pour les décharges de Novec1230™ pressurisé à différentes concentrations de CO_2, en conditions de température froide (-20°C).

La Figure 4.28 présente les images obtenues lors de la visualisation de l'écoulement dans la veine transparente et du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température froide comparées aux images obtenues en conditions de température ambiante pour 0% et 17% de CO_2 en masse. Le sens de l'écoulement est de la gauche vers la droite et les images sont présentées en fonction du pourcentage du temps de décharge correspondant. Le champs de la caméra est de 40 mm pour la veine transparente et de 47 mm pour le spray, dans la direction de l'écoulement.

On remarque que l'effervescence n'est pas la même à froid par rapport à l'ambiant. Pour rappel, plus la température est élevée et plus l'effervescence sera importante et les bulles d'autant plus grosses [11, 12, 46, 47]. Les décharges de Novec1230™ pressurisé à l'azote à froid sont étudiées Chapitre 3. Nous sommes dans un régime à bulles tout le long de la décharge. Lors de la visualisation dans le tube, on aperçoit de très petites bulles se former comme nous l'avons aperçu dans le cas de l'eau pressurisée au dioxyde de carbone Section 4.2.1. Ces bulles résultantes de la nucléation hétérogène, vont laisser place ensuite aux bulles naissantes de la nucléation homogène. Le phénomène est nettement plus flagrant à froid et apparaît à 33% du temps de décharge. La quantité de bulles présente est également inférieure à celle observée lors de décharges de Novec1230™ pressurisé à l'azote en conditions de température ambiante, ainsi que leur taille. À froid, ces bulles vont atteindre une taille de l'ordre de 0,3 mm, alors qu'à l'ambiant le diamètre des bulles allait jusqu'à 0,8 mm. Bien que les taux de vide soient similaires, nous observons que dans les sprays obtenus, le comportement du gaz lors de sa détente en sortie n'est pas le même.



(a) Nov00CO_2Cold (b) Nov17CO_2Cold (c) Nov00CO_2Hot (d) Nov17CO_2Hot

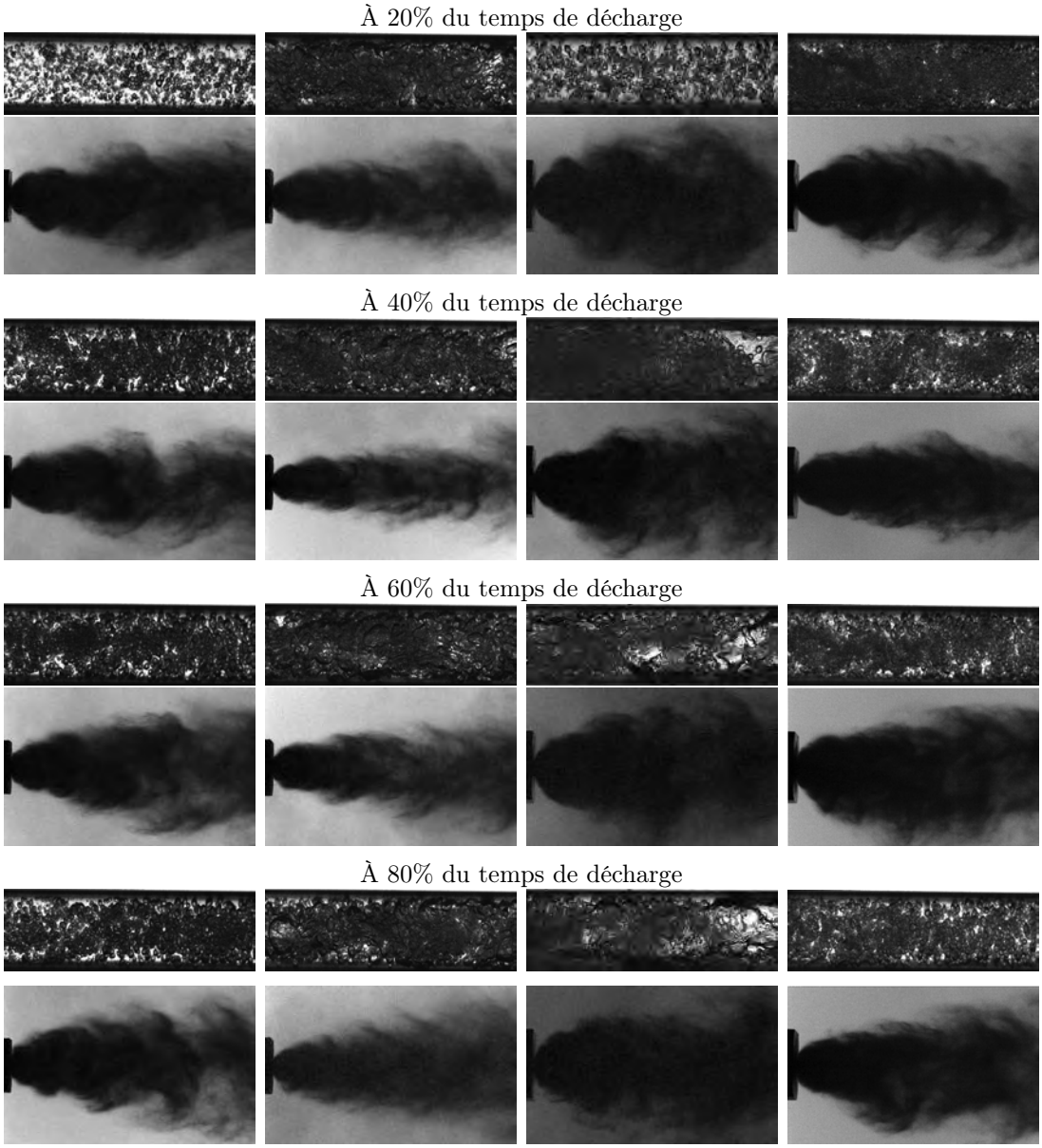
FIGURE 4.28 – Visualisations expérimentales des décharges au Novec1230™ à froid à 0% (a) et 17% (b) en masse de CO_2 comparées au décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante à 0% (c) et 17% (d) en masse de CO_2.

Pour le cas à 17% en masse de CO_2, nous sommes dans un régime à bulles durant toute la décharge, comme à l'ambiant. Cependant, la quantité de bulles est moins importante à froid pendant toute la décharge. Une "émulsion" de fines bulles apparaît à 0,6% du temps de décharge (2,3% du temps de décharge à l'ambiant). Les bulles gros-

sissent de plus en plus et coalescent jusqu'à atteindre une taille de l'ordre de 0,8 mm (1,2 mm pour une décharge à l'ambiant). Nous sommes en présence d'une nucléation homogène. Les sprays obtenus ont une structure différente comparée à celles obtenues lors de décharges de Novec1230^{TM} pressurisé à l'azote. Le cône du spray prend une forme parabolique et subit une extension radiale, très proche de l'orifice, formant un nuage de gouttes dès le début de la décharge. Il est tout de même difficile de distinguer la différente entre le cas à l'ambiant et le cas à froid.

La Figure 4.29 présente les images obtenues lors de la visualisation de l'écoulement dans la veine transparente et du spray pour les décharges de Novec1230^{TM} en conditions de température froide comparées aux images obtenues en conditions de température ambiante pour 33% et +11°C pour 50% en masse de CO_2. Le sens de l'écoulement est de la gauche vers la droite et les images sont présentées en fonction du pourcentage du temps de décharge correspondant. Le champs de la caméra est de 40 mm pour la veine transparente et de 47 mm pour le spray, dans la direction de l'écoulement. Pour le cas à 33% en masse de CO_2, le régime d'écoulement obtenu n'est pas le même. À froid, nous sommes dans un écoulement à bulles durant toute la décharge, alors qu'à l'ambiant, l'écoulement passe d'un régime à bulles à un régime dit "churn". À froid, une "émulsion" de fines bulles apparaît à 0,3% du temps de décharge. Ces bulles vont grossir de plus en plus jusqu'à atteindre une taille de l'ordre de 1,5 mm et forment un écoulement à bulles agglomérées. Le spray obtenu à froid s'élargit encore et son angle d'ouverture semble plus large en aval de la buse par rapport au cas à 17%, néanmoins le spray obtenu en conditions de température ambiante est plus large, notamment en s'éloignant de la sortie de la buse, la largeur du spray semble constante à froid.

Pour le cas à 50% en masse de CO_2, on observe l'arrivée de très petites bulles à 0,2% du temps de décharge. On passe rapidement d'un écoulement à bulles à un écoulement dit "churn", alors qu'à l'ambiant, le régime obtenu est un régime à bulles agglomérées durant toute la décharge. Pour faire le lien avec le fort dégazage obtenu sur les courbes de pression, Figure 4.25, à 37% du temps de décharge, nous ne le percevons pas visuellement sur les images. Le spray semble avoir atteint une limite d'extension radiale ainsi que son angle d'ouverture par rapport au cas à 33%, comme nous l'avions observé également dans le cas des décharges en conditions de température ambiante.

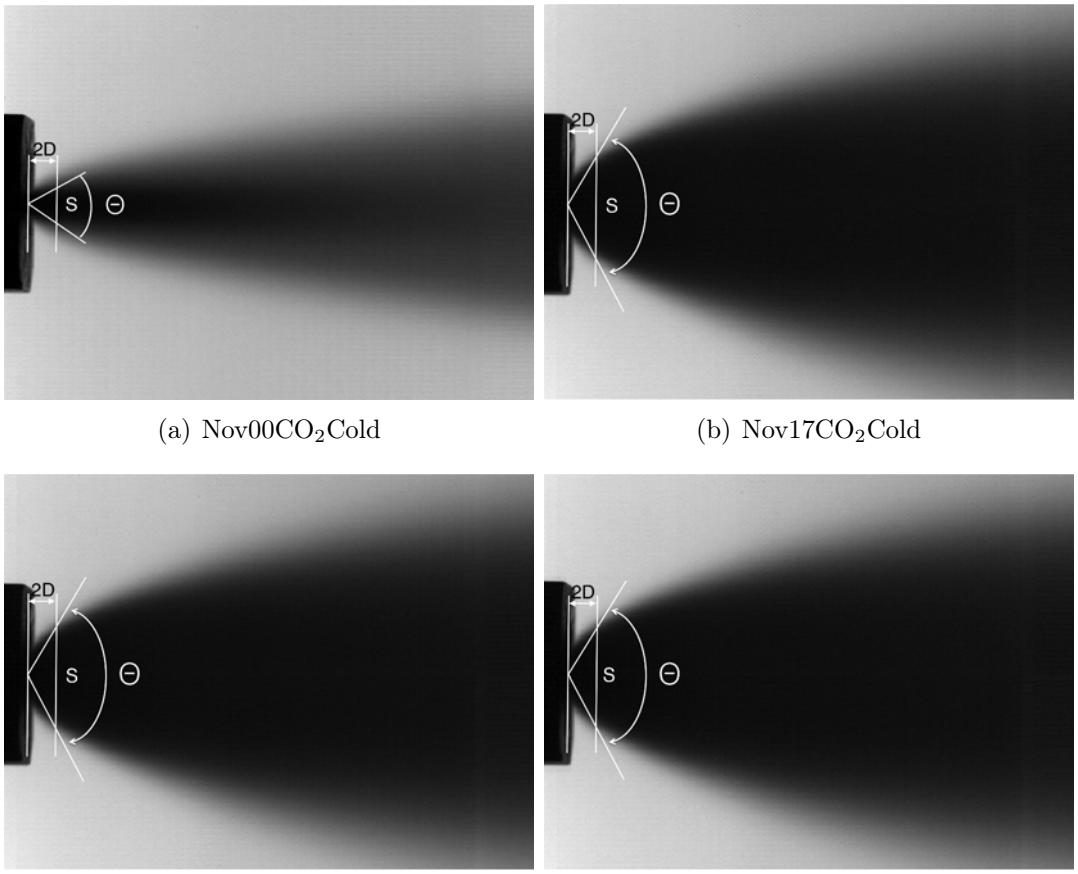


(a) Nov33CO_2Cold (b) Nov50CO_2Cold (c) Nov33CO_2Hot (d) Nov50CO_2Hot

FIGURE 4.29 – Visualisations expérimentales des décharges au Novec1230™ à froid à 33% (a) et 50% (b) en masse de CO_2 comparées au décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante à 33% (c) et +11°C à 50% (d) en masse de CO_2.

Les images moyennes (méthode présentée Section 3.2.2 page 111) de ces décharges à froid permettent de mesurer l'angle du cône du spray et sont présentées Figure 4.30. Les décharges Nov00CO_2Cold et Nov17CO_2Cold sont présentées Chapitre 3. Pour la décharge Nov33CO_2Cold, la moyenne glissante faite sur $N = 30\,000$ images montre que le spray est *établi* à 84% du temps de décharge. L'image moyenne est obtenue à partir

de $N = 10\ 000$ images instantanées prises entre 90 et 95% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge. Pour la décharge Nov50CO_2Cold, la moyenne cumulée faite sur $N = 30\ 000$ images montre que le spray est *établi* à 58% du temps de décharge. L'image moyenne est obtenue à partir de $N = 10\ 000$ images instantanées prises entre 64 et 68% du temps de décharge soit l'équivalent d'1 s de décharge.



(a) Nov00CO_2Cold (b) Nov17CO_2Cold

(c) Nov33CO_2Cold (d) Nov50CO_2Cold

FIGURE 4.30 – Images moyennes des décharges de Novec1230™ à froid (-20°C).

Les angles du cône du spray Θ sont mesurés et toutes les mesures de ces angles obtenues à froid sont résumées Tableau 4.19 et comparées aux résultats obtenus en conditions de température ambiante et la Figure 4.31 présente l'évolution de l'angle du spray en fonction de la quantité de CO_2 pour les deux températures.

Nomenclature	Angle d'ouverture du spray [°]
Nov00CO_2Cold	62
Nov00CO_2Hot	91
Nov17CO_2Cold	120
Nov17CO_2Hot	121
Nov33CO_2Cold	121
Nov33CO_2Hot	132
Nov50CO_2Cold	120
Nov50CO_2Hot	121

TABLE 4.19 – Angles d'ouverture du spray pour les décharges de Novec1230™ en conditions de température ambiante et froide.

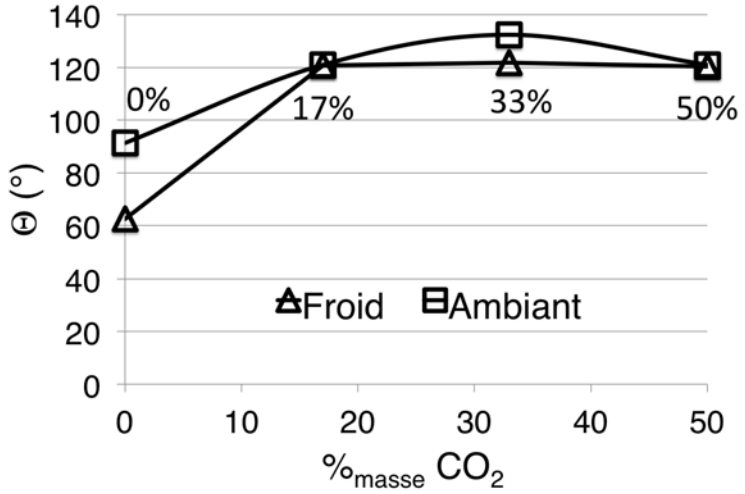


FIGURE 4.31 – Évolution de l'angle du spray en fonction de la quantité de CO_2 en conditions de température ambiante et à froid.

Bien que l'angle maximum soit atteint vers 33% en masse de CO_2 en conditions de température ambiante, l'angle sature très vite et sans doute avant 17% en masse de CO_2. À froid, la limite d'extension est atteinte à partir de 17% en masse de CO_2. Ce qui signifie que notre concentration de transition serait donc inférieure à 17%. Il serait donc intéressant de mener l'étude à plus faible quantité de CO_2 injectée. En effet, dans le cadre de notre étude, l'objectif est de minimiser la masse du système, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser autant de dioxyde de carbone.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés aux mécanismes fondamentaux qui interviennent lors de la décharge d'un liquide contenu dans une bouteille pressurisée avec un gaz hautement soluble dans ce liquide, le dioxyde de carbone. L'eau et en particulier le Novec1230™ sont testés et une variation de la composition initiale (variation de la quantité de CO_2) dans notre bouteille a permis d'étudier l'influence de la quantité de gaz dissous sur les phénomènes intervenant lors d'une décharge. Les décharges sont réalisées à iso-volume de liquide (200 mL). L'azote, qui reste le gaz propulsif faiblement soluble, vient compléter certains cas tests afin d'être à iso-pression initiale de 40 bar à chaque essai.

Les visualisations par caméra rapide dans la veine transparente nous permettent d'observer que la quantité de bulles augmente avec la quantité de CO_2 dissous. Les données de pression acquises dans la bouteille au cours d'une décharge montrent que cette présence de bulles, dû au dégazage du gaz dissous, a pour conséquence de diminuer le débit massique de liquide et donc d'augmenter le temps de décharge.

Pour le cas du Novec1230™, nous avons également étudié l'influence de la température initiale de la bouteille en réalisant des essais à -20°C. La température joue un rôle important dans la dissolution et le dégazage. Bien que la proportion phase liquide/phase vapeur soit similaire à froid et à l'ambiant, la quantité de CO_2 en solution est supérieure à froid. Le dégazage est plus faible au cours d'une décharge et intervient également plus tard dans la décharge par rapport à l'ambiant, mais malgré une présence de bulles moins importante, les temps de décharge à froid sont plus grands qu'à l'ambiant due à la quantité de CO_2 dissout dans le liquide.

Concernant les sprays, les images acquises nous permettent d'observer qu'à taux de vide nul, le jet reste relativement compact et le processus d'atomisation est globalement inefficace, comme nous l'avons observé lors de décharge d'eau pressurisée à l'azote. À l'inverse, dans le cas des décharges d'eau pressurisée au dioxyde de carbone, le comportement du gaz lors de sa détente en sortie n'est pas le même. Le jet est de plus en plus déstabilisé et subit une extension radiale avec la formation d'un nuage de gouttes autours de filaments de liquide. Pour le Novec1230™ pressurisé à l'azote, on observe la présence de bulles à faible quantité de gaz dissous durant toute la décharge. Ces bulles, résultantes de la nucléation homogène, provoquent l'éclatement du liquide en filaments et gouttelettes dès la sortie, et la détente rapide des bulles favorisent la fragmentation de ces filaments en gouttelettes. Le phénomène est amplifié avec l'utilisation du dioxyde de carbone. Le taux de vide augmente avec la quantité de CO_2, ce qui a pour conséquence de modifier considérablement le spray en sortie. Immédiatement en aval de la buse, le spray prend une forme parabolique et subit une extension radiale très rapide formant un nuage de gouttes dès le début de la décharge. L'angle du spray va augmenter avec la quantité de gaz dissous, jusqu'à atteindre une limite à partir de

33% en masse de CO_2. Mais bien que l'angle maximum soit vers 33% en masse de CO_2, l'angle sature très vite et sans doute avant 17% en masse de CO_2. À froid, les sprays obtenus atteignent une limite d'extension radiale et d'angle d'ouverture à partir de 17% en masse de CO_2. Notre concentration de transition se situerai donc en dessous de 17% en masse de CO_2. Il serait donc intéressant de mener l'étude à plus faible concentration de CO_2 injectée. Dans le cadre de notre étude, l'objectif est de minimiser la masse du système, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser autant de dioxyde de carbone. Compte tenu des résultats et de la littérature, il est plus intéressant d'obtenir un écoulement où la nucléation homogène n'intervient pas mais le liquide reste saturé, ou dans le cas d'un écoulement à bulles, d'obtenir des bulles de tailles faibles car un taux de vide élevé a pour conséquence de réduire le débit massique de liquide et l'objectif ici est de décharger l'agent le plus rapidement possible tout en gardant l'effet du gaz dissous.

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce projet était de conduire des recherches expérimentales sur le processus d'atomisation effervescente, appliquées aux systèmes de protection feux des moteurs d'avions. Dans le cadre de notre étude, les critères recherchés pour une décharge optimale sont :

— Une masse d'agent déchargée le plus rapidement possible, donc un débit massique élevé.
— La génération de fines gouttes.
— Un spray dont l'angle d'ouverture est large.
— Une système de masse faible.
— Une configuration de système la plus simple possible.

Nous avons choisi d'utiliser une buse simple-orifice. L'atomisation effervescente couple la méthode dynamique que l'on retrouve dans l'atomisation aérée, et la méthode thermodynamique que l'on retrouve dans l'atomisation flash. Cette technologie offre des améliorations potentielles en terme de qualité d'atomisation du fluide pour répondre aux problématiques industrielles.

Les différentes recherches menées ces dernières années portent en particulier sur les caractéristiques des sprays obtenus (effet de la pression d'injection, effet de la concentration en gaz dissous, effet de la géométrie des buses). Dans le cas de notre étude, nous nous sommes focalisés sur les effets de la concentration en gaz dissous. Une corrélation avec la littérature a permis de mettre en évidence l'influence des conditions initiales dans la bouteille de décharge (composition du système, température et pression initiale) sur le type d'écoulement obtenu en amont de la buse et la structure du spray. La dissolution d'un gaz hautement soluble agit sur la pulvérisation du liquide, d'une part, en analogie avec l'atomisation aérée, le gaz transforme le liquide en ligaments lorsque l'écoulement traverse l'orifice, et d'autre part, en analogie avec l'atomisation flash, le gaz se dilate après le passage de l'orifice, provoquant l'éclatement du liquide en fines gouttelettes. Lorsque la concentration en gaz dissous augmente, le spray subit une expansion immédiate en sortie de système et possède une forme parabolique caractéristique. L'angle d'ouverture est modifié et les tailles de gouttes minimisées. La

concentration de gaz dissous impacte directement l'atomisation. Plus la quantité de gaz dissous augmente, et plus les tailles de gouttes dans le spray sont petites. Sur la base de ces recherches, l'objectif était de comprendre les mécanismes d'atomisation effervescente. Jusqu'à maintenant, l'observation du spray par caméra rapide a été mis en avant. Dans notre étude, nous visualisations également l'écoulement en amont de la buse.

Un banc d'essais a été conçu et mis en place à l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse, afin de comprendre les phénomènes physiques qui interviennent lors des décharges. Les essais sont réalisés à iso-volume de liquide (200 mL), au Novec1230^{TM}et à l'eau. L'eau permet d'avoir une décharge de référence et donc un point de comparaison avec les résultats obtenus lors de décharges au Novec1230^{TM}. L'analyse des performances d'un système d'atomisation nécessite la connaissance de la taille de gouttes du spray en sortie de buse qu'il est capable de produire. Un granulomètre à diffraction laser modèle Spraytec de Mavern Instruments était à notre disposition pour notre étude. Ce diagnostic permet les mesures de granulométrie et de concentration en particules dans le spray. Cependant, la mesure des tailles de gouttes n'a pas abouti. Nous avons rencontrés des difficultés de mesure dès les premières décharges. Néanmoins, la réalisation d'essais complémentaires (utilisation d'un atomiseur à ultrasons, mis en place d'une enceinte saturée en vapeur de Novec1230^{TM}, utilisation d'une sonde optique) ont permis de mettre en évidence l'origine de ces perturbations. Le Spraytec de Malvern nécessite l'indice de réfraction du liquide et du milieu environnant pour l'analyse des résultats. Or, nous sommes en présence de trois indices de réfraction, le Novec1230^{TM}liquide, le gaz et le milieu environnant (l'air). Cette condition limite son utilisation sur notre banc d'essais et le premier facteur perturbateur rencontré est le *beam steering*. Ce phénomène s'observe lorsque la présence d'un gaz autre que l'air environnant, est présent dans la zone de mesure. L'autre facteur, prédominant dans notre cas et qui nous empêche d'utiliser le Spraytec est la variation du gradient de vapeur du Novec1230^{TM}lors d'un spray. Le Novec1230^{TM}s'évapore au cours d'une décharge et sa variation de gradient de vapeur provoque la défocalisation du laser granulomètre. La mise en place de nouveaux diagnostics pour la détermination des tailles de gouttes n'a pas été possible dans les délais de la thèse. Cependant, les images obtenues en amont de la buse en corrélation avec la littérature nous ont permis de mettre en évidence l'influence des gaz dissous sur le processus d'atomisation (ouverture du cône du spray, tailles des gouttes). Nous nous sommes donc focalisés sur l'étude de l'influence des conditions initiales et donc des propriétés thermodynamiques du système dans notre bouteille de décharge sur le processus d'atomisation.

Les tests sont réalisés à iso-pression initiale (40 bar). Une variation de la quantité de CO_2, autrement dit la variation de l'agent dans la bouteille de décharge, permet d'observer l'influence du gaz dissous sur le processus d'atomisation (phénomènes intervenant dans la bouteille de décharge, écoulements en amont de la buse, impact sur le spray). Le CO_2 est un gaz très soluble dans le Novec1230^{TM}, et peu soluble dans l'eau. L'azote, quant à lui, sert de gaz propulsif et vient compléter les cas tests pour être à

la pression test de 40 bar. Deux installations de la bouteille de décharge permettront de mener des campagnes d'essais en conditions de température ambiante et à froid (-20°C), pour le cas du Novec1230™, grâce à un refroidissement de la bouteille avec de la neige carbonique, dans le but d'observer l'influence de la température initiale. Les données de pression acquises dans la bouteille de décharge au cours d'une décharge, permettent d'obtenir l'évolution temporelle de la pression. D'après ces courbes et grâce au suivi temporel des décharges par caméra rapide, on peut déterminer le temps de chaque décharge.

Le logiciel Simulis Thermodynamics de ProSim, permet le calcul d'équilibre entre phase de notre système, à partir des propriétés thermodynamiques de chaque constituant. Ce logiciel fournit un support pour la compréhension des phénomènes qui interviennent dans la bouteille de décharge en fonction de la composition de l'agent.

Dans un premier temps, des décharges d'eau et de Novec1230™ pressurisés à l'azote sont réalisées. On distingue deux régimes lors d'une décharge : un régime hydraulique correspondant à la vidange du liquide pressurisé, et un régime pneumatique correspondant à la purge du ciel gazeux restant dans la bouteille de décharge. La durée d'une décharge est pilotée par la pression test initiale et la fraction volumique de liquide, qui sont les mêmes pour les deux liquides. Les propriétés chimiques jouent également un rôle dans le temps de décharge. Le Novec1230™ a une masse volumique plus importante que l'eau, ce qui contribue à l'augmentation du temps de décharge. Les visualisations par caméra rapide ont montré la présence de bulles dans l'écoulement en amont de la buse lors des décharges de Novec1230™/N_2. Ces bulles sont présentes durant toute la décharge et sont dues au dégazage de l'azote dissous. Nous sommes donc en présence d'une nucléation homogène. Le logiciel ProSim confirme qu'une faible quantité d'azote ($< 2\%$ en masse) se dissous dans le Novec1230™ que ce soit en conditions de température ambiante ou froide. La température jouant un rôle important sur la dissolution et le dégazage, on observe une présence de bulles moins importante à froid. Plus la température sera élevée et plus l'effervescence sera importante avec des bulles d'autant plus grosses. Concernant les sprays, les images acquises nous permettent d'observer qu'à taux de vide nul, le jet reste relativement compact et le processus d'atomisation est globalement inefficace, comme nous l'avons observé lors des décharges eau/N_2. Dans le cas du Novec1230™, les images du spray ont montrés que la présence de bulles en amont de la buse modifiait la structure du spray en sortie. Ces bulles provoquent l'éclatement du liquide en filaments et gouttelettes dès la sortie, et la détente rapide des bulles favorisent la fragmentation des ces filaments en gouttelettes. Ces résultats montrent qu'à très faible quantité de gaz dissous, le spray est déjà fortement modifié. Cette faible quantité de gaz dissous diminue le débit massique, ce qui a pour conséquence d'augmenter le temps de décharge du liquide.

Un modèle (effet de la pression et de la température initiale) du banc de décharge a été en mis en place. Basé sur les équations thermodynamique, il permet d'obtenir l'évo-

lution de la pression dans la bouteille de décharge en fonction des conditions initiales. Ce modèle nous permet d'obtenir une bonne approximation de l'évolution temporelle de la pression lors d'une décharge d'eau pressurisée à l'azote. Cependant, dans le cas d'une décharge au Novec1230™, nous ne sommes pas en mesure de prédire le taux de vide induit par la présence de bulles due à la faible dissolution de l'azote, que ce soit en conditions de température ambiante ou à froid.

On s'intéresse alors aux mécanismes fondamentaux qui interviennent lors de la décharge d'un liquide pressurisé avec un gaz hautement soluble dans ce liquide, le dioxyde de carbone. L'eau et le Novec1230™sont testés et une variation de la composition initiale (variation de la quantité de CO_2) dans la bouteille de décharge permet d'étudier l'influence de la quantité de gaz dissous sur les phénomènes intervenant lors d'une décharge. Les visualisations par caméra rapide dans la veine transparente nous permettent d'observer que la quantité de bulles augmente avec la quantité de CO_2 dissous. Les données de pression acquises dans la bouteille au cours d'une décharge montrent que cette présence de bulles, dû au dégazage du gaz dissous, a pour conséquence de diminuer le débit massique de liquide et donc d'augmenter le temps de décharge. Pour le cas du Novec1230™, bien que la quantité de gaz dissous soit équivalente à l'ambiant et à froid, le dégazage est plus faible au cours d'une décharge et intervient plus tard dans la décharge à -20°C par rapport à l'ambiant. Mais malgré une présence de bulles moins importante, les temps de décharge à froid sont plus grands qu'à l'ambiant due à la quantité de CO_2 dissout dans le liquide. La température jouant un rôle important sur la dissolution et le dégazage, la présence de bulles est moins importante. Plus la température sera élevée et plus l'effervescence sera importante avec des bulles d'autant plus grosses. Concernant les sprays, immédiatement en aval de la buse, le spray prend une forme parabolique et subit une extension radiale très rapide formant un nuage de gouttes dès le début de la décharge. À l'ambiant, l'angle du spray va augmenter avec la quantité de gaz dissous, jusqu'à atteindre une limite à partir de 33% en masse de CO_2. Mais bien que l'angle maximum soit atteint vers 33% en masse de CO_2, l'angle sature très vite et sans doute avant 17% en masse de CO_2. À froid, les sprays obtenus atteignent une limite d'extension radiale et d'angle d'ouverture à partir de 17% en masse de CO_2. En effet, compte tenu des critères recherchés pour obtenir une décharge optimale, il est nécessaire de faire un compromis afin d'obtenir un spray large tout en ayant un débit massique élevé. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser autant de CO_2. Etudier l'influence du gaz dissous à une concentration inférieure à 17% serait pus intéressante pour l'industriel. Ici, nous nous sommes placés dans une configuration en rapport avec le système Airbus, leurs difficultés résidants dans la réalisation des essais à froid. Nous avons fait des décharges à concentration modérée et à haute concentration de gaz dissous. Compte tenu des résultats et de la littérature, il est plus intéressant d'obtenir un écoulement où la nucléation homogène n'intervient pas mais le liquide reste saturé, ou dans le cas d'un écoulement à bulles, d'obtenir des bulles de tailles faibles car un taux de vide élevé a pour conséquence de réduire le débit massique de liquide et l'objectif ici est de décharger l'agent le plus rapidement possible tout en

gardant l'effet du gaz dissous. En terme de perspectives, la théorie pour le dégazage du processus d'atomisation effervescente, ainsi que la théorie pour prédire la structure du spray en fonction du taux de vide en amont de la buse, restent à développer. Pour le dimensionnement du système, il serait également intéressant d'étudier l'influence de la pression sur l'atomisation (enveloppe de vol), la pression n'étant pas la même à chaque point de vol, ainsi que l'influence de la variation de la taille de l'orifice en sortie et les longueurs/largeurs de tube. Une visualisation directe dans la bouteille permettrait de confirmer l'augmentation du volume de liquide lors du dégazage et d'obtenir une estimation de la composition liquide et vapeur de la bouteille de décharge. L'utilisation de diagnostics tel que le Laser Induced Fluorescence (LIF) permettrait d'obtenir des informations sur la phase vapeur composant le spray en sortie de système.

Le phénomène d'atomisation effervescente apparait comme étant une technologie prometteuse, applicable à d'autres fluides, et pas seulement au Novec1230$^{\text{TM}}$. Cette technique d'atomisation diphasique offre des améliorations potentielles en terme de qualité d'atomisation du fluide.

Références

[1] A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*. Taylor & Francis Group, 1989.

[2] A. Rashkovan, V. Kholmer, and E. Sher, "Effervescent Atomization of Gasoline Containing Dissolved CO2," *At. Sprays*, vol. 14, 2004.

[3] T. N. H. Zhen, S. Yiming, S. Shiga, H. Nakamura, T. Karasawa, "Atomization Behavior of Fuel Containing Dissolved Gas," *At. Sprays*, vol. 4, pp. 253–262, 1994.

[4] G. Caputo, R. Adami, and E. Reverchon, "Analysis of Dissolved-Gas Atomization : Supercritical CO2 Dissolved in Water," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49, pp. 9454–9461, oct 2010.

[5] J. C. Yang, T. G. Cleary, I. Vazquez, C. I. Boyer, M. D. King, B. D. Breuel, C. Womeldorf, W. L. Grosshandler, M. L. Huber, and L. Weber, "Optimization Of System Discharge," 1995.

[6] G. M. Faeth, "Structure and atomization properties of dense turbulent sprays," *Symp. Combust.*, vol. 23, no. 1, pp. 1345–1352, 1991.

[7] R. D. Reitz, *Atomization and other breakup regimes of a liquid jet*. PhD thesis, 1978.

[8] L. Cheng, G. Ribatski, and J. R. Thome, "Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps : Fundamentals and Applications," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 61, no. 5, p. 050802, 2008.

[9] J. R. Thome, *Two-Phase Flow Patterns*. 2007.

[10] W. Dodds, L. Stutzman, and B. Sollami, "Carbon Dioxide Solubility In water," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 1, no. 1, pp. 92–95, 1956.

[11] W. Drenckhan and A. Saint-Jalmes, "The science of foaming," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 222, pp. 228–259, 2015.

[12] S. Jones, G. Evans, and K. Galvin, "Bubble nucleation from gas cavities - a review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 80, no. 1, pp. 27–50, 1999.

[13] P. Ashurst, B. Taylor, K. O'Donnell, D. Steen, R. Lea, G. Giles, D. Hammond, P. Wareing, R. Davenport, J. Whitehead, and Q. Palmer, *Chemistry and Technology of Soft Drinks and Fruits*, vol. 53. Blackwell Publishing, second edi ed., 2005.

[14] S. Sovani, P. Sojka, and A. Lefebvre, "Effervescent Atomization," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 27, pp. 483–521, jan 2001.

[15] A. H. Lefebvre, X. F. Wangt, and P. H. Corporation, "Spray Characteristics of Aerated-Liquid Pressure Atomizers," *J. Propuls.*, vol. 4, pp. 293–298, 1988.

[16] M. Karaeen and E. Sher, "Spray characteristics of diesel fuel containing dissolved CO2," *At. Sprays*, vol. 21, no. 11, 2011.

[17] A. S. P. Solomon and L.-d. Chen, "Investigation of Spray Characteristics for Flashing Injection of Fuels Containing Dissolved Air and Superheated Fuels," Tech. Rep. June, NASA, 1982.

[18] T. Cleary, J. Yang, M. King, C. I. Boyer, and W. L. Grosshandler, "Pipe Flow Characteristics of Alternative Agents for Engine Nacelle Fire Protection," *Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1995.

[19] D. G. Elliott, P. W. Garrison, G. a. Klein, K. M. Moran, and M. P. Zydowicz, "Flow of nitrogen-pressurized Halon 1301 in fire extinguishing systems," tech. rep., NASA, 1984.

[20] M. Ochowiak, L. Broniarz-Press, and J. Rozanski, "The discharge coefficient of effervescent atomizers," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 34, pp. 1316–1323, nov 2010.

[21] S. Sovani, J. Crofts, P. Sojka, J. Gore, and W. Eckerle, "Structure and steady-state spray performance of an effervescent diesel injector," *Fuel*, vol. 84, pp. 1503–1514, mar 2005.

[22] W. J. Hughes and D. Ingerson, "Minimum Performance Standards for Aircraft Engine and APU Compartment Fire Extinguishing Agents / Systems," tech. rep., Federal Aviation Administration.

[23] T. W. Forest and C. A. Ward, "Homogeneous nucleation of bubbles in solutions at pressures above the vapor pressure of the pure liquid," *J. Chem. Phys.*, vol. 69, no. 5, p. 2221, 1978.

[24] P. B. Whalley, *Boiling Condensation and Gas-Liquid Flow*. Oxford Science, 1987.

[25] P. V. Godbole, C. C. Tang, and A. J. Ghajar, "Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in upward vertical two-phase flow," *Heat Transf. Eng.*, vol. 32, no. 10, pp. 843–860, 2011.

[26] J. G. Collier and J. R. Thome, *Convective Boiling and Condensation*. Oxford Science Publications, 2001.

[27] R. Battino and H. L. Clever, *The Solubility of Gases in Liquids*. 1965.

[28] C. K. W. Friedli, *Chimie Générale pour Ingénieur - p.305*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2005.

[29] C. Dietz, *Thèse pour le Doctorat en Médecine.* PhD thesis, 1840.

[30] D. W. Oxtoby, "Homogeneous Nucleation : Theory and Experiment," *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 4, no. 38, pp. 7627–7650, 1992.

[31] T. W. Forest and C. A. Ward, "Effect of a Dissolved Gas on the Homogeneous Nucleation Pressure of a Liquid," *J. Chem. Phys.*, vol. 66, no. 6, p. 2322, 1977.

[32] G. Wild and N. Midoux, "La Désorption Nucléée en Génie Chimique," *La Houille Blanche*, no. 2, pp. 163–170, 1988.

[33] M. Ochowiak and L. Broniarz-Press, "Atomization performance of effervescent atomizers with gas-liquid internal mixing," *Polish J. Chem. Technol.*, vol. 10, pp. 38–41, jan 2008.

[34] X. Huang, X. Wang, and G. Liao, "Characterization of an effervescent atomization water mist nozzle and its fire suppression tests," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 33, pp. 2573–2579, jan 2011.

[35] L. Haar, *NBS/NRC Steam Tables : Thermodynamic and Transport Properties and Computer Program for Vapor and Liquid States of Water in SI Units.* Hemisphere Pub. Corp., 1984.

[36] Z. Huang, Y. Shao, S. Shiga, and H. Nakamura, "Controlling mechanism and resulting spray characteristics of injection of fuel containing dissolved gas," *J. Therm. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 191–199, 1994.

[37] H. P. Gadgil and B. N. Raghunandan, "Some features of spray breakup in effervescent atomizers," *Exp. Fluids*, vol. 50, pp. 329–338, jul 2010.

[38] J. Jedelsky and M. Jicha, "Energy conversion during effervescent atomization," *Fuel*, vol. 111, pp. 836–844, sep 2013.

[39] M. Mojtabi, N. Chadwick, G. Wigley, and J. Helie, "The effect of flash boiling on break up and atomization in GDI sprays," *22nd Eur. Conf. Liq. At. Spray Syst.*, pp. 8–10, 2008.

[40] G. Huang, X., Wang, X., Liao, "Visualization of Two Phase Flow Inside an Effervescent Atomizer," *J. Vis.*, vol. 4, pp. 299–308, 2008.

[41] M. Hong, B. a. Fleck, and D. S. Nobes, "Unsteadiness of the internal flow in an effervescent atomizer nozzle," *Exp. Fluids*, vol. 55, p. 1855, nov 2014.

[42] H. Vu and G. Aguilar, "High-Speed Internal Nozzle Flow Visualization of Flashing Jets," *Proc. ICLASS 2009*, no. July, 2009.

[43] H. Uchida and H. Nariai, "Discharge of Saturated Water Through Pipes and Orifices," in *ASME, Proc. Third Int. Heat Transf. Conf.*, pp. 1–12, 1967.

[44] 3M, "Properties of 3m novec(tm)1230 fire protection fluid.," tech. rep.

[45] J. R. Thome, *Chapter 12 - Two-Phase Flow Patterns.* Wolverine Tube, Inc, 2007.

[46] J. R. G. Liger-Belair, *Les Vins Effervescents. Du Terroir à La Bulle.* Editions La Vigne, 2008.

[47] Karl-Maximilien Valant, *Hétéronucléation des bulles dans des liquides sursaturés en CO2.* PhD thesis, Université de Marne-la-Vallée, 2005.

[48] P. Chassaing, *Mécaniques des Fluides. Eléments d un Premier Parcours.* Cepadues Editions, 2000.

[49] N. website, "Discharge coefficient for nozzles and orifices.".

[50] S. K. Chen and A. H. Lefebvre, "Discharge Coefficients for Plain-Orifice Effervescent Atomizers.," *Atomization and Sprays 4(3) :275-290*, 1994.

[51] P. S. J. G. R. Wade, J.M. Weerts, "Effervescent Atomization at Injection Pressures in the MPa range.," *Atomization and Sprays 3(6)*, 1999.

[52] S. D. Sovani, E. Chou, P. E. Sojka, J. P. Gore, W. A. Eckerle, and J. D. Crofts, "High pressure effervescent atomization : Effect of ambient pressure on spray cone angle," *Fuel*, vol. 80, no. 3, pp. 427–435, 2000.

[53] R. Roumy, "Structure Des Ecoulements Diphasiques Eau-Air," tech. rep., Commissariat à l'Energie Atomique, 1969.