



HAL
open science

Visualisation, granulométrie et évaporation de gouttes et de sprays – Etude dans une atmosphère close et pressurisée

Aurélia Lassaue

► **To cite this version:**

Aurélia Lassaue. Visualisation, granulométrie et évaporation de gouttes et de sprays – Etude dans une atmosphère close et pressurisée. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0601 . tel-00667898

HAL Id: tel-00667898

<https://theses.hal.science/tel-00667898>

Submitted on 8 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2011 EMSE 0601

THÈSE

présentée par

Aurélia LASSAUCE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

Visualisation, granulométrie et évaporation de gouttes et de sprays – Etude
dans une atmosphère close et pressurisée

soutenue à Alès, le 22 février 2011

Membres du jury

Présidente :	Valérie LAFOREST	Maître de Recherche, HDR, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne
Rapporteurs :	Jean-Marie BUCHLIN	Professeur, HDR, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Rhode-Saint-Genèse
	Jean-Bernard BLAISOT	Maître de Conférences, HDR, Université de Rouen – CORIA UMR 6614, Rouen
Examineurs :	Laurent APRIN	Maître-Assistant, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines, Alès
	Pierre SLANGEN	Chargé de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines, Alès
	Laurent MUNIER	Ingénieur des Etudes et des Techniques d'Armement, CEA, Gramat
	Eric DANIEL	Professeur, Université de Provence, Marseille
Directeur de thèse :	Gilles DUSSERRE	Directeur de Recherche, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines, Alès

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. BUCHLIN et M. BLAISOT pour le temps qu'ils m'ont accordé au cours de ces travaux de thèse, pour avoir accepté de juger ce travail et pour leur contribution à l'amélioration de ce manuscrit.

Je tiens à remercier Laurent MUNIER, Emmanuel LAPEBIE et Christian LE-GALLIC du CEA Gramat de m'avoir permis de travailler sur un sujet si riche et si passionnant.

Merci à Gilles DUSSERRE, mon Directeur de thèse, pour m'avoir fait confiance pour mener à bien ce travail de recherche.

Un grand merci à Laurent APRIN, ton soutien et ta bonne humeur m'ont bien aidé à traverser les moments difficiles. Sans ton enthousiasme et tes remarques, ce travail ne serait pas ce qu'il est.

Merci à Pierre SLANGEN pour tes remarques et tes conseils durant ces trois ans. Ta passion pour l'optique restera gravée dans ma mémoire !

Merci également à toute l'équipe Risques Industriels et Naturels du Laboratoire du Génie de l'Environnement Industriel et des risques : Aurélia, Fred H., Fred L., Jérôme, Pierre-Alain, David, Flo, Roro, Nico, pour leur sympathie, leur bonne humeur et leurs conseils. Un grand merci aux doctorants : Mélanie, Véronica, Aurélie, Lucie, Marie, Clémence, Virginie, Karol, Paul, Denis, Boris, Vincent, Serge et plus généralement aux doctorants des trois laboratoires de recherche de l'Ecole des Mines d'Alès. Merci à ATHEMA pour les bons moments passés lors de pots ou encore des Journées Des Doctorants.

Merci à Miguel LOPEZ-FERBER de m'avoir accueilli au Laboratoire du Génie de l'Environnement Industriel et des risques, où j'ai passé trois ans très enrichissants.

Merci aux secrétaires Cathy, Corinne, Andrée, Dominique et Marjorie, ainsi qu'à Michelle BRUN, pour leur aide pour les diverses formalités administratives.

Merci à toutes les autres personnes qui m'ont soutenue durant ces trois années.

Enfin, mes plus chaleureux remerciements s'adressent à mes proches pour leur soutien quotidien.

Spécialités doctorales :

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	G2I
BORBELY	Andras	MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	PR 2	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSÉ	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MALLIARAS	George Grégory	PR 1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 0	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 0	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 0	Professeur classe exceptionnelle
PR 1	Professeur 1 ^{ère} classe
PR 2	Professeur 2 ^{ème} classe
MA(MDC)	Maître assistant
DR	Directeur de recherche
Ing.	Ingénieur
MR(DR2)	Maître de recherche
CR	Chargé de recherche
EC	Enseignant-chercheur
IGM	Ingénieur général des mines

Centres :

SMS	Sciences des Matériaux et des Structures
SPIN	Sciences des Processus Industriels et Naturels
SITE	Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
G2I	Génie Industriel et Informatique
CMP	Centre de Microélectronique de Provence
CIS	Centre Ingénierie et Santé

N° d'ordre : 2011 EMSE 0601

Aurélia LASSAUCE

VISUALIZATION, GRANULOMETRY AND EVAPORATION OF DROPS AND SPRAYS – STUDY IN CLOSE AND PRESSURIZED ATMOSPHERE

Speciality : Sciences et Génie de l'Environnement

Keywords : Evaporation, Drop, Drops, Spray, Pressure, Image processing, Thresholding, Calibration, Transmission lighting, Explosion, Storage, Chemical products

Abstract :

The explosion in a confined environment is one of the scenarios taken into account when conducting a risk assessment on an industrial plant storing toxic and / or flammable products. This explosion will cause a sudden increase in pressure and temperature in this environment and will cause almost instantaneous phase change of liquid dispersed, after a catastrophic loss of containment. A better understanding of physical mechanisms involved will allow more precise characterization of the kinetics of evaporation of toxic liquids and / or flammable during accidental releases at industrial sites.

The liquid spray was studied extensively during the last fifty years, in various environments, both at atmospheric pressure and ambient temperature and at high pressures and temperatures. This work was mainly recorded in the areas of automotive, aeronautical and aerospace industries to better understand the mechanisms of evaporation and combustion in engines and very few in the area of industrial risks. However, these studies do not explore in detail the influence of a pressure between 100 and 600 KPa on the granulometry and evaporation of a jet of liquid chemicals, in particularly for the characteristic times studied.

The objective of this thesis is to determine the influence of ambient pressure between 100 and 600 KPa on the evaporation of a drop, and on the evaporation of a spray in the same conditions. Thus, various tests are performed using particle-size studies.

This work is divided into several stages. The first step is to study the influence of ambient pressure on the evolution of the shape, the diameter, the speed and the evaporation rate of a drop of liquid in free fall. The technique used to obtain these measurements consists of a transmission lighting system and a high-speed camera. The images of the films obtained are analyzed by an image processing software. A methodology was developed to calibrate the measurement technique and minimize measurement errors on the particle size. This method of image analysis allows visualization of particles up to 50 microns in diameter and measuring particles up to 400 microns in diameter. With this technique, particles measurements are 15% less accurate than same measurements performed with binocular microscope. However, the

technique developed allows to measure particles in movement in contrary to the binocular microscope.

In parallel, an analytical model of evaporation of falling drops has been developed. This model comes from a free-fall drop evaporation model available in the literature and has been modified during this thesis to take into account the influence of the ambient pressure. Moreover, particular attention was paid to the determination of an appropriate correlation for the drag coefficient to take account of changes in the shape of the drops during their fall. The model developed has been validated for different fluids and different diameters of drops between 0,5 and 6,5 mm. The comparison of experimental results with the model developed presents a maximum deviation below 10% (for the diameter and the velocity of a 4.7 mm acetone drop). Ultimately, this model of evaporation of drops will be applied to a spray. Thus, a spray evaporation model has been chosen among those available in the literature and modified to take into account the influence of the pressure. The main difference between the drop evaporation model developed and a model of evaporating spray is taken into account the training of air and the vapor concentration away from the drop. The comparison between the model of evaporation of drops developed and the spray evaporation model modified is then presented to show the limits of this drop evaporation model when applied to the evaporation of a spray.

The second phase of the study was to apply the measurement techniques and analysis developed previously to study the drop size of a spray. Several tests were carried out with water and a solution of water and PolyEthylene Glycol 400 at 10% to characterize the influence of three parameters: ambient pressure, the injection pressure of the liquid and the nature of the liquid. The analysis of the results allowed developing a statistical model to determine the size of the drops of these sprays. These results showed different trends depending on each of these three parameters: it seems than an increase of ambient pressure, an increase of the liquid injection pressure and a decrease of the liquid surface tension show an increase of the number of the small drops in the spray. However, these results have to be weighted regarding to the standard deviations obtained on the experimental measures. Finally, the granulometry obtained experimentally has allowed to propose an estimation of the evaporation rate of the spray thanks to the spray evaporation model modified.

The prospective in the short term of this thesis are to perform the measurement technique and to validate the experimental measures with other optical measurement techniques, like Phase Doppler Interferometry or Laser Diffraction Granulometry. In the longer term analysis of the kinetics of evaporation will model the resulting atmospheric dispersion. A better assessment of risk areas for accidents will be possible and the barriers of the most effective protection can be developed.

N° d'ordre : 2011 EMSE 0601

Aurélia LASSAUCE

VISUALISATION, GRANULOMETRIE ET EVAPORATION DE GOUTTES ET DE SPRAYS – ETUDE EN ATMOSPHERE CLOSE ET PRESSURISEE

Spécialité : Sciences et Génie de l'environnement

Mots clefs : Evaporation, Goutte, Gouttes, Spray, Pression, Traitement d'images, Seuillage, Calibration, Eclairage par transmission, Explosion, Stockage, Produits chimiques

Résumé :

L'explosion en milieu confiné fait partie des scénarios pris en compte lors de la réalisation d'une étude de dangers sur une installation industrielle stockant des produits toxiques et/ou inflammables. Cette explosion va entraîner une brutale augmentation de la pression et de la température dans ce milieu et provoquer quasi-instantanément le changement de phase des produits liquides dispersés, suite à une rupture de stockage. La meilleure compréhension des mécanismes physiques mis en jeu permet ainsi une caractérisation plus précise de la cinétique d'évaporation de ces produits liquides toxiques et/ou inflammables lors des rejets accidentels sur sites industriels.

La vaporisation de liquide été largement étudiée, durant les cinquante dernières années, dans divers environnements, aussi bien à pression atmosphérique et à température ambiante qu'à hautes pressions et hautes températures. Ces travaux se sont inscrits dans les domaines tels que l'automobile, l'aéronautique et l'aérospatiale pour mieux comprendre les mécanismes d'évaporation et de combustion dans les moteurs mais très peu dans le domaine des risques industriels. Cependant, l'ensemble de ces travaux n'explorent pas en détail l'influence d'une pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa sur la granulométrie et l'évaporation d'un jet de produits chimiques liquides, en particulier pour les temps caractéristiques étudiés.

L'objectif de cette thèse consiste à déterminer l'influence d'une pression ambiante comprise entre 100 à 600 KPa sur l'évaporation d'une goutte, puis sur l'évaporation d'un spray soumis aux mêmes conditions. Différentes analyses sont réalisées au moyen d'études granulométriques.

Ces travaux sont divisés en plusieurs étapes. La première étape consiste à étudier l'influence de la pression ambiante sur l'évolution de la forme, du diamètre, de la vitesse et du débit d'évaporation d'une goutte de liquide en chute libre. La technique utilisée pour obtenir ces mesures est constituée d'un système d'éclairage en transmission et d'une caméra rapide. Les images des films obtenus sont analysées par un logiciel de traitement d'images. Une méthodologie a été développée pour calibrer cette technique de mesure et ainsi minimiser les erreurs de mesures sur la taille des particules. Cette méthode d'analyse par imagerie rapide

permet la visualisation de particules de 50 μm de diamètre, et la mesure de particules de 400 μm de diamètre. Avec cette technique, les mesures de ces particules sont moins précises à 15% que les mesures réalisées avec la loupe binoculaire. Cependant, la technique développée permet de mesurer des particules en mouvement contrairement à la loupe binoculaire.

En parallèle, un modèle analytique d'évaporation de gouttes en chute libre a été développé. Ce modèle est issu d'un modèle d'évaporation de gouttes en chute libre disponible dans la littérature et a été modifié durant cette thèse pour tenir compte de l'influence de la pression. De plus, une attention particulière a été portée sur la détermination d'une corrélation adaptée au calcul du coefficient de traînée afin de tenir compte de l'évolution de la forme des gouttes au cours de leur chute. Le modèle développé a été validé pour plusieurs liquides et différents diamètres de gouttes compris entre 0.5 et 6.5 mm. La comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle présente un écart maximal de 10% (pour le diamètre et la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm). In fine, ce modèle d'évaporation de gouttes devra être appliqué à un spray. Par conséquent, un modèle d'évaporation de spray a été choisi parmi ceux disponibles dans la littérature et modifié pour prendre en compte l'influence de la pression ambiante. La principale différence entre le modèle d'évaporation de gouttes développé et un modèle d'évaporation de spray est la prise en compte de l'entraînement d'air et de la concentration de vapeur au loin de la goutte. La comparaison entre ce modèle d'évaporation de gouttes et le modèle d'évaporation de spray modifié est alors présentée pour montrer les limites du modèle d'évaporation de gouttes lors de son application à l'évaporation d'un spray.

La deuxième étape de l'étude a consisté à appliquer les techniques de mesure et d'analyse mises au point précédemment à l'étude de la granulométrie d'un spray. Plusieurs essais ont été réalisés avec de l'eau et une solution d'eau et de PolyEthylène Glycol 400 à 10% pour caractériser l'influence de trois paramètres : la pression ambiante, la pression d'injection du liquide et la nature du liquide. L'analyse des résultats a permis de développer un modèle statistique pour déterminer la granulométrie de ces sprays. Ces résultats ont mis en évidence des tendances différentes en fonction de chacun de ces trois paramètres : il semblerait qu'une augmentation de la pression ambiante, une augmentation de la pression d'injection du liquide et une diminution de la tension de surface du liquide entraînerait une augmentation du nombre de petites gouttes dans la pulvérisation. Toutefois, ces résultats sont à pondérer compte-tenu des écart-types obtenus sur les mesures expérimentales. Par ailleurs, les distributions granulométriques obtenues expérimentalement ont permis d'estimer le débit massique d'évaporation du spray grâce au modèle d'évaporation de spray modifié.

Les perspectives, à court terme, de ces travaux de thèse sont d'améliorer la technique de mesure mise au point et de valider les mesures expérimentales par d'autres techniques de mesures optiques, comme l'interférométrie à phase Doppler ou la granulométrie par diffraction laser. A plus long terme, l'analyse des cinétiques d'évaporation permettra d'améliorer l'évaluation du terme source pour évaluer la dispersion atmosphérique et permettre ainsi une meilleure évaluation des zones de risques en cas d'accident.

Sommaire

Sommaire	8
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	16
Nomenclature.....	17
Introduction.....	19
1 Chapitre 1 : Etude bibliographique	25
1.1 Introduction.....	25
1.2 Théorie – Phénoménologie	25
1.2.1 Généralités	25
1.2.2 Evaporation d'une goutte unique	32
1.2.3 Phénomènes influant sur l'évaporation d'un spray	40
1.3 Expérimentations	45
1.3.1 Evaporation d'une goutte unique	45
1.3.2 Evaporation d'un spray	46
1.4 Conclusion	53
2 Chapitre 2 : Modèles d'évaporation.....	55
2.1 Introduction.....	55
2.2 Modèle d'évaporation de gouttes.....	55
2.2.1 Description du modèle	55
2.2.2 Résolution numérique.....	63
2.2.3 Validation du modèle	65
2.3 Modèle d'évaporation de spray	82
2.3.1 Description du modèle	82
2.3.2 Cadre d'étude	84
2.3.3 Etude paramétrique	87
2.4 Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays.....	98
2.5 Conclusion	101
3 Chapitre 3 : Approche expérimentale	103
3.1 Introduction de l'approche expérimentale	103
3.2 Description du dispositif expérimental	103
3.2.1 Description de la veine d'essai	103
3.2.2 Mesure des conditions thermodynamiques	105

3.2.3	Liquides étudiés.....	105
3.2.4	Générateur de gouttes ou de sprays.....	106
3.3	Technique de mesure.....	106
3.3.1	Présentation de la technique de mesure optique.....	106
3.3.2	Calibration de la technique de mesure	111
3.3.3	Influence du niveau de seuil.....	122
3.3.4	Influence de la largeur de classe	123
3.3.5	Protocoles expérimentaux	124
3.4	Etude de l'effet du confinement sur la granulométrie du spray.....	128
3.5	Conclusion	129
4	Chapitre 4 : Analyse des résultats	131
4.1	Influence de la pression ambiante sur l'évaporation de gouttes en chute libre dans une atmosphère close	131
4.1.1	Répétabilité des essais	131
4.1.2	Evolution de la forme de la goutte.....	132
4.1.3	Diamètre des gouttes	138
4.1.4	Vitesses des gouttes	139
4.1.5	Evolution du nombre de Weber.....	140
4.1.6	Evolution du débit d'évaporation.....	143
4.2	Influence de la pression ambiante sur le comportement d'un spray dans une atmosphère close	145
4.2.1	Répétabilité des essais	146
4.2.2	Influence de la zone d'intérêt	146
4.2.3	Influence de la pression dans la veine d'essai.....	147
4.2.4	Influence de la pression d'alimentation de la buse.....	148
4.2.5	Influence de la nature du liquide	149
4.2.6	Evolution du diamètre de Sauter	150
4.2.7	Estimation du débit d'évaporation du spray.....	151
4.3	Conclusion	152
	Conclusions et perspectives	154
	Références bibliographiques.....	156
	Annexes	160

Liste des figures

Figure 1 : Visualisation de la perte de confinement catastrophique de liquides suite à la perforation d'un stockage par un projectile hypervélocé (Lecysyn, 2008)	21
Figure 2 : Description schématique des phénomènes intervenant dans l'évaporation de gouttes soumises à un flux thermique convectif (Deprédurand, 2009).....	26
Figure 3 : Représentation des domaines d'étude de l'évaporation de gouttes et de sprays dans les chambres à combustion et comparaison avec le domaine d'étude de ce travail de recherche	28
Figure 4 : Diagramme de phase d'un corps pur	29
Figure 5 : Diagramme schématique illustrant les conditions ambiantes pour lesquelles les solutions de l'état stationnaire existent. (Manrique et Borman, 1969).....	33
Figure 6 : Comparaison de l'évolution du diamètre de la gouttelette au carré en fonction du temps obtenu avec les modèles basse et haute pression ($T = 453\text{ K}$ et $P = 2\text{ MPa}$) (Kim et Sung, 2003).....	35
Figure 7 : Evolution temporelle du carré du diamètre de la goutte en fonction du temps pour une température ambiante de 600 K et pour trois pressions différentes (Kim et Sung, 2003).....	36
Figure 8 : Régimes de fragmentation des gouttes (adapté de Shraiber <i>et al.</i> (1996) et Liu et Reitz (1997))	40
Figure 9 : Distribution de tailles de gouttes d'un spray (1.3 ms après injection) ($T = 293\text{ K}$) (Kim et Sung, 2003).....	41
Figure 10 : Fréquence de collision des gouttes calculée pour deux pressions ambiantes (Kim et Sung, 2003).....	42
Figure 11 : Fraction de carburant évaporée à 4 MPa et à 1200 K calculée en utilisant les modèles basse et haute Pression (Kim et Sung (2003)).....	43
Figure 12 : Effet de la pression ambiante sur la fraction de carburant évaporée (Kim et Sung, 2003)	44
Figure 13 : Principe de l'interférométrie à phase Doppler (Dantec Dynamics)	49
Figure 14 : Confrontation des granulométries obtenues par les trois techniques (Adapté de Yon, 2003).....	51
Figure 15 : Image d'un spray en niveaux de gris	52
Figure 16 : Histogramme de niveau de gris d'une image.....	53
Figure 17 : Bilan des forces sur une goutte en chute libre.....	57
Figure 18 : Bilan thermique d'une goutte soumise à un flux de chaleur convectif	59
Figure 19 : Schéma de fonctionnement du modèle d'évaporation développé au cours de ce travail de recherche.....	63
Figure 20 : Organigramme de calcul du modèle d'évaporation proposé	64
Figure 21 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute	65
Figure 22 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial.....	66
Figure 23 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial et d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial..	67
Figure 24 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial	68
Figure 25 : Influence du liquide sur l'évolution du diamètre d'une goutte de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique.....	69

Figure 26 : Influence du liquide sur l'évolution de la vitesse d'une goutte de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique.....	69
Figure 27 : Influence du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte de 0.5 mm de diamètre dans un environnement à pression atmosphérique	70
Figure 28 : Influence du diamètre initial de la goutte sur l'évolution du diamètre adimensionné dans le cas d'une goutte d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique.	71
Figure 29 : Influence du diamètre initial de la goutte sur sa vitesse dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique.....	71
Figure 30 : Influence du diamètre initial de la goutte sur son débit massique d'évaporation dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique.....	72
Figure 31 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa.....	73
Figure 32 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 2 mm dans un environnement à pression atmosphérique.....	74
Figure 33 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 6.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique.....	74
Figure 34 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa.....	75
Figure 35 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa	75
Figure 36 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa	76
Figure 37 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa	77
Figure 38 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution du débit massique d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa.....	78
Figure 39 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et <i>al.</i> (2008) pour des gouttes d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique	79
Figure 40 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et <i>al.</i> (2008) pour des gouttes d'éthanol dans un environnement à pression atmosphérique.	80
Figure 41 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et <i>al.</i> (2008) pour des gouttes d'eau dans un environnement à pression atmosphérique	80
Figure 42 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Stengele et <i>al.</i> (1999) pour des gouttes de n-pentane (630 μ m) et de n-nonane (740 μ m) dans un environnement pressurisé à 3 MPa et à une température ambiante de 550 K	81
Figure 43 : Modèle d'évaporation de spray adapté à l'étude des rideaux d'eau (St-Georges (1993) et Pretrel (1997))	86
Figure 44 : Représentation des distributions granulométriques de Rosin-Rammler utilisées pour étudier l'influence de la pression relative sur un spray d'eau (ou d'acétone).....	87
Figure 45 : Influence de la pression relative sur l'évolution du diamètre adimensionné de la plus petite classe de diamètre de gouttes (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique	89

Figure 46 : Influence de la pression relative sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique	89
Figure 47 : Influence de la pression relative sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique	90
Figure 48 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa	91
Figure 49 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (174 μm) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa	91
Figure 50 : Influence de la pression ambiante sur le débit massique d'évaporation d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa.	92
Figure 51 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.....	93
Figure 52 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174.12 μm de diamètre initial) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	93
Figure 53 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	94
Figure 54 : Influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	95
Figure 55 : Influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètres de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	95
Figure 56 : Influence de la température ambiante sur le débit d'évaporation massique pour un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa à pression atmosphérique	96
Figure 57 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174.12 μm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.....	97
Figure 58 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.....	97
Figure 59 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.	98
Figure 60 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de spray sur l'évolution du diamètre de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μm) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	99
Figure 61 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution du diamètre d'une goutte de 300 μm dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	99

Figure 62 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μ m) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	100
Figure 63 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse d'une goutte de 300 μ m dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique	101
Figure 64 : Schéma du pilote d'étude de gouttes et de sprays.....	104
Figure 65 : Photo du pilote.....	104
Figure 66 : Capteur de pression XPM10 FGP Sensors	105
Figure 67 : Pike F-032B (200 images/s, 640x480 pixels en pleine résolution).....	107
Figure 68 : Fastcam APX 120K PHOTRON (2000 images/s, 1024x1024 pixels en pleine résolution)..	107
Figure 69 : Objectif Nikon 105 mm à une ouverture de 2.8.....	107
Figure 70 : Dispositif expérimental : Eclairage en réflexion.....	108
Figure 71 : Dispositif expérimental : Eclairage en transmission.....	108
Figure 72 : Illustration de la profondeur de champ sur l'image de la particule (Adapté de Lee et Kim, 2003).....	109
Figure 73 : Détermination du diamètre de référence des billes de verre.....	112
Figure 74 : Comparaison des niveaux de gris des billes de verre enregistrées avec la technique d'éclairage en réflexion (a) et des niveaux de gris des billes de verre enregistrées avec la technique d'éclairage en transmission (b)	114
Figure 75 : a) Image brute, b) Image de fond et c) Image soustraite.....	114
Figure 76 : a) Chute libre d'une goutte d'eau de 2636 μ m à une distance de travail de 37 cm, b) Chute libre d'une bille de verre de 1150 μ m à une distance de travail de 8 m, c) Chute libre d'une goutte d'eau de 6637 μ m à une distance de travail de 51.5 cm.	115
Figure 77 : Evolution du diamètre mesuré d'une goutte en fonction du niveau de seuil – Comparaison des deux méthodes de calcul du diamètre – Distance de travail de 51.5 cm (Diamètre de référence de la bille : 6637 μ m).....	116
Figure 78 : Influence de la luminosité environnante à la goutte	117
Figure 79 : Détermination du niveau de seuil optimal.....	118
Figure 80 : Précision de la mesure en fonction du diamètre de la particule mesuré pour une résolution du pixel de 85.5 μ m et une distance de travail de 51.5 cm.....	120
Figure 81 : Illustration de la technique de défaut de mise au point	121
Figure 82 : Détermination des trois zones d'intérêt	121
Figure 83 : Influence du niveau de seuil sur la distribution granulométrique du spray - Pression dans le pilote de 200 KPa - Pression d'alimentation de la buse de 400 KPa Centre du jet - Largeur de classe de 50 μ m – Modèle log-normal.....	122
Figure 84 : Influence de la largeur de classe sur la distribution granulométrique sur une distribution granulométrique au centre d'un jet obtenu avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa – Modèle log-normal.....	123
Figure 85 : Dispositif expérimental d'étude de gouttes en chute libre.....	125
Figure 86 : Visualisation des deux champs pour l'étude de gouttes en chute libre	125
Figure 87 : Représentation du champ visualisé pour les essais de sprays.....	127
Figure 88 : Image de pulvérisation de spray obtenue.....	127

Figure 89 : Comparaison des distributions granulométriques obtenues en champ libre et en champ confiné dans le cas d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 500 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.....	128
Figure 90 : Illustration des diamètres de gouttes obtenues pour chaque liquide testé.....	132
Figure 91 : Evolution de la forme d'une goutte d'eau de 6.5 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute.....	133
Figure 92 : Evolution de la forme d'une goutte d'eau de 2 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute.....	133
Figure 93 : Influence de la pression ambiante sur la forme des plus grosses classes de tailles de gouttes d'eau (6.5 mm) et d'acétone (4.7 mm) – Illustrations du haut : entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse – Illustrations du bas : entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse	134
Figure 94 : Influence de la pression ambiante sur la forme de gouttes d'eau de 2 mm – Illustrations du haut : entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse – Illustrations du bas : entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse	135
Figure 95 : Déformations subies par une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour une pression ambiante de 100 KPa entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse.....	135
Figure 96 : Evolution du facteur de circularité d'Heywood d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de sa hauteur de chute entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse pour une pression ambiante de 100 KPa.....	136
Figure 97 : Déformation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour des pressions ambiantes de 100, 300 et 400 KPa entre 88 et 91 cm de chute libre	136
Figure 98 : Evolution du facteur de circularité d'Heywood d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour des pressions ambiantes de 100, 300 et 400 KPa.....	137
Figure 99 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7mm en fonction de la hauteur de chute – Comparaison des résultats expérimentaux et des prédictions du modèle	138
Figure 100 : Influence de la pression sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm en fonction de la hauteur de chute – Comparaison entre les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle	139
Figure 101 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du nombre de Weber d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute.....	140
Figure 102 : Evolution du nombre de Weber d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la pression ambiante après une distance de chute de 90 cm.....	141
Figure 103 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la hauteur de chute dans le cas d'une goutte d'acétone de 4.7 mm – Comparaison des mesures expérimentales avec les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes	142
Figure 104 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du débit d'évaporation pour une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute – Prédications du modèle	143
Figure 105 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du débit d'évaporation pour une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute – Comparaison des données expérimentales avec les prédictions du modèle	144
Figure 106 : Répétabilité des essais – Distribution granulométrique d'un spray d'eau pulvérisé dans l'enceinte pressurisée à 200 KPa avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa.....	146

Figure 107 : Influence de la zone d'intérêt sur la distribution granulométrique d'un jet pulvérisé avec une pression d'alimentation de 600 KPa dans une atmosphère pressurisée à 400 KPa	147
Figure 108 : Influence de la pression dans la veine d'essai sur la distribution granulométrique au centre d'un spray pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (en relatif) ...	148
Figure 109 : Influence de la pression d'alimentation de la buse sur la distribution granulométrique obtenue au centre d'un spray d'eau pulvérisé dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa	148
Figure 110 : Influence du liquide sur la distribution granulométrique au centre d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression d'alimentation de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa.	149
Figure 111 : Evolution du diamètre de Sauter en fonction de la pression d'alimentation de la buse relative à la pression ambiante dans la veine d'essai pour différentes conditions expérimentales ..	150
Figure 112 : Influence de la pression de la veine d'essai sur le débit d'évaporation d'un spray liquide pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (relatif) en fonction de la hauteur	151

Liste des tableaux

Tableau 1 : Formules précises et approximatives de la corrélation de Brauer en fonction de différentes valeurs du nombre de Reynolds	38
Tableau 2 : Conditions expérimentales pour un spray de n-heptane (Kim et Sung, 2003)	41
Tableau 3 : Nombre de Weber obtenu après 1 m de chute dans le cadre de ce travail de recherche	58
Tableau 4 : Volumes de diffusion atomiques spéciaux	61
Tableau 5 : Valeurs des propriétés physico-chimiques des produits étudiés à 20°C.....	62
Tableau 6 : Influence du liquide et de la pression relative sur quelques classes de diamètre initiales de gouttes du spray et leur vitesse initiale – Cas de pulvérisations dans un environnement à pression atmosphérique	88
Tableau 7 : Tension de surface de l'eau, des solutions d'eau et de polyéthylène glycol 400 de titre variable et de polyéthylène glycol 400 pur	105
Tableau 8 : Classes granulométriques des billes de verre utilisées	111
Tableau 9 : Diamètres de référence des billes de verre et des gouttes d'eau testées	112
Tableau 10 : Influence de la technique d'éclairage sur la visualisation des tailles des billes de verre (distance de travail de 37 cm)	113
Tableau 11 : Erreur de mesure minimale et méthode de calcul du diamètre la plus adaptée.....	117
Tableau 12 : Comparaison entre le seuil optimal déterminé par dichotomie manuelle et le seuil optimal déterminé à partir de l'algorithme	119
Tableau 13 : Influence du choix de la largeur de classe sur la modélisation des distributions granulométriques.....	123
Tableau 14 : Classes de tailles de gouttes obtenues avec la buse de pulvérisation pour les trois liquides testés.....	131

Nomenclature

Symbole	Quantité	(Unité SI)
<u>Symboles latins</u>		
a	Coefficient de transfert de chaleur	(W/m ² K)
A	Taille de la particule	(Pixels)
Bi	Nombre de Biot	(-)
C_d	Coefficient de traînée	(-)
C_p	Capacité calorifique	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)
D	Diffusivité moléculaire	(m ² .s ⁻¹)
d	Diamètre de la goutte	(m)
d_i	Diamètre des gouttes, classe i	(m)
d_{disk}	Diamètre de la particule assimilée à la surface de la particule à un disque	(Pixels)
d_{mes}	Diamètre mesuré	(µm)
d_{ref}	Diamètre de référence	(µm)
$d_{rectangle}$	Diamètre de la particule estimée à partir de la longueur caractéristique du plus grand rectangle pouvant contenir la particule	(Pixels)
f	Fréquence des gouttes	(s ⁻¹)
FN	Nombre d'écoulement de la buse de pulvérisation	(m ³ /s√Pa)
g	Accélération de la pesanteur	(m.s ⁻²)
G_v	Débit d'air entraîné	(m ³ /s)
H	Hauteur du rectangle	(Pixels)
Hey	Facteur de circularité d'Heywood	(-)
l	Pourcentage de l'intervalle $N_{min} - N_{max}$	(-)
L_v	Enthalpie de vaporisation	(J.kg ⁻¹)
L_{vn}	Débit d'eau pulvérisée	(m ³ /s)
M	Masse molaire	(g/mol)
\dot{m}	Débit massique de vaporisation	(kg.s ⁻¹)
n	Quantité de matière	(mol)
N_1	Premier niveau de gris du segment	(-)
N_2	Deuxième niveau de gris du segment	(-)
N_{max}	Niveau de gris le plus peuplé de l'histogramme de niveaux de gris	(-)
N_{min}	Niveau de gris le plus sombre de l'histogramme	(-)
N_{seuil}	Niveau de seuil	(-)
Nu	Nombre de Nusselt	(-)
P	Pression ambiante/totale	(Pa)
$Perim$	Périmètre	(pixels)
\dot{Q}	Puissance thermique	(W)
r	Rayon de la goutte	(m)

R	Constante universelle des gaz parfaits	$(\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1})$
Re	Nombre de Reynolds	(-)
S_l	Surface de la goutte	(m^2)
Sh	Nombre de Sherwood	(-)
Sc	Nombre de Schmidt	(-)
T	Température	(K)
u	Vitesse de chute de la goutte	(m/s)
V	Volume occupé par le gaz	(m^3)
W	Largeur du rectangle	(Pixels)
We	Nombre de Weber	(-)
x_e	Rayon de l'enveloppe du spray	(m)
Y	Fraction massique	(-)
y	Fraction molaire	(-)

Symboles grecs

μ	Viscosité dynamique	(Pa.s)
ν	Viscosité cinématique	$(\text{m}^2.\text{s}^{-1})$
λ	Conductivité thermique	(W/m.K)
ρ	Masse volumique	(kg/m^3)
θ	Angle entre le segment et l'axe des abscisses	(°)

Indices

c	Critique (pression ou température)
$disque_equivalent$	Relatif au disque de surface équivalente
g	Phase gaz
l	Phase liquide
$particule$	Relatif à la particule
r	Réduite (pression ou température)
s	Surface
sat	A saturation
v	Vapeur
∞	Loin de la surface de la goutte

Introduction

Les nombreux accidents industriels de ces dernières décennies (AZF, Bhopal, la Mede, Feyzin,...) indiquent l'importance d'évaluer avec précision les conséquences de ces événements. Ainsi, la prévention des risques technologiques, dans un contexte en perpétuelle évolution, est nécessaire pour minimiser les conséquences de ces accidents. Les accidents industriels ou technologiques sont classés en 7 catégories par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (Michel, 2010) : les incendies, les rejets de matières dangereuses, les explosions, les effets dominos, les projections et chutes d'équipements, les presque accidents et l'irradiation. Ces types d'événements ne sont pas exclusifs les uns des autres.

Au 31 décembre 2009, la base de données A.R.I.A. (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) du Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industrielles (BARPI) recense 31 098 accidents technologiques survenus en France entre 1992 et 2009. Une grande majorité de ces événements (72%) implique des Installations Classées. Les incendies sont les accidents les plus fréquents (65%). Les rejets de matières dangereuses représentent 39% des accidents, les explosions 7% et les effets dominos moins de 5%. Bien que les explosions et les effets dominos soient beaucoup moins fréquents que les incendies et les rejets de matières dangereuses, ils représentent un potentiel catastrophique qui mérite une attention particulière.

Les secteurs industriels les plus touchés par les rejets de matières dangereuses et les explosions sont le secteur de la chimie, le commerce et l'entreposage. Les Installations Classées de ces secteurs industriels stockent d'importantes quantités de produits chimiques de natures différentes comme, par exemple, des produits chimiques liquides stockés à pression atmosphérique. Ces produits peuvent être toxiques et/ou inflammables et présentent des risques importants. Si un accident se produit sur ces sites, comme une explosion suivie d'un effet domino, un nuage toxique peut se former, se propager et présenter un véritable risque, pour les populations environnantes et pour l'environnement. L'exemple du stockage d'ammoniac (réservoir de 5000 T et sphère de 1000 T) présent sur le site d'AZF aurait pu avoir des conséquences catastrophiques s'il y avait eu rupture.

La réglementation (Circulaire du 02/10/2003 relative aux mesures d'application immédiate introduites par la loi n°2003-699 en matière de prévention des risques technologiques dans les installations classées qui modifie l'article 20 du décret n° 1133 du 21 septembre 1977 modifié) impose alors à ces installations d'effectuer une étude de dangers pour déterminer des zones de sécurité en cas d'accidents. A l'heure actuelle, ces zones de sécurité sont déterminées à l'aide de logiciels, comme PHAST, qui nécessitent l'évaluation d'un terme source précis. PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un logiciel de simulation d'explosion et de dispersion dans l'air développé par la société Det Norske Veritas (DNV) et employé pour modéliser évaluer des situations qui présentent des dangers potentiels à la vie, aux biens et à l'environnement, et de quantifier leur gravité. PHAST examine la progression d'un incident potentiel de la dispersion initiale à la dispersion en champ lointain, y compris la modélisation de la propagation d'une flaque et de l'évaporation, ainsi que les effets toxiques et inflammables¹.

¹ <http://www.dnv.com/services/software/products/safeti/safetiqra/phast.asp>

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le contexte des risques industriels liés à la rupture de réservoirs de stockage de produits chimiques liquides.

Sur un site industriel de stockage, des produits chimiques liquides peuvent être conditionnés dans des réservoirs entreposés dans des locaux confinés à pression atmosphérique et à température ambiante. Ces produits chimiques liquides peuvent être toxiques, explosifs, inflammables ou corrosifs. De part la nature et la quantité de produits chimiques mises en jeu, ce milieu d'étude peut représenter un grand nombre de risques. De nombreux scénarios d'accidents industriels sont possibles avec des conséquences sérieuses pour l'homme et pour l'environnement. Par conséquent, des recherches sont nécessaires dans ce domaine.

Dans le cadre de ce travail de recherche, la situation accidentelle étudiée est représentée par l'enchaînement suivant. Suite à un effet domino sur un site de stockage industriel, une explosion se produit à proximité d'un réservoir de produits chimiques liquides à pression atmosphérique et à température ambiante. Cette explosion peut augmenter la pression et la température ambiantes au voisinage du réservoir et générer des fragments, qui peuvent impacter le réservoir de produits chimiques liquides. Avant de poursuivre la description de cette situation accidentelle, nous allons tout d'abord expliquer d'où provient cette augmentation de pression et de température.

Dans le cadre de ce travail de recherche, l'explosion est considérée avoir lieu à proximité du réservoir de stockage. Une telle explosion augmente la pression ambiante au voisinage du réservoir au cours du temps jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic. Ensuite, la pression diminue jusqu'à une pression résiduelle comprise entre 100 et 600 KPa. On fait l'hypothèse que cette pression résiduelle dure suffisamment longtemps pour considérer le régime permanent. Etant donné la distance spécifiée précédemment, on peut également considérer que cette explosion soit suffisamment loin du stockage pour que l'augmentation de température soit négligeable ou limitée à 200°C maximum. L'augmentation de température est supposée négligeable pour s'intéresser essentiellement à l'influence de la pression.

Ainsi, l'explosion issue de l'effet domino modifie les conditions initiales dans le local de stockage de réservoirs de produits chimiques liquides : la pression initialement atmosphérique peut augmenter jusqu'à 600 KPa. Cependant, l'explosion génère également des fragments. L'impact d'un fragment sur le réservoir peut provoquer la perte de confinement catastrophique du réservoir : il participe à l'augmentation brutale et locale de la pression au voisinage du réservoir (coup de bélier hydraulique) et perce le stockage créant ainsi un débit à la brèche. Les produits chimiques liquides contenus dans le réservoir sont d'abord pulvérisés dans le local confiné sous forme de jet diphasique, puis se répandent au sol par vidange gravitaire et alimentent une flaque de produits chimiques liquides. Ce scénario peut éventuellement être complété par une onde de choc.

Soumis à l'augmentation de pression et de température au voisinage du réservoir, les produits chimiques liquides pulvérisés (jet et flaque) peuvent s'évaporer, se disperser et éventuellement contaminer le local de stockage par la diffusion des vapeurs avec des cinétiques différentes de celles à pression et température ambiante (100 KPa, 20°C). Il est alors intéressant de se demander si l'augmentation de pression aura une influence sur la toxicité du nuage toxique.

La perte de confinement d'un réservoir par un fragment est alors un événement initiateur de scénario d'accident industriel redouté qui retient l'attention de par la complexité des phénomènes

mis en jeu et du manque d'intérêt suscité à ce domaine d'études jusqu'à présent. De précédentes études exploratoires ont alors été réalisées par l'Ecole des Mines d'Alès en partenariat avec le CEA Gramat à ce sujet et ont consisté à étudier les phénomènes physiques mis en jeu lors de la perte de confinement catastrophique en milieu libre. Toutefois, le liquide étudié était non inflammable et non explosif pour s'affranchir d'évènements secondaires comme un incendie ou une explosion.

La thèse de Lecysyn (2008) détaille une partie de ces études. Un des objectifs de cette thèse était de décomposer les phénomènes physiques mis en jeu lors de la perte de confinement catastrophique. Lors de cette thèse des campagnes expérimentales ont été réalisées et ont consisté à reproduire, à grande échelle, l'impact d'un projectile sur un stockage de produits chimiques liquides. Un exemple d'images du jet complexe qui a alors été formé est présenté à la Figure 1.

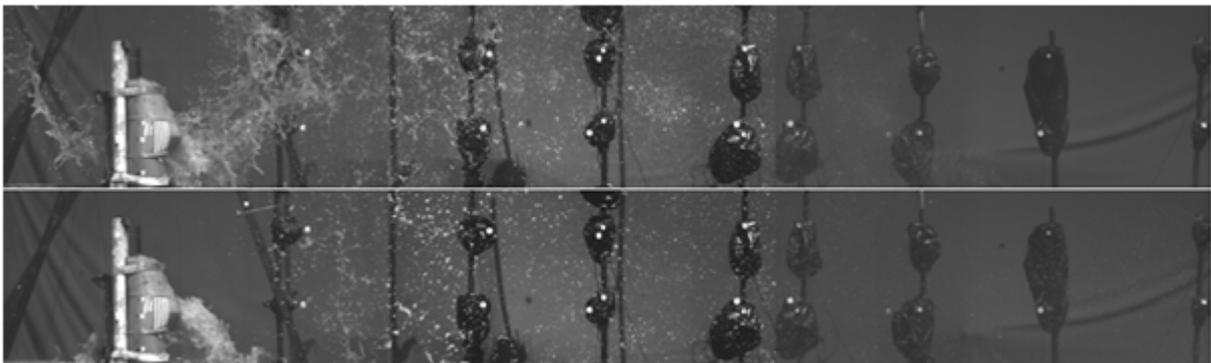


Figure 1 : Visualisation de la perte de confinement catastrophique de liquides suite à la perforation d'un stockage par un projectile hypervélocité (Lecysyn, 2008)

La Figure 1 représente la perte de confinement catastrophique d'un réservoir de stockage (fût de 60 L) par un projectile. L'image du haut illustre la pulvérisation des produits chimiques liquides sous forme de jet et, celle du bas, la vidange gravitaire. Il faut noter que cette pulvérisation est horizontale. Le réservoir était fixé à une potence pour ne pas tomber lors de l'impact du projectile. Des capteurs de concentrations positionnés sur des mats et protégés par du plastique ont permis de déterminer la concentration en produit chimique à différentes positions du fût.

Ces images ont été obtenues à l'aide d'une caméra rapide équipée d'un objectif photographique. En effet, il faut noter que les temps caractéristiques des phénomènes physiques mis en évidence sont de l'ordre de la milliseconde, voire de la microseconde. La caméra rapide a dû être placée dans un bunker à une distance de travail de l'ordre de 10 m, pour la protéger de l'onde de choc induite par l'impact du fragment. Le phénomène de perte de confinement catastrophique a été éclairé par réflexion, d'où la présence du rideau noir à l'arrière plan de l'image.

L'analyse de la taille des gouttes de la pulvérisation de produits chimiques liquides a été possible à partir de ces images et a mis en évidence la présence de gouttes millimétriques et pas forcément sphériques. Cette hypothèse est importante, car sous l'effet de la pression, ces gouttes sont susceptibles de se déformer. Cependant, lors d'une des campagnes expérimentales réalisées au cours de la thèse de Lecysyn (2008), un flash lumineux a été observé sur les images suite au passage d'un souffle généré par une onde de choc. La visualisation de ce flash lumineux laisse penser que des gouttes de plus petites tailles étaient présentes, mais qu'elles n'ont pas pu être visualisées compte-tenu de la distance de travail et donc de la résolution du pixel disponible.

La situation accidentelle de perte de confinement catastrophique soulève alors les questions suivantes :

- Quelle est la **cinétique d'évaporation** de produits liquides pulvérisés en milieu clos et pressurisé ?
- Quelle est **l'influence de l'évaporation** de ces produits sur les **conditions thermodynamiques** de ce milieu clos?

L'évaluation de la cinétique d'évaporation de ces produits et la connaissance des conditions d'éjection des produits chimiques liquides permettront de déterminer la quantité de liquide s'évaporant pour former un nuage toxique susceptible de s'enflammer (évaporation primaire) et la quantité correspondant à la flaque liquide au sol formée par vidange gravitaire et les retombées des gouttes du jet (évaporation secondaire).

La caractérisation de la cinétique d'évaporation primaire est déterminée à partir de l'évolution de la granulométrie du jet diphasique au cours du temps, car lors de l'évaporation, le diamètre des gouttes diminue. Plusieurs techniques de mesure permettent d'obtenir de telles distributions granulométriques, comme l'acquisition d'images avec une caméra rapide et leur analyse grâce à un logiciel de traitement d'images ou encore l'Interférométrie à Phase Doppler (PDI).

Afin de répondre à ces questions d'ensemble, il s'agit à présent de poursuivre les travaux entrepris sur la perte de confinement en prenant en compte l'augmentation de la pression ambiante au voisinage du réservoir sur la pulvérisation de produits chimiques liquides et en travaillant en milieu confiné.

La problématique du travail de recherche présenté dans ce manuscrit consiste alors à déterminer l'influence de la pression ambiante sur l'évaporation d'un jet de produits chimiques liquides. Dans le cadre du partenariat scientifique, les conditions thermodynamiques retenues pour cette étude sont donc bornées entre 100 et 600 KPa et à 20°C et les produits chimiques liquides choisis sont de l'eau, de l'éthanol, de l'acétone et un mélange d'eau et de PEG 400. Ces produits ne sont ni inflammables, ni explosifs dans les conditions expérimentales d'études. De plus, la distance d'étude des produits en chute libre est limitée à 1 m. Enfin, les tailles de gouttes retenues pour le modèle d'évaporation de gouttes sont comprises entre à 0.5 et 6.5 mm pour représenter les gouttes millimétriques.

La stratégie de recherche adoptée pour répondre à cette problématique est la suivante. Pour étudier une pulvérisation de produits chimiques liquides dans une atmosphère pressurisée entre 100 et 600 KPa, il est tout d'abord proposé d'étudier le comportement d'un spray vertical dans ces conditions pour comprendre les mécanismes physiques mis en jeu.

Des hypothèses simplificatrices ont alors été prises en compte. En effet, les précédentes campagnes d'essais (Lecysyn, 2008) ont montré que la pulvérisation de produits chimiques liquides est horizontale et composée de gouttes millimétriques pas forcément sphériques. La première hypothèse consiste alors à supposer le jet vertical pour simplifier la dynamique des produits pulvérisés. Ensuite, la seconde hypothèse simplificatrice est de représenter la pulvérisation de produits chimiques liquides issue d'une perte de confinement par un spray. Il est proposé de calibrer la technique de mesure optique sur ce spray. La transposition de cette technique de mesure à la pulvérisation de produits chimiques liquides pourra faire l'objet d'un autre sujet de recherche. Enfin,

la pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa, dans laquelle seront étudiés les produits, est considérée en régime permanent.

Avant l'étude du comportement d'un spray de produits chimiques liquides dans une atmosphère pressurisée entre 100 et 600 KPa, l'étude de ces phénomènes à l'échelle d'une goutte en chute libre sur 1 m semble nécessaire. Ainsi, la stratégie de recherche consiste à descendre d'une échelle pour bien décomposer les phénomènes physiques mis en jeu.

Pour cela, des expérimentations ont été réalisées et ont consisté à pulvériser des produits chimiques liquides, d'abord sous forme de gouttes, puis sous forme de spray, dans une enceinte pressurisée entre 100 et 600 KPa à une température ambiante de 20°C. Trois campagnes expérimentales ont été mises en œuvre pendant cette thèse pour répondre à ces objectifs :

- La première campagne expérimentale a consisté à calibrer la technique de mesures choisie pour réaliser ce travail, à savoir : une caméra rapide et un objectif associés à un logiciel de traitement d'images. L'objectif est de déterminer avec précision la granulométrie de gouttes de sprays. Cette grandeur étant une donnée d'entrée pour les modèles d'évaporation, de dispersion ou encore de combustion, il est indispensable de connaître sa précision, afin de quantifier l'incertitude sur la réponse du modèle. Ainsi, la partie principale de cette calibration a été de déterminer le niveau de seuil à appliquer lors du traitement d'images.
- La deuxième campagne expérimentale a consisté à mettre en œuvre la technique de mesure calibrée pour caractériser la forme, le diamètre et la vitesse de gouttes en chute libre. Les résultats expérimentaux obtenus pourront permettre de valider le modèle d'évaporation de gouttes.
- La troisième et dernière campagne d'essais s'est intéressée à appliquer la technique de mesure pour caractériser des sprays par leur granulométrie. Les résultats obtenus peuvent permettre de se rapprocher davantage des résultats qu'il est possible d'obtenir en étudiant une pulvérisation de produits chimiques liquides avec une telle technique de mesure. Lors de cette dernière campagne, l'effet du confinement lié à la présence du spray dans un milieu fermé a également été étudié. En effet, il est intéressant de différencier l'effet du confinement lié à la présence du spray dans un milieu clos ou « vase clos » de l'effet de l'entraînement d'air qui va modifier la vitesse relative de chaque goutte du spray.

En parallèle des expérimentations, un modèle d'évaporation de gouttes a été développé dans le but d'être transposable à l'étude d'un spray. Il s'agit d'un modèle d'évaporation de gouttes issu de la littérature et modifié pour tenir compte de la déformation des gouttes et de la pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa. Ainsi, une méthodologie d'étude de l'influence de la pression sur l'évaporation d'une goutte aussi bien expérimentalement que numériquement est proposée. L'objectif est de développer un modèle simple et robuste qui puisse être utilisé pour étudier l'évaporation d'une pulvérisation de produits chimiques liquides.

Le modèle de spray issu de la littérature tient compte de l'entraînement d'air et de la concentration en vapeur loin de la goutte : principales différences avec le modèle d'évaporation de gouttes. Le modèle d'évaporation de gouttes est alors comparé avec ce modèle d'évaporation de sprays modifié pour quantifier l'influence de ces principales différences et déterminer si le modèle d'évaporation de

gouttes peut être transposable au modèle d'évaporation de spray dans le cadre du partenariat scientifique. Il est ensuite proposé d'étudier l'influence de la pression ambiante sur l'évaporation d'un spray à partir d'estimations de débit d'évaporation de spray obtenues à partir des distributions granulométriques obtenues expérimentalement.

Toutes ces étapes ont pour objectif de développer d'un modèle d'évaporation de gouttes simple et robuste qui puisse être appliqué à l'étude de la pulvérisation de produits chimiques liquides à une pression ambiante comprise entre 100 KPa et 600 KPa.

En revanche, les limites de cette étude sont les suivantes :

- L'étude de l'influence de la température est limitée à une variation de la température de 10°C dans l'enceinte,
- Les réactions chimiques entre les différentes espèces du liquide ne sont pas prises en compte,
- La combustion potentielle des gouttes issues du rejet liquide n'est pas traitée.

Cependant, ces travaux ne comportent pas l'étude expérimentale exhaustive de l'évaporation d'un spray, car le temps d'évaporation des produits utilisés est trop élevé par rapport à la durée des expérimentations.

L'originalité de ces travaux réside alors essentiellement dans l'étude du comportement de produits chimiques liquides représentatifs de produits stockés dans l'industrie et dans la caractérisation de leur évaporation à de faibles pressions.

Ce manuscrit est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre détaille les travaux disponibles dans la littérature sur l'évaporation de gouttes et de sprays. Le second chapitre présente le modèle d'évaporation développé au cours de ce travail de recherche et le modèle de spray modifié pour tenir compte des différents produits et de l'influence de la pression. La particularité de ces modèles réside dans leur gamme d'application qui correspond à des pressions ambiantes inférieures à 600 KPa, une gamme peu étudiée dans la littérature, surtout à l'échelle des temps considérés. Le troisième chapitre porte sur la granulométrie par la visualisation et le traitement d'images de gouttes et de sprays à l'aide de techniques de mesures optiques. Ce chapitre présente la méthodologie élaborée pour calibrer cette technique de mesures, ainsi que les dispositifs expérimentaux mis en œuvre. Enfin, le dernier chapitre présente l'analyse des résultats obtenus lors de ce travail de thèse : ceux sur l'influence de la pression sur le comportement des gouttes et ceux sur le comportement des sprays. L'influence de la pression sur le comportement des gouttes est caractérisée à partir de l'évolution de la forme, du diamètre, de la vitesse et du débit massique d'évaporation de gouttes en chute libre. La comparaison des résultats expérimentaux avec le modèle d'évaporation de gouttes mis au point est présentée afin de proposer une méthodologie de validation du modèle. L'influence de la pression sur le comportement d'un spray est d'abord caractérisée grâce à l'analyse des distributions granulométriques obtenues en fonction de différents paramètres opératoires, puis le débit d'évaporation du spray est estimé à partir du modèle d'évaporation de spray modifié à partir de ces distributions granulométriques.

1 Chapitre 1 : Etude bibliographique

1.1 Introduction

Ce premier chapitre détaille les travaux disponibles dans la littérature sur l'évaporation de gouttes et de sprays. Ce phénomène a été largement étudié aussi bien théoriquement, numériquement qu'expérimentalement. Une attention particulière est portée à l'évaporation de gouttes et de sprays dans des environnements à pression et température élevées.

La section (1.2) de ce chapitre décrit la théorie et la phénoménologie de l'évaporation dans le cas d'une goutte et d'un spray. La section (1.3) recense les travaux expérimentaux ainsi que les techniques de mesure. Cette partie détaille les paramètres caractéristiques des mécanismes d'évaporation. Les résultats obtenus ainsi que leur comparaison avec la théorie sont ensuite présentés et discutés. La dernière section (1.4) synthétise ces informations et les repositionne dans le contexte de cette étude.

1.2 Théorie – Phénoménologie

L'étude de l'évaporation d'une goutte unique est nécessaire pour caractériser les mécanismes d'échange de chaleur et de transfert de matière au sein de la goutte. Les études sur les sprays reprennent les études sur les gouttes et ont pour objectif de déterminer les hypothèses permettant d'être représentatives de la réalité et de modéliser le phénomène avec un temps de calcul raisonnable.

1.2.1 Généralités

L'évaporation de gouttes et de sprays est étudiée, dans le domaine de la combustion des moteurs, pour mieux comprendre les phénomènes de dynamique et de transport de fluide associé au transfert de chaleur et à la vaporisation d'une gouttelette. Elle est également étudiée pour développer des modèles pour le transfert de chaleur, la vaporisation et l'accélération de la goutte. Ces modèles doivent être suffisamment précis et simples à utiliser pour être transposés à un spray. Comme un spray est composé de nombreuses gouttes, le comportement de chaque goutte ne peut être modélisé distinctement : il s'agit alors de décrire un comportement moyen des gouttes dans un voisinage. Ce problème multidisciplinaire implique le transfert de chaleur et de masse, la dynamique des fluides, et la cinétique chimique.

Phénomènes physiques de l'évaporation

Les processus physiques intervenant dans l'évaporation d'une goutte sont nombreux et intimement liés. En effet, lorsqu'une goutte en chute libre est soumise à un transfert thermique, le flux de chaleur convectif provenant de l'environnement gazeux arrive à la surface de la goutte par convection avec l'air et par conduction. Il permet d'une part le transfert de chaleur avec la goutte et d'autre part il favorise le processus d'évaporation. Il se produit alors un dégagement de vapeur qui s'éloigne de la goutte par diffusion et convection. Le rayonnement thermique peut également intervenir. La température et la composition de la goutte vont alors varier à cause de ces flux. La production et/ou le mouvement des espèces évaporées à l'interface de la goutte induisent un écoulement de Stefan, dont la vitesse est représentée par le vecteur \vec{v} . A l'intérieur de la goutte, la circulation interne de liquide est conduite par les forces de cisaillement de surface. Il s'agit du Vortex de Hill. Cette convection interne participe à la diffusion de chaleur et d'espèces dans la goutte.

La Figure 2 présente les différents phénomènes liés à l'évaporation d'une goutte dans un train de gouttes en chute libre.

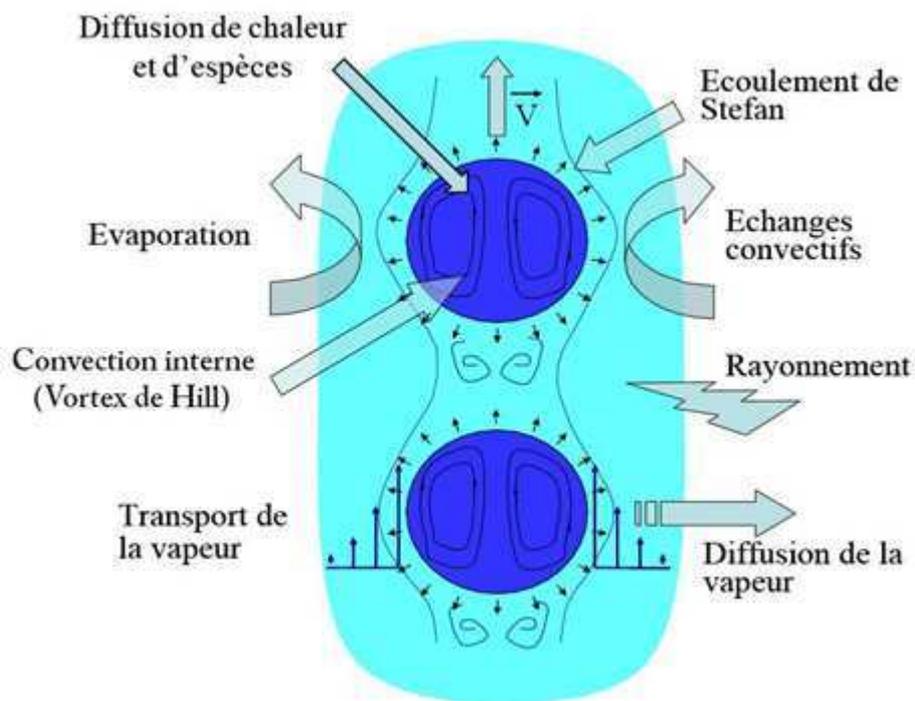


Figure 2 : Description schématique des phénomènes intervenant dans l'évaporation de gouttes soumises à un flux thermique convectif (Deprédurand, 2009)

Dans le cas d'une atmosphère non saturée en vapeur, dont la température est supérieure à celle de la goutte, un gradient thermique s'établit sous l'effet de la diffusion et les molécules en phase gazeuse se mettent alors en mouvement. Dans ces conditions, les composants liquides nécessitent de l'énergie sous la forme d'un flux thermique pour s'évaporer : la goutte se refroidit. La vitesse de la goutte et la différence de température entre la goutte et le milieu ambiant font varier le flux convectif externe à la goutte. L'évolution de l'état de la goutte est conditionnée par l'ensemble de ces flux.

A des pressions suffisamment importantes, des effets supplémentaires sont remarqués, tels que :

- la variation de propriétés thermophysiques,
- la solubilité des espèces inertes de la phase gazeuse dans la phase liquide,
- l'effet de la barodiffusion ou l'effet du gradient de pression sur la diffusion des espèces,
- les effets du second ordre de Soret (effet du gradient de température sur la diffusion des espèces) et de Dufour (effet du gradient de concentration des espèces sur la diffusion d'énergie).

Les modèles d'évaporation

Différents modèles d'évaporation sont disponibles dans la littérature. Sirignano (1999) répertorie 6 modèles de vaporisation de gouttes. Le classement de ces modèles par ordre de complexité croissante est le suivant :

1. Modèle à température constante de gouttelette (qui est à la base de la loi en d^2),
2. Modèle à conductivité du liquide infinie (température de la gouttelette uniforme mais variant dans le temps),
3. Modèle de chauffage de la gouttelette transitoire (ou de conduction limite),
4. Modèle à conductivité effective,
5. Modèle de chauffage de gouttelette à vortex,
6. Solution des équations de Navier-Stokes.

Les principales différences entre ces modèles résident dans la modélisation de la phase liquide, qui contrôle généralement le débit d'évaporation de la goutte dans des gaz à haute température. Par ailleurs, ces modèles peuvent être utilisés pour prédire l'évaporation d'un spray, en les appliquant à la distribution granulométrique. Cependant, plus le modèle utilisé pour modéliser la phase liquide est complexe, plus le temps de calcul est important.

Temps de relaxations caractéristiques

L'évaporation de gouttes et de sprays est définie par trois mécanismes physiques ayant des temps caractéristiques différents : le temps de relaxation de la vitesse de chute, le temps de relaxation thermique et le temps de relaxation massique. Le temps de relaxation massique est le plus long devant le temps de relaxation thermique, qui lui-même est plus long que le temps de relaxation de la vitesse. Par exemple, une goutte d'eau d'1 mm met moins d'1 s pour chuter de 1 m, 10 s pour se refroidir de 10°C et environ 6 min pour s'évaporer complètement dans un environnement à pression atmosphérique. Une goutte d'acétone de même diamètre a des temps caractéristiques plus courts : elle met moins d'1 s pour chuter de 1 m, environ 1 s pour diminuer de près de 50°C et environ 10 s pour s'évaporer complètement.

Domaines d'application

L'évaporation de gouttes et de sprays dans des environnements à des pressions et des températures élevées est étudiée dans de nombreux domaines d'applications industriels.

Dans les domaines de l'aéronautique et de l'automobile, la stratégie consiste à travailler à des pressions de plus en plus élevées. Parmi ces applications, la combustion de spray représente l'application la plus importante. Dans le cas de l'automobile, les gouttelettes de carburant sont injectées dans la chambre de combustion sous forme liquide et la plupart des gouttelettes s'évaporent avant que la combustion n'ait lieu. La concentration en vapeur de carburant est déterminée par le taux d'évaporation des gouttelettes et affecte significativement la performance du système de combustion, d'où l'intérêt d'approfondir les connaissances sur l'évaporation de gouttelettes afin d'optimiser la conception des chambres à combustion.

Dans les chambres à combustion de moteurs thermiques, l'évaporation de gouttes et de sprays a été étudiée théoriquement, numériquement et expérimentalement à des pressions comprises entre 0.1 et 10 MPa et à des températures comprises entre 400 et 1500 K. La Figure 3 représente ces domaines thermodynamiques pour quelques exemples, ainsi que celui de ce travail de recherche.

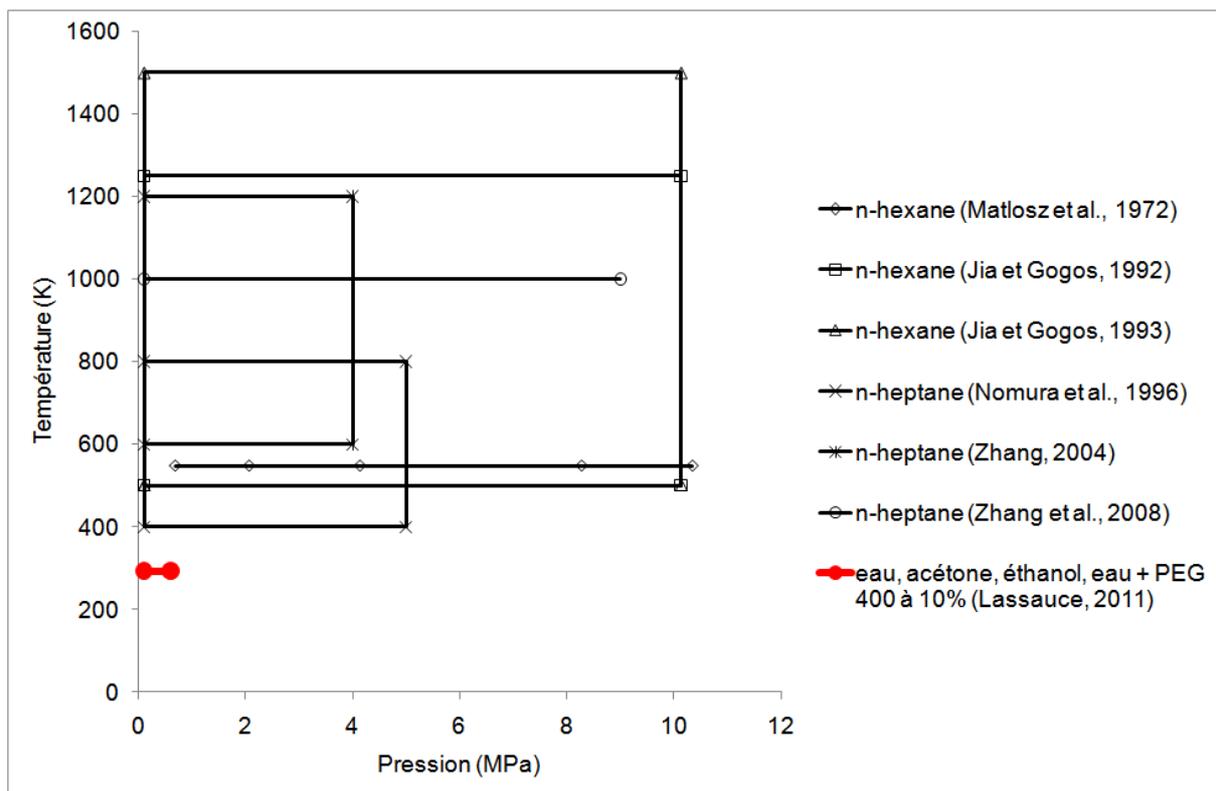


Figure 3 : Représentation des domaines d'étude de l'évaporation de gouttes et de sprays dans les chambres à combustion et comparaison avec le domaine d'étude de ce travail de recherche

Cette figure montre que l'évaporation de gouttes et de sprays a été étudiée dans une large gamme de pressions et de températures qui dépassent le point critique du liquide. Cette figure permet aussi de positionner le domaine d'étude de ce travail de recherche. Il semble que l'évaporation de gouttes et de sprays ait été peu étudiée dans un environnement dont la pression est inférieure à 600 KPa et la température ambiante est de 300K, surtout compte-tenu des temps caractéristiques considérés

dans la situation accidentelle étudiée. **Ce travail de recherche se positionne dans cette gamme et propose ainsi de compléter la connaissance sur l'évaporation de gouttes et de sprays (Figure 3).**

Point critique – Régimes thermodynamiques

Afin de déterminer les mécanismes physiques décrivant le comportement d'une goutte isolée et d'un spray dans des conditions similaires à celles de ce travail, il est nécessaire de s'inspirer des travaux réalisés dans des chambres de combustion dans lesquelles les conditions de pression et de température peuvent atteindre deux fois les valeurs critiques du carburant.

La température critique d'un corps pur est la température au-delà de laquelle la phase liquide de ce corps pur ne peut exister. La pression critique se définit de la même manière. La Figure 4 donne le diagramme de phase d'un corps pur :

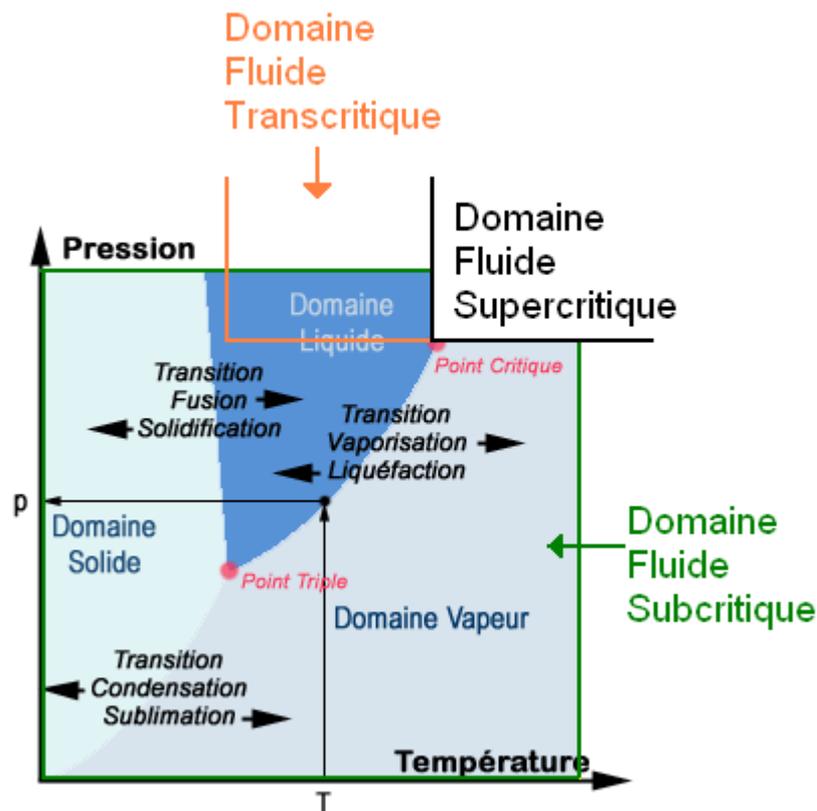


Figure 4 : Diagramme de phase d'un corps pur²

Le régime thermodynamique dans lequel évolue ce corps pur est appelé supercritique si la température et la pression sont toutes les deux au-delà de la valeur critique. En revanche, si la température ou la pression est en dessous de cette valeur critique tout en restant proche de celle-ci, le régime thermodynamique est alors appelé subcritique. Le troisième régime représenté sur la Figure 4 est le régime transcritique, il correspond à la transition entre le régime subcritique et le régime supercritique.

² http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique-2/d/diagramme-de-phase_4771/

Les tous premiers travaux sur l'évaporation de gouttes liquides datent des années 50. Spalding, (1953) a étudié la combustion de gouttes uniques liquides et a mis en évidence la loi en d^2 , c'est-à-dire que pendant l'évaporation, le carré des diamètres des gouttelettes diminue linéairement avec le temps. Ce résultat a également été montré par Godsave (1953). Depuis les 60 dernières années, de nombreux progrès ont été réalisés sur la compréhension du comportement d'une goutte en évaporation, unique ou dans un spray. Ce sujet a été revu par Faeth (1983), Givler et Abraham (1996) et Sazhin (2006).

Faeth (1983) a étudié l'évaporation et la combustion de sprays. Il s'est plus particulièrement intéressé à la région dense du spray où il y a de faibles fractions de vide. Dans cette zone, les gouttes sont proches les unes des autres, les taux de collisions sont importants et les gouttes ont un effet significatif sur les propriétés de turbulence de l'écoulement. Il a étudié plusieurs modèles qui analysent différentes régions du spray. Un modèle qui représente un traitement compréhensif des sprays denses et un modèle, développé pour des écoulements de particules solides mais qui peut être modifié pour traiter des processus de sprays denses. Les résultats de ces calculs indiquent qu'une étude plus approfondie est nécessaire, ainsi qu'une comparaison de leurs résultats avec des mesures expérimentales. Par ailleurs, il indique qu'il est nécessaire de surmonter les difficultés expérimentales de la région dense du spray.

Givler et Abraham (1996) ont fait une étude bibliographique sur la vaporisation et la combustion de gouttelettes liquides dans des environnements où la pression et la température ambiantes sont supercritiques. La température et la pression critiques d'un corps pur sont la température et la pression au-delà desquelles la phase liquide de ce corps pur ne peut exister. Givler et Abraham (1996) ont discuté les conditions sous lesquelles la vaporisation et la combustion de la gouttelette peuvent être considérées comme quasi-stationnaires et ont montré que cette approximation n'est pas valide pour des carburants paraffiniques dans des conditions où la température et la pression réduites excèdent approximativement deux fois les valeurs critiques du carburant. La température réduite T_r représente le rapport entre la température ambiante T et la température critique T_c du corps pur étudié, soit $T_r = T/T_c$. La pression réduite P_r est définie de façon similaire : elle représente le rapport entre la pression ambiante P et la pression critique P_c du corps pur étudié, soit $P_r = P/P_c$. Ces auteurs ont également montré que les temps de vaporisation et de combustion de la gouttelette sont influencés de façon significative par les conditions de pressions et de température ambiantes.

Sazhin (2006) a revu les récents développements sur la modélisation du transfert de chaleur et de l'évaporation de gouttelettes de carburant, et a identifié des problèmes non résolus, essentiellement dans le cas de la modélisation par CFD. Il a, par exemple, mis en avant le fait que, la modélisation transitoire du transfert de chaleur de la gouttelette en utilisant des corrélations quasi-stationnaires pour le coefficient d'échange convectif, peut entraîner des erreurs significatives. Par ailleurs, l'analyse numérique du transfert de chaleur de la gouttelette en utilisant le modèle de conductivité thermique effective peut être basée sur la solution analytique de l'équation de conduction de la chaleur à l'intérieur de la gouttelette. Il a montré que cette approche a de clairs avantages comparée à l'approche basée sur la solution numérique de la même équation.

L'évaporation de gouttes et de sprays dans un environnement subcritique a par exemple été étudiée par plusieurs auteurs. **Kadota et Hiroyasu (1976)** ont étudié numériquement l'évaporation d'une goutte unique et immobile de n-heptane ($T_c = 540.3\text{ K}$ et $P_c = 2.74\text{ MPa}$) de 1.8 mm de diamètre initial dans un environnement d'azote ($373\text{ K} < T < 773\text{ K}$ et $0.1\text{ MPa} < P < 5\text{ MPa}$) sous des conditions de microgravité. **Jia et Gogos (1992)** ont étudié numériquement la vaporisation d'une gouttelette unique de n-hexane ($T_c = 507.4\text{ K}$ et $P_c = 3.03\text{ MPa}$) de 0.25 mm de diamètre initial et de température initiale de 300 K dans un environnement d'azote stagnant à des pressions ambiantes comprises entre 0.1 et 10 MPa et des températures ambiantes comprises entre 500 et 1250 K. Un an plus tard, ces mêmes auteurs (**Jia et Gogos, 1993**) ont poursuivi leurs études avec une gouttelette plus petite (0.1 mm) dans un environnement avec les mêmes conditions de pression mais avec des conditions de température plus élevées (500 – 1500 K). **Nomura et al. (1996)** ont étudié expérimentalement l'évaporation d'une gouttelette unique de n-heptane dont le diamètre initial était compris entre 0.6 et 0.8 mm dans un environnement d'azote dont la pression est comprise entre 0.1 et 5 MPa et la température est comprise entre 400 et 800 K, sous des conditions de microgravité.

Lorsque la pression ambiante est inférieure à la pression critique du liquide et la température ambiante est supérieure à la température critique du liquide, il s'agit du régime subcritique (gazeux). **Matlosz et al. (1972)** ont étudié expérimentalement et numériquement le phénomène d'évaporation d'une gouttelette (720 – 910 μm et 1420 – 1780 μm) de n-hexane dans des environnements stagnants gazeux d'azote et d'argon à une température de 548 K et à une pression comprise entre 0.689 et 10.336 MPa. **Tsukamoto et Niioka (1993)** ont étudié numériquement la vaporisation d'une gouttelette immobile de n-heptane de 0.5 mm de diamètre initial et de 300 K de température initiale dans un environnement d'azote à une température ambiante de 800 et 1000 K et une pression ambiante comprise entre 0.1 et 9 MPa sous des conditions de microgravité dans un environnement stagnant.

Lorsque la pression ambiante est supérieure à la pression critique du liquide et la température ambiante est inférieure ou égale à la température critique du liquide, il s'agit du régime transcritique. **Curtis et Farrell (1988)** ont développé un modèle pour la vaporisation de gouttelette unique monocomposant pour une pression supérieure à la pression critique du liquide et proche ou au-dessus de la température critique du liquide. Ils ont appliqué leur modèle à des gouttelettes de n-octane ($T_c = 569\text{ K}$ et $P_c = 2.49\text{ MPa}$) s'évaporant dans de l'azote. Ils ont étudié deux types d'environnements gazeux : le premier est la gamme la plus probable pour la vaporisation initiale dans un moteur diesel : $P > P_c$ et $T < T_c$, soit $P = 2.533\text{ MPa}$ et $T = 550\text{ K}$ où P_c et T_c sont les valeurs critiques du liquide. La seconde est pour des températures et des pressions considérablement plus hautes : $P \geq 2P_c$ et $T \leq 2T_c$, soit $P = 4.985\text{ MPa}$ et $T = 1138\text{ K}$. Ces auteurs ont travaillé dans ces conditions pour caractériser le comportement d'une gouttelette en évaporation lorsqu'elle s'approche de son point critique. Il s'agit du régime thermodynamique le plus probable pour la vaporisation initiale dans un moteur diesel, parce que dans ces conditions la gouttelette est liquide (Figure 4).

Enfin, l'étude de gouttes et de sprays dans le régime thermodynamique supercritique du liquide est de plus en plus étudiée pour répondre à la demande des constructeurs automobiles ou aéronautiques toujours dans le but d'améliorer la combustion des moteurs. **Manrique et Borman (1969)** ont été les premiers à proposer un modèle d'évaporation à haute pression. Ils ont effectué

leurs simulations avec une gouttelette de dioxyde de carbone ($T_c = 301.3 \text{ K}$ et $P_c = 72.9 \text{ atm}$) dans une atmosphère d'azote stagnante. Les conditions thermodynamiques retenues pour ces modélisations étaient situées proche du point critique pour des températures ambiantes de 500 – 1600 K et des pressions de 7.093 – 12.6 MPa. **Zhu et Aggarwal (2000)** ont étudié numériquement la vaporisation d'une goutte immobile monocomposant sous des conditions de microgravité. Cette étude avait pour objectif principal de comparer les différentes équations d'état disponibles pour modéliser l'instationnarité de la phase gazeuse. Ce régime est aussi le plus probable pour la vaporisation initiale dans un moteur diesel. **Curtis et Farrell (1992)** distinguent 3 environnements représentatifs de ce régime :

- $T_r = 1.13$ et $P_r = 2.85$: environnement d'une chambre de combustion pour un moteur Diesel à injection indirecte typique (IDI),
- $T_r = 1.48$ et $P_r = 3.23$: valeurs typiques pour un moteur Diesel à injection directe (DI),
- $T_r = 1.78$ et $P_r = 3.23$: environnement déterminé spécifiquement de telle façon que la gouttelette atteigne le point critique de mélange.

Si l'évaporation d'une goutte a lieu dans un environnement subcritique, cette goutte reste liquide jusqu'à son évaporation complète. En revanche, dans les autres cas (transcritique et supercritique), le fluide peut devenir supercritique. Cette problématique n'est pas traitée dans cette étude, car les liquides testés (eau, acétone, éthanol et une solution d'eau et de PEG 400 à 10%) sont dans leur régime subcritique.

Par conséquent, cette synthèse bibliographique s'intéresse essentiellement aux études concernant l'évaporation de gouttes et de sprays réalisées dans le régime thermodynamique subcritique du liquide, ou de façon plus générale, aux travaux les plus proches de nos conditions d'études.

1.2.2 Evaporation d'une goutte unique

Les études sur l'évaporation d'une goutte unique sont nombreuses. Les travaux réalisés dans un environnement stagnant ont permis de caractériser les phénomènes propres à l'évaporation. L'étude de l'évaporation d'une goutte unique en chute libre est un cas particulier de l'étude de l'évaporation d'une goutte dans un environnement convectif. Ce cas particulier est intéressant pour caractériser le terme source issu d'une perte de confinement catastrophique suite à un accident industriel dans un local de stockage (le terme source correspondant à la dispersion de liquide à la sortie du fût).

L'évaporation de gouttes et de sprays a non seulement été étudiée dans divers environnements, mais aussi avec différents produits. Les produits monocomposants utilisés sont le plus souvent des hydrocarbures (n-heptane, n-hexane, n-octane, n-dodécane ...), des cryogéniques (dioxyde de carbone liquide, oxygène liquide...), des réfrigérants (R113), quelques produits chimiques (acétone, éthanol, ...) et de l'eau. Les hydrocarbures sont étudiés pour améliorer les mécanismes de combustion dans les moteurs automobiles et augmenter les rendements des moteurs thermiques et les fluides cryogéniques sont étudiés pour mieux caractériser leur comportement dans les moteurs de fusées. **Pour compléter la littérature, ce travail de thèse propose d'étudier le comportement de produits chimiques dans des conditions thermodynamiques représentatives de celles obtenues lors des accidents industriels.**

Cas d'une goutte dans un environnement stagnant

De nombreuses études sur l'évaporation de gouttes considèrent un environnement stagnant, dans lequel le mouvement entre la phase liquide et la phase gazeuse n'est pas pris en compte. Par conséquent, les effets de la convection, la gravité et les effets hydrodynamiques, comme la poussée d'Archimède, ne sont pas pris en compte : les environnements étudiés sont microgravitaires et les gouttes sont considérées immobiles. Ces études ont permis de nombreuses avancées, développées ci-après, sur la compréhension des mécanismes d'évaporation dans des environnements à hautes pressions et hautes températures.

Manrique et Borman (1969) ont étudié numériquement l'évaporation d'une goutte monocomposant unique dans un environnement stagnant proche des conditions critiques.

Les auteurs considèrent que toute l'énergie arrivant à la surface de la goutte est entièrement emportée par le transfert de masse. Cela se traduit par une diminution linéaire du carré du diamètre de la goutte en fonction du temps.

Dans un environnement suffisamment pressurisé, ils ont montré que cette hypothèse ne se vérifie pas toujours, et que le carré du diamètre de la goutte commence par augmenter à cause du transfert de chaleur entre l'environnement et la goutte. Le comportement de la phase gazeuse devient alors non idéal et doit être modélisé en tenant compte des effets des gaz réels. Il s'agit alors de la vaporisation à caractère transitoire et non plus de la vaporisation quasi-stationnaire.

Ces auteurs ont ainsi caractérisé l'apparition de ces deux régimes en fonction de la pression et de la température (Figure 5).

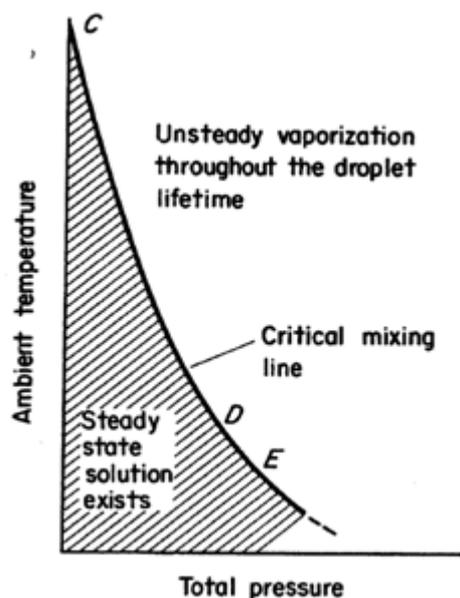


Figure 5 : Diagramme schématisant les conditions ambiantes pour lesquelles les solutions de l'état stationnaire existent. (Manrique et Borman, 1969)

Pour quantifier la pression ambiante à partir de laquelle le comportement de la phase gazeuse devient non-idéal, les auteurs ont comparé leur modèle haute pression avec un modèle basse pression. Le modèle haute pression prend en compte les effets des gaz réels et le modèle basse pression utilise la loi des gaz parfaits. Ils ont montré que le modèle basse pression est valable jusqu'à une pression de 1 MPa. **D'après leurs résultats, la vaporisation quasi-stationnaire intervient à de faibles pressions inférieures à 1 MPa et températures inférieures à 300 K.** Mais ces résultats ne sont pas quantitatifs. Le comportement du gaz peut alors être considéré comme idéal et l'utilisation de la loi des gaz parfaits se justifie. **Ces dernières remarques permettent de justifier, dans le cadre de ce travail de thèse, l'utilisation de l'hypothèse de gaz parfait et donc d'un modèle basse pression.**

Matlosz et al. (1972) ont étudié expérimentalement et numériquement le phénomène d'évaporation d'une gouttelette (720 – 910 μm et 1420 – 1780 μm) de n-hexane ($T_c = 507.4 \text{ K}$ et $P_c = 3.03 \text{ MPa}$) dans des environnements stagnants gazeux d'azote et d'argon à une température de 548 K et à une pression comprise entre 0.689 et 10.336 MPa. Contrairement à Manrique et Borman (1969), ils ont supposé que la vaporisation présentait un caractère transitoire.

Cas d'une goutte dans un environnement convectif

La convection, la gravité et les effets hydrodynamiques sont des mécanismes physiques importants dans le processus d'évaporation, car il y a un mouvement relatif entre une goutte et le milieu ambiant qui favorise le cisaillement de la couche liquide et donc son évaporation.

Dans cette étude bibliographique, une attention toute particulière est portée sur les études de l'évaporation de gouttes en chute libre.

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence des effets convectifs sur l'évaporation d'une goutte monocomposant.

Kim et Sung (2003) ont étudié numériquement l'évaporation d'une goutte monocomposant. Il s'agit d'une goutte unique de n-heptane de 0.5 mm de diamètre initial et à une température initiale de 293K. Son comportement est étudié dans un environnement d'azote dans lequel la température varie entre 600 et 1200 K pour une large plage de pressions ambiantes (0.5 – 5 MPa). Il faut noter que ces températures et ces pressions sont supérieures à celles retenues pour le travail de recherche présenté dans ce manuscrit, seuls les résultats obtenus avec la plus basse pression (0.5 MPa) semblent intéressants pour notre étude. L'originalité de l'étude de **Kim et Sung (2003)** réside dans le fait qu'ils aient étudié l'effet de la pression ambiante sur la vaporisation en comparant deux modèles : un « basse pression » et un « haute pression ».

Le modèle basse pression est basé sur la théorie de Spalding (1953), et utilise l'hypothèse de la quasi-stationnarité de la phase gazeuse. La goutte est considérée comme un corps ayant une température uniforme. Les auteurs utilisent un modèle à conductivité infinie en supposant le comportement du gaz idéal et en négligeant les phénomènes radiatifs. Leur modèle tient compte de la convection, à travers les corrélations de Ranz-Marshall (1952), les coefficients de Sherwood et de Nusselt. Ils utilisent la loi de Raoult à l'interface de la goutte. Le débit d'évaporation massique d'une gouttelette est donné par la corrélation de Faeth (1977) :

$$\dot{m}_f = 2\pi r(\rho D)_{air} \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} Sh_d$$

Équation 1

Où \dot{m}_f représente le débit d'évaporation, r le rayon de la goutte, $(\rho D)_{air}$ la diffusivité de vapeur du carburant dans l'air, Y_1 la fraction massique de vapeur de carburant dans l'air, Y_1^* la fraction massique de vapeur de carburant à la surface de la goutte et Sh_d le nombre de Sherwood de la goutte.

La température de la gouttelette est déterminée numériquement par la méthode itérative du code KIVA-3V. Les valeurs de la chaleur latente, la pression de vapeur et la conductivité thermique ont été prises dans la table de Vargaftik's (1983), dans lequel elles sont uniquement une fonction de la température. Pour $(\rho D)_{air}$, les auteurs utilisent une corrélation empirique suggérée dans le code KIVA-3V, (Amsden, 1989) pour déterminer la diffusivité de la vapeur du fuel dans l'air.

Le modèle haute pression considère l'équilibre entre les phases liquides et gazeuses en utilisant les fugacités des phases liquides et gaz pour le comportement réel du gaz.

Ils ont notamment caractérisé l'évaporation d'une goutte de n-heptane de 0.5 mm de diamètre initial à partir de l'évolution temporelle de son diamètre. La Figure 6 représente l'évolution du carré du diamètre de la gouttelette en fonction du temps à une température ambiante de 453 K pour une pression ambiante de 2 MPa, c'est-à-dire une pression plus élevée que la gamme de pressions retenue dans le cadre de ce travail de thèse.

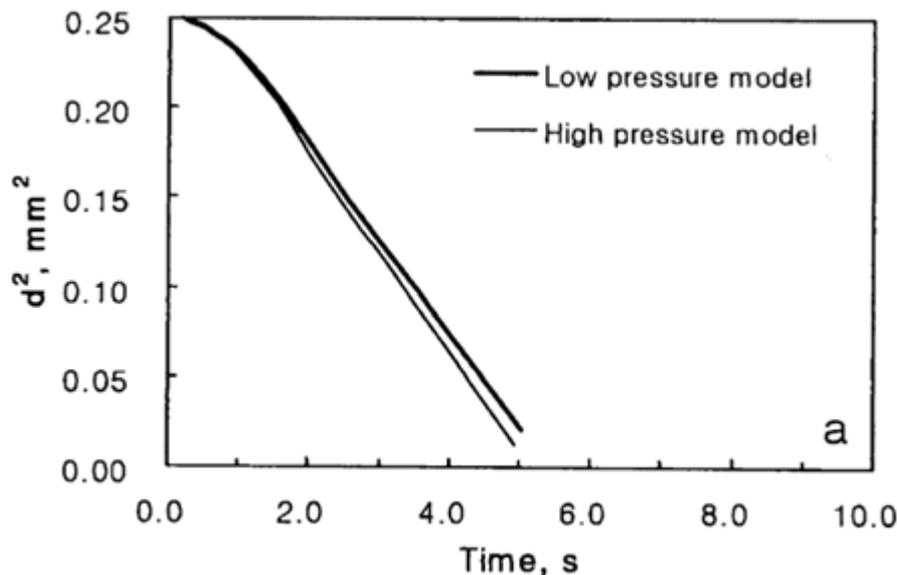


Figure 6 : Comparaison de l'évolution du diamètre de la gouttelette au carré en fonction du temps obtenu avec les modèles basse et haute pression (T = 453 K et P = 2 MPa) (Kim et Sung, 2003)

Cette figure compare les modèles « basse pression » et « haute pression » et montre que le carré du diamètre de la gouttelette diminue faiblement dans les premiers instants puis linéairement après 2 secondes. Les modèles « haute pression » et « basse pression » donnent des résultats similaires, bien que les prédictions du modèle « basse pression » soient légèrement supérieures à celles du modèle « haute pression » dans ces conditions (T = 453 K et P = 2 MPa). **Dans le cadre de ce travail de thèse,**

la température et la pression ambiantes sont moins élevées ($T = 300\text{ K}$ et $100\text{ KPa} < P < 600\text{ KPa}$). Par conséquent, le gaz aura davantage un comportement idéal et nous proposons alors de considérer ce comportement dans le cadre de cette étude. Les auteurs ont également représenté l'évolution du carré du diamètre de la gouttelette en fonction du temps pour une température similaire de 453 K , mais une pression ambiante de 5 MPa . A cette pression, les modèles « haute pression » et « basse pression » donnent des résultats très différents. Cette remarque montre qu'il est important de tenir compte des effets des gaz réels dans la détermination de l'évaporation d'une goutte à de hautes pressions.

Cette figure montre également que la durée d'évaporation de la goutte est de l'ordre de la seconde. On rappelle que les temps caractéristiques rencontrés sur la situation accidentelle étudiée dans le cadre du travail de recherche présenté dans ce manuscrit sont de l'ordre de la microseconde, voir de la milliseconde.

La Figure 7 représente l'évolution temporelle du carré du diamètre de la goutte en fonction du temps pour une température ambiante de 600 K .

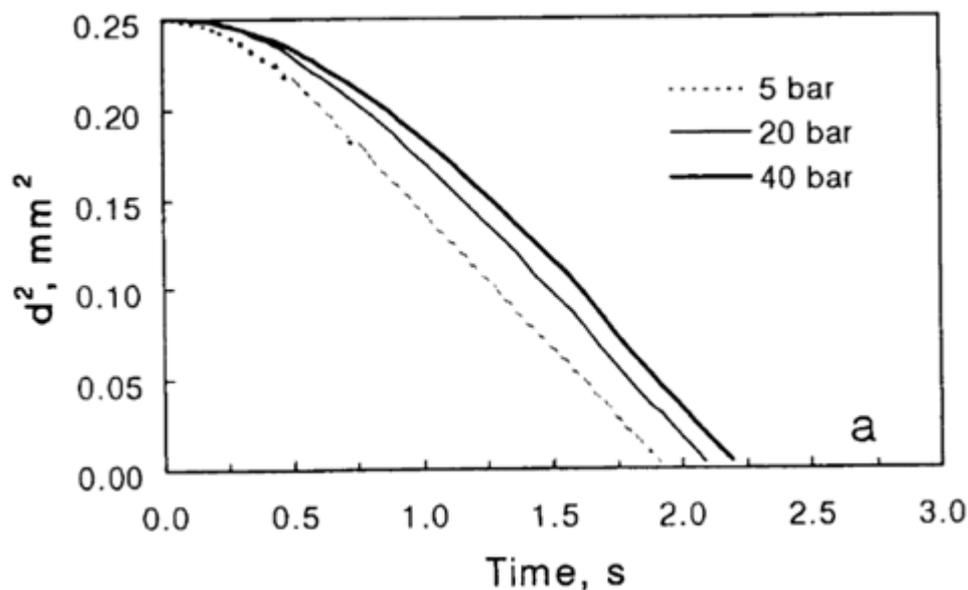


Figure 7 : Evolution temporelle du carré du diamètre de la goutte en fonction du temps pour une température ambiante de 600 K et pour trois pressions différentes (Kim et Sung, 2003)

La Figure 7 montre que, pour une température ambiante de 600 K , une diminution de la pression favorise l'évaporation : le carré du diamètre de la gouttelette diminue plus rapidement et la durée de vie de la goutte est plus courte. Dans le cadre de ce travail de thèse, on peut alors s'attendre à ce qu'une faible pression favorise l'évaporation. Toutefois, cette remarque est à pondérer étant donné que Kim et Sung ont travaillé à une température ambiante supérieure à celle retenue dans le cadre de ce travail de thèse (300 K).

Cas d'une goutte en chute libre

Pour l'étude de l'évaporation d'une goutte en chute libre, il est nécessaire de tenir compte de sa dynamique, et notamment de la force de traînée qui fait intervenir le coefficient de traînée. Cette force de traînée dépend de la vitesse de la goutte, de sa forme et de sa taille et de l'air. Le coefficient de traînée est un nombre sans dimension qui intervient dans le calcul de cette force et qui est caractéristique de la forme de la goutte. Il permet de quantifier la force de résistance d'une surface à un écoulement. Il est toujours une fonction du nombre de Reynolds qui est basé sur la vitesse de la goutte, et les propriétés physiques du gaz. Le nombre de Reynolds est défini par (Équation 2) :

$$Re = \frac{\rho_g u d}{\mu_g}$$

Équation 2

Où u est la vitesse de la goutte, d le diamètre de la goutte, μ_g la viscosité dynamique du gaz et ρ_g la masse volumique de la phase gaz. Il représente le rapport des forces aérodynamiques sur les forces de viscosité.

Plusieurs corrélations sont disponibles dans la littérature pour le coefficient de traînée :

Putnam (1961) a proposé la corrélation suivante pour des nombres de Reynolds élevés, qui tient compte de la traînée de Stokes et d'un facteur correctif :

$$Cd = \frac{24}{Re} \left[1 + \frac{Re^{\frac{2}{3}}}{6} \right]$$

Équation 3

Clift et al. (1978) ont proposé la corrélation suivante pour une sphère rigide :

$$Cd = 0.36 + \frac{5.47}{Re^{0.573}} + \frac{24}{Re}$$

Équation 4

Brauer (1979) a proposé une autre relation pour $Re < Re_c$. Le nombre de Reynolds critique Re_c est une fonction du degré de turbulence, il est de l'ordre de 5.10^{-5} .

$$Cd = \frac{24}{Re} + \frac{3.73}{\sqrt{Re}} - \frac{4.83 \cdot 10^{-3} \sqrt{Re}}{1 + 3 \cdot 10^{-6} Re^{3/2}} + 0.49$$

Équation 5

Cette corrélation est classiquement utilisée sous des formes simplifiées dans 3 régimes différents détaillés dans le Tableau 1.

Domaine	Limites	Formules précises	Approximatives
De Stockes (rampant)	$10^{-4} < Re < 1$	$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0.51Re^{0.687})$	$\frac{24}{Re}$
De Van Allen (tourbillons)	$1 < Re < 10^3$		$18.5Re^{-0.6}$
De Newton (sillages)	$10^3 < Re < 5.10^5$	0.44	

Tableau 1 : Formules précises et approximatives de la corrélation de Brauer en fonction de différentes valeurs du nombre de Reynolds

La relation précise correspondant au domaine $Re < 10^3$ a été développée par Schiller et Nauman (1933).

Il faut noter que les corrélations citées précédemment n'introduisent pas le nombre de Weber. Cependant, lorsque la pression ambiante augmente, ce nombre peut avoir une influence significative.

Le nombre de Weber gazeux de la goutte est défini par (Équation 6):

$$We = \frac{\rho_g u^2 d}{\sigma_l}$$

Équation 6

Où ρ_g représente la masse volumique du gaz environnant, u la vitesse de la goutte, d le diamètre de la goutte et σ_l la tension de surface de la phase liquide. Il représente le rapport entre les forces aérodynamiques de la goutte et les forces de tension superficielle.

Lorsque la pression ambiante augmente, les forces aérodynamiques augmentent et par conséquent, le nombre de Weber augmente. Ainsi, une augmentation de la pression ambiante entraîne un déséquilibre entre les forces aérodynamiques et les forces de tension de surface, ce qui peut engendrer une déformation de la goutte. Cette déformation de la goutte peut alors être mise en évidence selon la valeur du nombre de Weber.

En **1949**, **Taylor** a défini, comme critère de stabilité, un nombre de Weber critique qui indique la taille stable maximale dans des conditions au repos et qui est donné par :

$$We_{crit} \approx 12$$

Équation 7

Si le nombre de Weber gazeux de la goutte est inférieur à une valeur critique de l'ordre de 12, cela signifie que la goutte est stable et qu'elle n'est pas soumise à la rupture secondaire. En revanche, si le nombre de Weber est supérieur à 12, différents régimes d'atomisation secondaires peuvent se présenter.

En **2008**, **Loth (2008)** a proposé une corrélation permettant d'obtenir le coefficient de traînée et introduisant le nombre de Weber :

$$\Delta C_D^* \approx 3.8 \times 10^{-3} (WeRe^{0.2}) + 3 \times 10^{-5} (WeRe^{0.2})^2 + 9 \times 10^{-7} (WeRe^{0.2})^3$$

Équation 8

Avec

$$\Delta C_D^* \equiv \frac{C_D - C_{D,We \rightarrow 0}}{C_{D,We \rightarrow \infty} - C_{D,We \rightarrow 0}}$$

Équation 9

Où

$$C_{D,We \rightarrow 0} = \left[\frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \right] + \frac{0.42}{1 + \frac{42.500}{Re^{1.16}}}$$

Équation 10

$$C_{D,We \rightarrow \infty} \approx \frac{8}{3} + \frac{24}{Re} \left(\frac{2 + 3\mu^*}{3 + 3\mu^*} \right)$$

Équation 11

Avec $\mu^* = \frac{\mu_l}{\mu_g}$, le rapport entre la viscosité du liquide et la viscosité du gaz.

Cette corrélation est tout à fait appropriée pour étudier l'évaporation de goutte en chute libre dans une atmosphère pressurisée, car elle permet de tenir compte de la déformation de la goutte.

Parmi les études réalisées sur l'évaporation de gouttes, quelques études (Stengele et *al.*, 1999 ; Guella et *al.*, 2008) traitent de l'évaporation de gouttes en chute libre.

Stengele et *al.* (1999) ont étudié l'évaporation d'une goutte de diamètre initial inférieur au millimètre en chute libre dans des environnements ayant des pressions comprises entre 2 et 4 MPa et des températures comprises entre 550 et 650 K. Ils ont travaillé sur une hauteur de chute de 0.7 m et ont obtenu des mesures expérimentales pour des gouttes de diamètres initiaux compris entre 630 μm et 820 μm . Les produits testés sont du n-pentane, du n-nonane et des mélanges binaires de ces deux corps purs. Ils ont présenté l'évolution du diamètre et de la vitesse des gouttes en fonction de la hauteur. Il faut noter que leurs conditions d'étude sont largement plus élevées que celles proposées dans le cadre de cette étude.

Guella et *al.* (2008) ont étudié l'évaporation d'une goutte en chute libre à pression atmosphérique et à température ambiante. Les gouttes de diamètre initial inférieur au millimètre étaient lâchées d'une hauteur de 1.4 m. Ils ont développé un modèle d'évaporation de gouttes qu'ils ont validé sur leurs essais expérimentaux ($270 \mu\text{m} < d < 650 \mu\text{m}$) et les résultats obtenus par Sartor et Abbott (1975) ($d = 200 \mu\text{m}$). Les produits testés sont de l'eau, de l'acétone, de l'éthanol et du 2-éthyl-1-hexanol. Ils ont uniquement présentés des résultats sur les vitesses des gouttes.

Cependant, dans ces études, réalisées avec des gouttes de diamètres inférieurs au millimètre, le coefficient de traînée est uniquement fonction du nombre de Reynolds.

1.2.3 Phénomènes influant sur l'évaporation d'un spray

Ce chapitre présente les phénomènes influant sur l'évaporation d'un spray. Comprendre ces mécanismes complexes nécessite de séparer les phénomènes afin d'étudier dans un premier temps la collision et la fragmentation dans les sprays non-évaporatifs, et dans un deuxième temps les mécanismes d'évaporation dans les sprays.

Pour bien comprendre les mécanismes d'évaporation des jets, il est nécessaire de découpler le problème. Il y a d'un côté les mécanismes d'échange de chaleur qui vont participer directement à l'évaporation de la goutte, et il y a les effets dynamiques (atomisation et collisions entre les gouttelettes voisines) qui participent indirectement à cette évaporation. En effet, la formation d'un grand nombre de gouttelettes par atomisation augmente la surface totale d'échange des gouttes ce qui favorise le transfert de chaleur et l'évaporation. Au contraire, les collisions augmentent la taille des gouttelettes, ce qui a tendance à réduire le taux d'évaporation. Il est donc important de clarifier l'effet de la pression ambiante sur la distribution des tailles de gouttes pour un spray non-évaporatif avant de discuter le cas d'un spray évaporatif. Sirignano (1999) a suggéré que les interactions entre les gouttelettes doivent être considérées quand plusieurs gouttelettes sont présentes et que la distance entre elles deviennent aussi petite que quelques diamètres de goutte.

Atomisation – Régimes de fragmentation des gouttes

Shraiber et al. (1996) et **Liu et Reitz (1997)** ont proposé divers régimes de fragmentation des gouttes en fonction du nombre de Weber. Ces régimes de fragmentation des gouttes peuvent être classés selon les trois catégories représentées à la Figure 8.

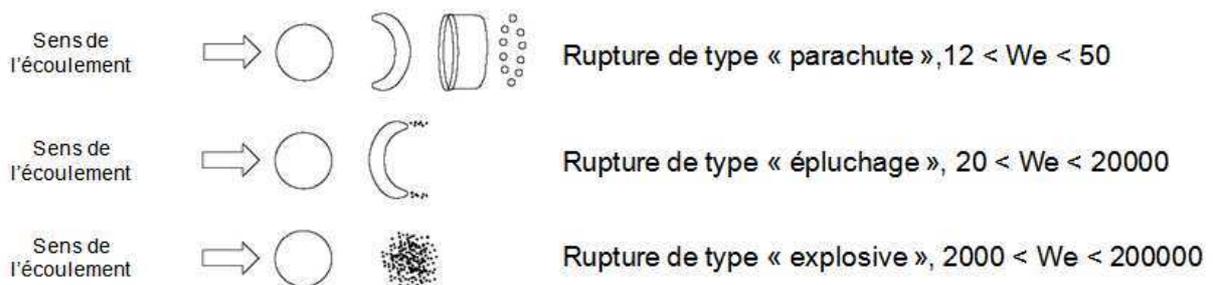


Figure 8 : Régimes de fragmentation des gouttes (adapté de Shraiber et al. (1996) et Liu et Reitz (1997))

Influence de la pression ambiante sur l'atomisation

L'influence de la pression ambiante sur un spray est un phénomène complexe qui a été davantage étudié sur les sprays non-évaporatifs que les sprays évaporatifs. Pour cette partie, nous nous concentrons essentiellement sur les travaux de **Kim et Sung (2003)** qui ont étudié l'influence de la pression ambiante sur un spray non-évaporatif. Comme modèle d'atomisation, ils ont utilisé le modèle standard d'atomisation « Taylor analogy breakup (TAB) » (O'Rourke et Amsden, 1987) compensé par une analyse de l'instabilité linéaire de Liu et *al.* (1993). Les gouttelettes injectées à partir de la buse sont supposées avoir une taille caractéristique dépendante du diamètre de la sortie de la buse. La taille des gouttes formées à partir d'un jet liquide est supposée être proportionnelle à la longueur d'onde correspondant à la fréquence des instabilités de Kelvin-Helmoltz sur la surface de liquide. Une description plus précise du modèle d'atomisation est disponible dans les travaux suivants (Kim et Sung, 2001a et Kim et Sung, 2001b). Ce modèle a été validé expérimentalement par Alloca et *al.* (1994) dans le cas d'un spray non-évaporatif. Les conditions du spray pour les calculs sont résumées au Tableau 2.

Paramètre	Valeur
Pression maximale d'injection	60 MPa
Durée d'injection	2.36 ms
Masse de carburant	9.84 mg
Diamètre de la buse	0.02 cm

Tableau 2 : Conditions expérimentales pour un spray de n-heptane (Kim et Sung, 2003)

Le carburant (n-heptane) est injecté dans de l'azote. Le domaine cylindrique de calcul a un rayon de 20 mm et une longueur de 150 mm ; les fines mailles sont situées autour de l'axe d'injection. La température du gaz ambiant est fixée à 293 K, avec des pressions ambiantes pouvant varier de 1.7 et 4 MPa.

Les auteurs ont trouvé que l'augmentation de la pression ambiante diminue la distance de pénétration du spray, à cause de l'augmentation de la force de traînée. La distance de pénétration calculée correspond bien avec les mesures d'Alloca et *al.* (1994) à 1.7 MPa. En revanche, une augmentation de la pression augmente l'angle du spray, ce qui confirme les résultats expérimentaux obtenus par Alloca et *al.* (1994). La Figure 9 représente la distribution des tailles de gouttes dans tout le champ du spray 1.3 ms après l'injection.

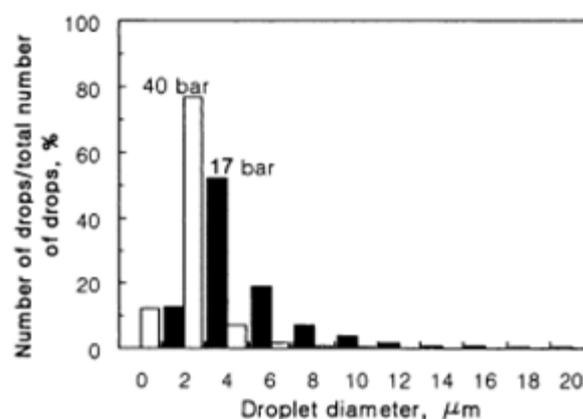


Figure 9 : Distribution de tailles de gouttes d'un spray (1.3 ms après injection) (T = 293K) (Kim et Sung, 2003)

Cette figure montre qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la proportion de gouttes de classe de diamètre de 4 μm , et entraîne une diminution de la proportion de gouttes de diamètre supérieur à 6 μm . Les auteurs (Kim et Sung (2003)) en déduisent que l'atomisation est le facteur déterminant des tailles gouttes, par rapport aux collisions, pour un spray à haute pression. Ces résultats d'atomisation favorisée à haute pressions ambiantes sont cohérents avec les travaux précédents de Lin et *al.* (1990) qui ont trouvé qu'une augmentation de la masse volumique du gaz ambiant provoque l'instabilité du jet par des forces aérodynamiques. Giffen et Lamb (1953) ont aussi montré que l'atomisation était améliorée pour une masse volumique de gaz élevée.

Une autre explication possible peut être que les collisions entre les grosses gouttes entraînent la création de petites gouttes et la disparition de grosses gouttes, ce qui favoriserait l'atomisation. Cependant, les résultats de ces auteurs doivent être pondérés car ils présentent une fréquence de gouttes par classe, les résultats sont comparables à partir du moment où les échantillons sont suffisamment peuplés. Or si le nombre total de gouttes est différent, cela peut entraîner une modification sensible du nombre de gouttes dans chaque classe.

On peut alors se demander quelles sont les probabilités de collisions entre les gouttes dans le cas d'une pulvérisation de produits chimiques liquides à pression ambiante comprise entre 1 et 6 bar.

Influence de la pression ambiante sur les collisions

Kim et Sung (2003) ont également étudié l'effet de la pression ambiante sur la fréquence de collisions des gouttes calculée pour deux pressions ambiantes (1.7 et 4 MPa, soit 17 et 40 bar) dans le cas d'un spray entier (Figure 10).

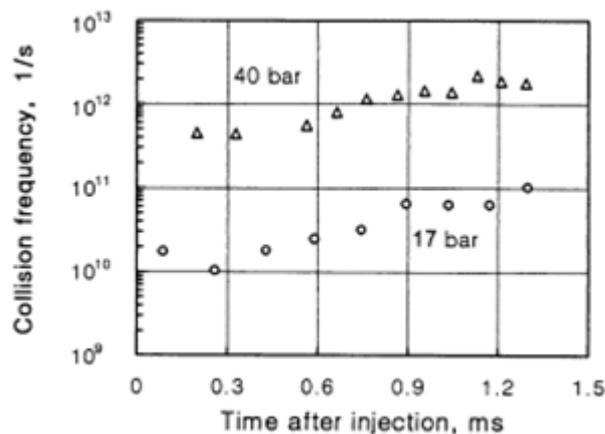


Figure 10 : Fréquence de collision des gouttes calculée pour deux pressions ambiantes (Kim et Sung, 2003)

Cette figure montre qu'une diminution de la pression ambiante d'un facteur 2 (de 4 MPa à 1.7 MPa) diminue la fréquence des collisions entre les gouttes d'un facteur 100. Les auteurs (**Kim et Sung, 2003**) expliquent que ce résultat est principalement dû à la diminution de la distance de pénétration du jet et à l'augmentation de la densité du nombre de gouttes.

En extrapolant cette diminution de la fréquence des collisions avec la diminution de la pression ambiante, il semble que les fréquences des collisions soient encore moins fréquentes pour des pressions ambiantes comprises entre 100 et 600 KPa. Comme ces auteurs considèrent que les collisions ne sont pas le facteur déterminant de la taille des gouttes alors qu'elles sont de l'ordre de 10^{10} à 1.7 MPa, **on peut supposer qu'elles le seront encore moins pour des pressions ambiantes comprises entre 100 et 600 KPa. Ceci pourrait justifier l'hypothèse de peu d'interactions entre particules dans le cas d'une pulvérisation de produits chimiques liquides pour des pressions ambiantes comprises entre 100 et 600 KPa.**

Cas d'un spray évaporatif

Kim et Sung (2003) ont étudié l'influence de la pression ambiante sur un spray évaporatif dans un environnement pressurisé entre 0.5 et 5 MPa à des températures comprises entre 600 et 1200 K. Ils ont utilisé un modèle « haute pression » pour tenir compte de l'effet des gaz réels lors de l'évaporation d'un spray. Ils ont utilisés les méthodes numériques du code KIVA-3V (Amsden, 1997), basées sur une description Eulérienne de la phase gaz et une description Lagrangienne de la goutte pour modéliser l'évaporation. Les deux approches sont couplées par les termes source, décrivant les taux de transfert de masse, de quantité de mouvement et d'énergie.

Ils ont étudié la pulvérisation d'un spray de n-heptane initialement à une température de 293 K injecté dans un environnement à une pression comprise entre 1.7 et 4 MPa et à une température comprise entre 600 K et 1200 K.

La Figure 11 représente l'évolution de la fraction de carburant évaporée à une pression ambiante de 4 MPa et à une température ambiante de 1200 K calculée en utilisant le modèle « basse pression » et le modèle « haute pression ».

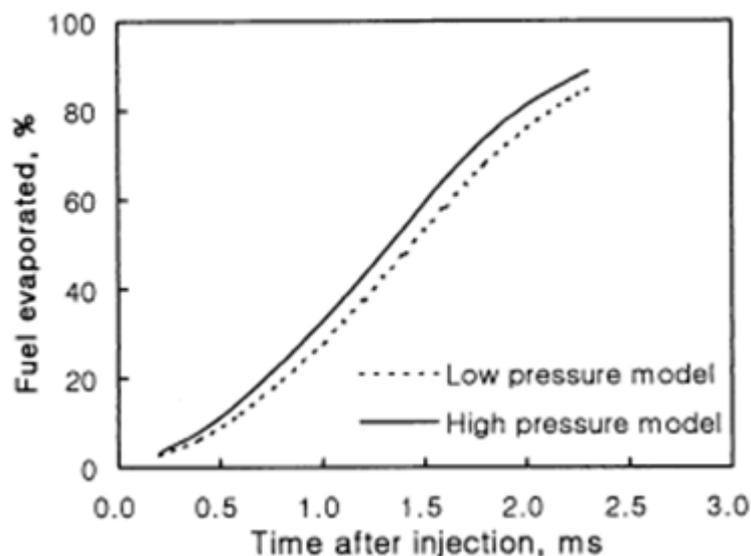


Figure 11 : Fraction de carburant évaporée à 4 MPa et à 1200 K calculée en utilisant les modèles basse et haute Pression (Kim et Sung (2003))

Cette figure montre dans un premier temps que les deux modèles présentent la même allure dans la prédiction de la fraction de carburant évaporée, avec une augmentation de cette fraction en fonction du temps. Par ailleurs, la comparaison des modèles entre eux montre que le modèle basse pression est inférieur d'environ 5% par rapport au modèle haute pression. Bien que cela n'ait pas été vérifié par les auteurs, il est envisageable de considérer que la différence entre le modèle haute pression et le modèle basse pression soit négligeable. Par conséquent, le modèle « basse pression » pourrait permettre de modéliser l'évaporation de sprays à des températures et des pressions plus faibles.

La Figure 12 représente l'effet de la pression ambiante sur la fraction de carburant évaporée pour des pressions de 1.7 et 4 MPa et des températures de 600 K et 1200 K.

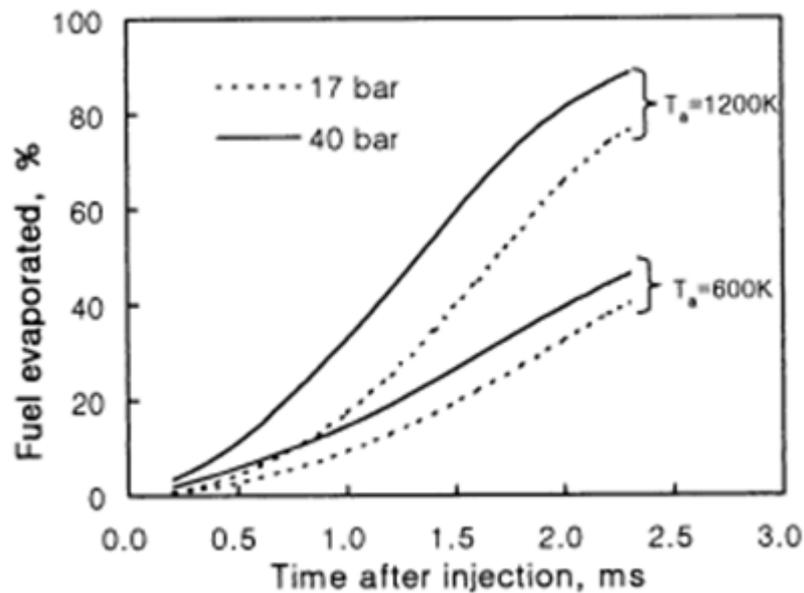


Figure 12 : Effet de la pression ambiante sur la fraction de carburant évaporée (Kim et Sung, 2003)

Cette figure montre que, pour deux températures différentes, une augmentation de la pression ambiante augmente sensiblement la fraction de carburant évaporée. En effet, l'augmentation de la pression ambiante augmente la masse volumique du milieu, l'air devient plus dense et les frottements plus importants, ce qui favorise l'atomisation et l'évaporation de gouttelettes. Bien que cela paraisse trivial, la Figure 12 montre clairement qu'une augmentation de température augmente fortement la quantité de produit évaporée. **Ainsi, les auteurs montrent clairement que l'augmentation du couple pression/température conduit à l'augmentation de l'évaporation d'un spray.**

L'analyse de ces travaux montre que l'évaporation d'un spray injecté dans une ambiance pressurisée entre 100 et 600 KPa à une température ambiante de 300 K devrait être favorisée avec l'augmentation de la pression ambiante. Cependant, compte tenu de la faible température ambiante, ce phénomène peut difficilement être décelé. Dans ces conditions, il est alors important de quantifier l'effet de la pression sur l'hydrodynamique de la goutte, de quantifier l'effet de la pression sur l'évaporation d'une goutte et de comparer ces deux effets.

Pour conclure sur la théorie et la phénoménologie de l'évaporation, il est important de remarquer que les modèles présentés considèrent l'hypothèse d'une goutte sphérique. Cette hypothèse, largement utilisée dans les modèles d'évaporation disponibles dans la littérature est justifiée car les diamètres maximaux des gouttes étudiées sont de l'ordre du millimètre et peuvent atteindre la dizaine de micromètres dans les sprays, notamment ceux issus d'injecteurs utilisés dans les moteurs. Cependant, les gouttes d'un jet issu d'une perte de confinement suite à une explosion peuvent atteindre des diamètres de l'ordre du centimètre. Pour de tels diamètres, le nombre de Weber de la goutte devient suffisamment grand (supérieur à 1) pour entraîner une déformation de la goutte le long de sa trajectoire et modifier sa vitesse : peu d'études ont tenu compte de l'évolution de la forme de la goutte dans leur modèle.

Pour étudier cette problématique, ce travail de recherche a nécessité de travailler avec des gouttes de tailles plus importantes (0.5, 2 et 6.5 mm) et de prendre en compte l'évolution de la forme de la goutte au cours de sa chute. La déformation de la goutte au cours de sa trajectoire modifie alors sa traînée et sa vitesse. La contribution de ce travail de thèse consiste entre autre à mettre au point une corrélation du coefficient de traînée qui tienne compte de l'évolution de la forme de la goutte.

Nous venons de voir la théorie et la phénoménologie de l'évaporation d'une goutte, d'un ensemble de gouttes et d'un spray. Il s'agit à présent de détailler les expérimentations qui ont été conduites et rapportées dans la littérature pour vérifier cette théorie.

1.3 Expérimentations

Cette partie décrit les travaux expérimentaux ainsi que les résultats obtenus dans la littérature pour étudier l'évaporation d'une goutte et d'un spray et pour vérifier la théorie présentée précédemment.

1.3.1 Evaporation d'une goutte unique

Dans un premier temps, plusieurs auteurs ont caractérisé l'évaporation d'une goutte unique et immobile dans un environnement à haute pression et à haute température (Nomura et *al.*, 1996). Pour ce faire, les auteurs ont fixé cette goutte à un thermocouple et ont caractérisé son évaporation en mesurant l'évolution du diamètre au moyen d'un dispositif de diagnostic optique. Ils ont utilisé une méthode d'éclairage par transmission et ont analysé leurs résultats au moyen d'une méthode de traitement d'images utilisant la technique du seuillage.

1.3.2 Evaporation d'un spray

L'objectif de cette partie est de détailler les travaux expérimentaux et les résultats obtenus dans la littérature sur l'évaporation d'un spray et notamment les dispositifs expérimentaux et les différentes techniques de mesures utilisées.

Dans la littérature, l'étude expérimentale de l'évaporation de sprays est réalisée dans une chambre à combustion préalablement chauffée et pressurisée par un gaz inerte.

Les expérimentations conduites sur l'évaporation d'un spray utilisent des buses de pulvérisations. Ces buses sont caractérisées par leur nombre de débit (Flow Number) et leur coefficient de décharge sont liés par D_0^2 . Les pulvérisations obtenues au moyen de ces buses génèrent des gouttes de tailles différentes. La granulométrie de ces sprays est modélisée par des distributions mathématiques empiriques à partir de données expérimentales.

Une fonction de distribution du diamètre instantané $f(d)$ peut être utilisée pour décrire un spray. Cette fonction donne le nombre de gouttes caractérisées par un certain diamètre.

Une distribution volumique peut également être utilisée : elle indique la fraction de volume occupée par les gouttes d'un diamètre donné dans le volume total de liquide du spray. Plusieurs corrélations empiriques différentes sont utilisées pour obtenir des distributions de tailles de gouttes.

Distribution de Rosin-Rammler

Une distribution de Rosin-Rammler est une distribution à 2 paramètres. L'équation de distribution de Rosin-Rammler modélise le volume de liquide contenu dans toutes les gouttes d'un diamètre d donné. La fraction volumique de liquide $\Phi(d)$ est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\int_0^d f(d') [d']^3 dd'}{\int_0^\infty f(d) [d]^3 dd} \equiv \Phi(d) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d}{a} \right)^b \right]$$

Équation 12

où a et b sont des constantes à ajuster aux données expérimentales : a représente le diamètre caractéristique et b le coefficient de dispersion. Ainsi, la loi distribution $f(d)$ peut s'exprimer de la façon suivante :

$$f(d) = \frac{b}{a^b} d^{b-4} \exp \left[- \left(\frac{d}{a} \right)^b \right]$$

Équation 13

Distribution de Nukiyama-Tanasawa

Une autre équation de corrélation utilisée est l'équation de Nukiyama-Tanasawa, qui spécifie que :

$$f(d) = ad^2 \exp(-bc^c)$$

Équation 14

La constante a est reliée à la fonction gamma par la condition sur l'intégrale $\int_0^{\infty} f(d)dd$ égale à 1. Ainsi, les deux paramètres b et c restent à être ajustés pour s'adapter aux données expérimentales.

Distribution log normale

La loi log-normale comporte uniquement 2 paramètres : le diamètre moyen et l'écart-type du logarithme de la variable (δ_{ln}).

Par conséquent, la modélisation des distributions par une loi log-normale s'écrit de la façon suivante :

$$f(d, d_m, \delta_{ln}) = \frac{1}{d\delta_{ln}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \ln d_m)^2}{2\delta_{ln}^2}\right)$$

Équation 15

Avec :

$d > 0$: le diamètre

d_m : le diamètre moyen massique au sens de la loi log-normale

δ_{ln} : l'écart-type du logarithme de la variable

Un paramètre important pour le calcul des lois de distributions sont les diamètres caractéristiques des gouttes. Ces diamètres sont déduits de la distribution volumique et plus particulièrement de la distribution cumulative :

- $d_{v0.5}$ ou d_{v50} est le diamètre caractéristique correspondant à 50% du volume du spray,
- d_{v10} et d_{v90} sont des diamètres caractéristiques correspondants à l'étalement de la distribution. Ces deux dernières grandeurs sont utilisées par le granulomètre de Malvern et sont qualifiés de spray factor.

En outre, il est possible d'utiliser un diamètre de gouttelette moyen d_{mn} pour représenter un spray. En particulier, la formulation suivante :

$$d_{mn} = \left(\frac{\int_0^{\infty} f(d)d^m dd}{\int_0^{\infty} f(d)d^n dd} \right)^{1/(m-n)}$$

Équation 16

En pratique, $f(d)$ ne sera pas une fonction continue. Cependant, pour un spray ayant un nombre important de gouttes la fonction est bien approximée comme une fonction continue. Un exemple de diamètre moyen de gouttelettes est le diamètre moyen de Sauter d_{32} , qui est le ratio du volume de liquide total dans le spray sur la surface totale de gouttes dans le spray.

Tous ces diamètres sont calculés à partir de la formulation générale suivante :

$$(d_{qp})^{q-p} = \frac{\int_0^{+\infty} f_n(d) d^q dd}{\int_0^{+\infty} f_n(d) d^p dd} = \frac{\int_0^{+\infty} f_v(d) d^{q-3} dd}{\int_0^{+\infty} f_v(d) d^{p-3} dd}$$

Équation 17

Avec

f_n : distribution numérique

f_v : distribution volumique

$$(d_{qp})^{q-p} = \frac{(d_{q0})^q}{(d_{p0})^p}$$

Équation 18

Avec

d_{10} : moyenne arithmétique du diamètre des gouttes

d_{43} : moyenne arithmétique de la distribution volumique

d_{20} : diamètre de la goutte dont la surface est la surface moyenne des gouttes

d_{30} : diamètre de la goutte dont le volume est le volume moyen des gouttes

d_{32} : diamètre de Sauter

Tous les diamètres présentés précédemment sont des diamètres moyens, ils permettent de synthétiser la distribution granulométrique d'un spray. Le diamètre de Sauter (d_{32}) est le diamètre le plus utilisé et le plus représentatif car il correspond au rapport du volume des gouttes (représentatif de la quantité de liquide) sur leur surface (permettant de caractériser l'évaporation à partir de la surface d'échange). Par conséquent, il est déterminant dans la plupart des phénomènes.

Les techniques de mesures

La connaissance des distributions de tailles de gouttes d'un spray et de la vitesse des gouttelettes en fonction du temps permet de calculer des bilans de matière sur les gouttes et donc de déterminer des taux d'évaporation. Ainsi, pour déterminer la granulométrie d'un spray, trois techniques de mesures optiques principales sont utilisées :

- l'imagerie rapide couplée à une technique ombroscopique,
- la granulométrie par diffraction laser,
- l'interférométrie à Phase Doppler.

L'imagerie rapide couplée d'une technique ombroscopique

Cette technique nécessite une caméra à haute fréquence d'acquisition et un système d'éclairage par transmission qui permet la visualisation de gouttes d'un jet en fonction du temps (taille et trajectoire). Le volume de mesure possible par cette technique est grand. Elle permet d'obtenir des informations sur les dimensions et la morphologie de la goutte mais doit être calibrée pour quantifier l'erreur de mesure. Un des inconvénients de cette technique est le fait de mesurer dans un plan et donc de perdre l'information sur la forme tridimensionnelle de l'objet. En revanche, l'avantage cette technique de champ est d'avoir une zone de mesure beaucoup plus importante qu'avec l'interférométrie à phase Doppler ou une autre technique de mesure dite ponctuelle.

La granulométrie par diffraction laser

Le granulomètre de diffraction laser est équipé d'une diode laser ou un laser He Ne. Le faisceau laser est reçu par une lentille réceptrice.

L'interférométrie à Phase Doppler

Un interféromètre à phase Doppler est constitué d'une ou plusieurs sources lumineuses de différentes longueurs d'onde (uniquement des lasers) et d'un ou plusieurs photo-détecteurs selon que l'on veuille faire des mesures en 1D, en 2D ou en 3D, comme présenté à la Figure 13.

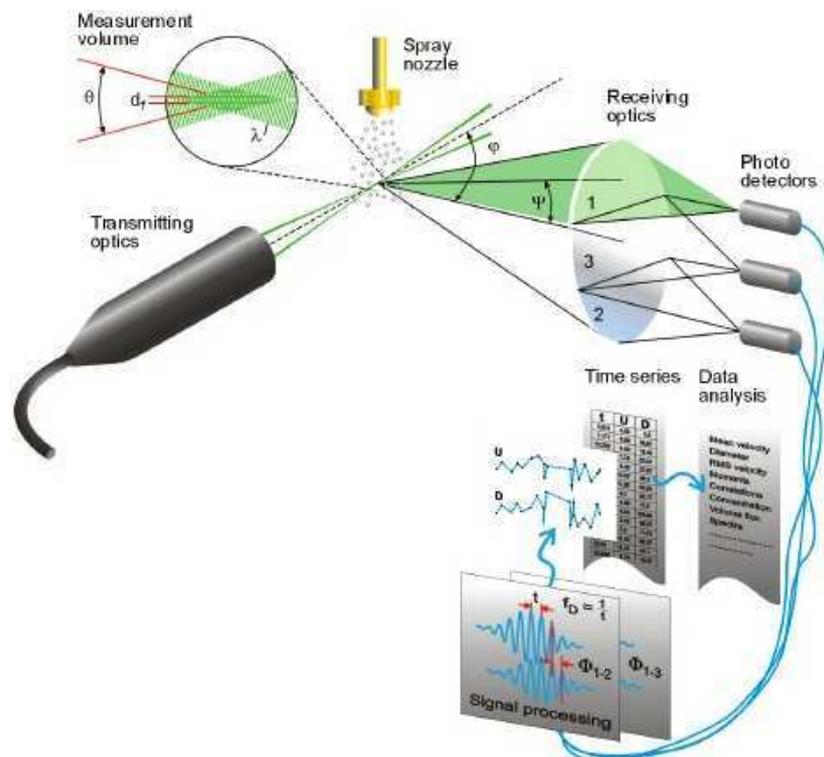


Figure 13 : Principe de l'interférométrie à phase Doppler (Dantec Dynamics)³

³ <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1058>

Cette technique optique permet de mesurer simultanément la taille et la vitesse de particules sphériques. Ces particules peuvent être des gouttes, des bulles ou des particules solides, que l'on trouve habituellement dans des sprays, lors de l'atomisation d'un liquide ou dans les écoulements diphasiques et multiphasiques.

Cette technique permet uniquement de mesurer des particules sphériques et dans le cas de sprays issus de buse, il peut alors permettre de déterminer à partir de quelle distance du nez de la buse le jet est pleinement développé dans l'espace.

L'interférométrie à Phase Doppler est communément utilisée pour déterminer la taille et la vitesse des gouttes dans un spray (Amara et al. (1997), Fdida et al. (2008), Guerrassi et Champoussin (1995), Yildiz et al. (2006)). Cependant, cette technique, très précise, est restreinte à de petits volumes de mesure, c'est un point négatif et/ou positif selon ce que l'on veut voir, contrairement à l'imagerie qui permet une analyse globale du jet.

Guerrassi et Champoussin (1995) ont utilisé un granulomètre à Phase Doppler pour mesurer la taille et la vitesse axiale des gouttelettes d'un spray Diesel confiné. Les mesures ont été réalisées à température ambiante et à différentes positions ; entre 10 mm et 50 mm en aval de l'orifice de la buse. Cette étude donne l'évolution spatiotemporelle de différents diamètres et de différentes vitesses dans le cas d'injecteurs cylindriques « hole », et fourni de nouvelles mesures pour des injecteurs « pintle ».

Amara et al. (1997) ont utilisé un analyseur à Phase Doppler pour caractériser expérimentalement l'effet de la température sur la structure d'un jet Diesel issu d'un injecteur monotrou. Ils ont mesuré les tailles et les vitesses temporelles de gouttes du spray. Les expérimentations ont été réalisées dans une chambre à combustion transparente de volume constant. La chambre était remplie d'azote à une pression de 2 MPa, dans une gamme de température de 20 à 325°C. Ils ont montré que le diamètre moyen de Sauter croît en fonction de la pénétration du jet et que cette augmentation est nettement plus marquée à basse température qu'à haute température. Ils assimilent ce résultat à la superposition de trois phénomènes fondamentaux : la coalescence, l'évaporation et la traînée aérodynamique des gouttes. A de basses températures, la coalescence est le principal processus qui augmente le diamètre moyen de Sauter. Aux hautes températures, la coalescence produit des tailles de gouttes plus importantes et l'évaporation fait disparaître les gouttes de faibles diamètres plus vite qu'elle ne réduit la taille des plus grosses, ce qui explique l'augmentation du diamètre moyen de Sauter. Ils ont également montré que la traînée n'a qu'un effet modéré.

Boëdec (1999) a aussi utilisé un anémomètre à Phase Doppler pour la caractérisation expérimentale d'un spray dense et rapide.

Yildiz et al. (2006) ont étudié les conditions initiales de l'atomisation d'un liquide pressurisé issu d'un stockage. Ils ont utilisé la technique de vélocimétrie basée sur l'interférence laser Doppler pour déterminer les distributions des tailles et des vitesses de gouttes. Une attention particulière a été portée à la sensibilité de ces distributions à la pression et à la température.

Des études disponibles dans la littérature comparent les trois techniques de mesures entre elles (Yon, 2003 et Fdida, 2008). Comme mentionné plus haut, ces techniques de mesure utilisent des volumes de mesures différents. La comparaison de ces techniques doit donc en tenir compte.

Les volumes de mesures sont différents dans ces trois cas : celui de l'interférométrie à phase Doppler est très petit, plus petit que celui du granulomètre de Malvern qui est lui-même plus petit que celui de l'imagerie rapide.

Yon (2003) a comparé ces trois techniques pour caractériser un jet Diesel haute pression. La Figure 14 montre les résultats obtenus avec ces trois techniques pour la distribution volumique en fonction des classes de diamètres.

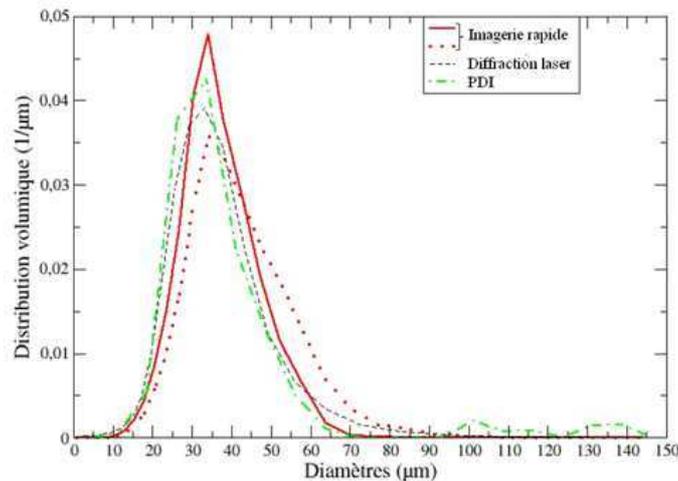


Figure 14 : Confrontation des granulométries obtenues par les trois techniques (Adapté de Yon, 2003)

La distribution volumique indique la fraction de volume occupée par les gouttes d'un diamètre donné dans le volume total de liquide du spray. Un écart maximal de 20% entre les différentes techniques a été trouvé au niveau du pic. Cependant, pour une classe de diamètre de 60 μm , il semble que l'écart soit plus important. Il serait alors préférable de regarder l'erreur sur le volume de liquide en comparant les intégrales des courbes entre elles. Ce volume représente la quantité maximale de produit qui puisse être évaporée. Actuellement, aucune étude ne détaille l'erreur commise sur la quantité de produit évaporée si une erreur de 20% est faite sur la granulométrie du spray en entrée d'un modèle d'évaporation.

Fdida et al. (2008) ont aussi comparé ces trois techniques pour caractériser des sprays d'essence produits par des systèmes à injection directe. Alors que les études comparant des techniques de mesures de gouttes trouvées dans la littérature traitent principalement d'écoulements stationnaires, une attention particulière a été portée sur la nature instationnaire du spray. Ils ont comparé le diamètre moyen de Sauter (d_{32}) et le moyenne arithmétique de la distribution volumique (d_{43}) qui constituent des paramètres communs utilisés pour qualifier un spray. La distribution de tailles de gouttes est caractérisée à deux positions en aval du spray et pour différentes positions à partir du centre jusqu'à l'extrémité du spray. Ils ont trouvé un maximum de déviation de 10% entre les différentes techniques pour les mesures réalisées au centre du spray. Cependant, plus la position de mesure s'éloigne du centre du spray, plus l'écart maximal est élevé.

Le seuillage : opération du traitement d'images

Plusieurs études parlent du traitement d'images pour extraire des informations sur les gouttelettes (Boëdec, 1999 ; Fdida et *al.*, 2008 et Yon, 2003). Les images sont caractérisées par des pixels sombres représentant les gouttes et par des pixels clairs représentant le fond lumineux (Figure 15).

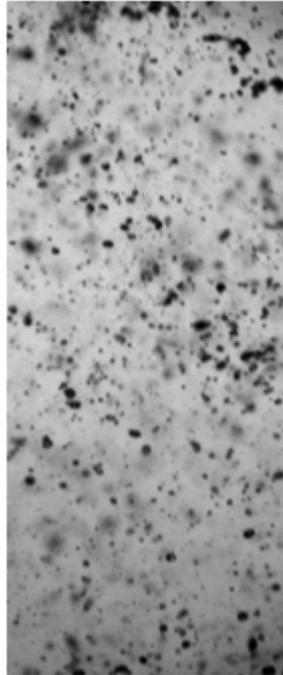


Figure 15 : Image d'un spray en niveaux de gris

L'opération de seuillage permet alors d'isoler une ou plusieurs plages de niveaux de gris qui se réfèrent aux particules d'intérêt. Pour mettre le jet en évidence, l'image doit être séparée en deux régions : les particules et le fond, et plus précisément les particules nettes et le reste. La principale difficulté est la détermination du niveau de seuil, correspondant à la transition entre le fond et les gouttes qui composent le jet. Pour un seuillage binaire, ce niveau N_{seuil} est souvent calculé avec l'aide de l'histogramme de niveau de gris (Yon, 2003).

Deux paramètres de l'histogramme sont identifiés pour déterminer le niveau de seuil. Le niveau N_{max} correspond au niveau de gris le plus répandu dans l'image de référence (l'image de fond clair sans aucun objet dans le champ) et le niveau de gris le plus sombre N_{min} qui représente le niveau de gris des éléments liquides. Le choix de ce seuil influence la taille apparente des objets. Pour les mesures granulométriques, la littérature propose différentes méthodes de calcul du seuil basées sur l'histogramme des niveaux de gris.

Kim (2000) considère que le niveau de seuil est associé au gradient de la population de niveaux de gris du fond clair. Cet auteur utilise, pour un niveau de seuil, 80% du niveau de gris pointé par la tangente présentant la plus grande pente (ligne en pointillés sur la Figure 16).

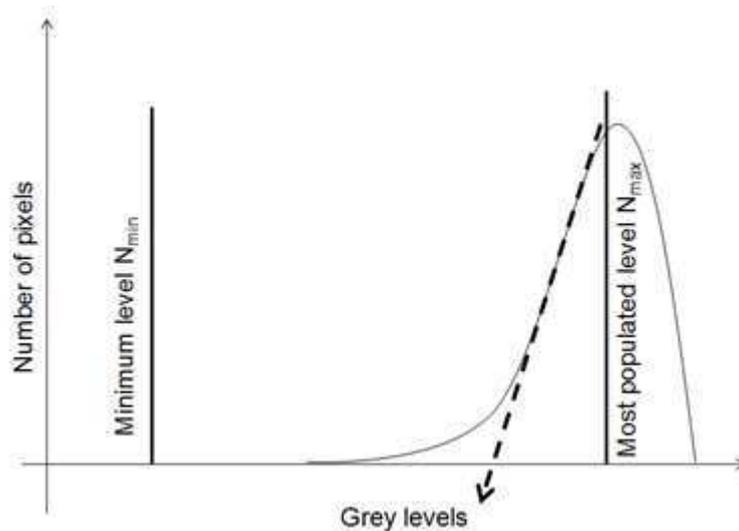


Figure 16 : Histogramme de niveau de gris d'une image

Lee et al. (1991) ont considéré la moitié de la valeur de N_{max} .

D'autres méthodes utilisent des mesures des niveaux N_{max} et N_{min} et considèrent le niveau de seuil comme un pourcentage de l'intervalle $N_{min} - N_{max}$.

$$l = \frac{N_{seuil} - N_{min}}{N_{max} - N_{min}}$$

Équation 19

Différentes valeurs de la variable l sont employées. **Koh et al. (2001)** travaillent avec $l = 0.50$; **Lebrun et al. (1996)** avec une valeur de $l = 0.55$, alors que **Malot et Blaisot (2001)** utilisent la valeur $l = 0.61$ ainsi qu'un modèle d'imagerie permettant de calculer la taille réelle d'une gouttelette, dans le cas du seuillage d'une goutte isolée avec cette méthode.

1.4 Conclusion

L'évaporation de gouttes et de sprays est un phénomène physique largement étudié théoriquement, numériquement et expérimentalement depuis 60 ans dans divers domaines d'applications. Son étude sous des conditions de pressions et de températures élevées vise principalement à améliorer la conception des chambres à combustion des moteurs.

Dans le domaine des risques industriels et dans le cadre de ce travail de recherche, l'étude des cinétiques d'évaporation de produits dispersés se limite à une température ambiante de 300 K et une pression ambiante inférieure à 1 MPa. Ces conditions sont bien inférieures à celles des chambres à combustion. De plus, les produits chimiques liquides stockés à pression atmosphérique dans l'industrie sont différents des produits utilisés dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique ou encore de l'aérospatiale. Les travaux présentés dans ce manuscrit visent donc à compléter la littérature disponible sur l'évaporation de liquides.

Les différents modèles d'évaporation de gouttes présentés montrent que l'évaporation de gouttes dans un environnement convectif est une première étape indispensable à l'étude de sprays. Pour l'étude de l'évaporation de gouttes dans des conditions de pressions inférieures à 1 MPa, l'utilisation de la loi des gaz parfaits est appropriée pour la modélisation de la phase gazeuse. Sous cette condition, il n'est donc pas nécessaire de prendre en compte la solubilité des espèces inertes gazeuses dans la phase liquide. La loi de Raoult peut être utilisée pour supposer l'équilibre thermodynamique liquide-vapeur à l'interface.

Dans la littérature, les diamètres initiaux maximum des gouttes étudiées pour valider les modèles d'évaporation sont de l'ordre du millimètre : l'hypothèse de la goutte sphérique est alors justifiée. Cependant, les gouttes de la pulvérisation issue de la perte de confinement catastrophique peuvent attendre des diamètres de l'ordre du centimètre. La déformation des gouttes doit alors être prise en compte. De plus, l'hypothèse de la température uniforme doit être justifiée. Cependant, dans une telle pulvérisation, les gouttes sont suffisamment éloignées les unes des autres pour négliger les interactions entre les gouttes. Pour extrapoler ce modèle à l'évaporation d'un spray, l'influence de l'entraînement d'air et de la concentration de vapeur au loin de la goutte doit donc être pris en compte et quantifié.

L'étude expérimentale de gouttes et de sprays sous des pressions et des températures élevées se réalise dans une chambre de petit volume, pressurisée avec un gaz inerte et chauffée dans un four électrique. Pour être représentatif des conditions de stockage industriel, le dispositif expérimental doit présenter un volume supérieur. Les produits doivent être pulvérisés avec un injecteur formant des gouttes plus importantes que celles étudiées dans les chambres à combustion.

L'imagerie rapide avec un éclairage en transmission semble être la technique la plus appropriée pour caractériser les gouttes d'un spray car elle permet d'obtenir des informations sur leur morphologie. Ce dernier point est important compte tenu de la déformation attendue. L'utilisation de cette technique nécessite l'équipement du banc d'essai avec des accès optiques et une procédure de calibration.

La granulométrie des sprays varie avec la zone d'intérêt, la pression d'injection et la pression ambiante. Les gouttes sont plus petites à l'extérieur qu'à l'intérieur du spray. Une augmentation de la pression d'injection favorise l'atomisation du spray, tout comme une augmentation de la pression ambiante.

Cette étude bibliographique soulève alors deux questions principales : Dans les conditions opératoires de cette étude, quelle est l'influence de la pression sur la fragmentation du spray ? Quelle est l'influence de la pression sur l'évaporation de gouttes ? En effet, la fragmentation du spray détermine sa granulométrie. Cependant, l'évaporation d'un spray est très sensible aux diamètres des gouttes. Il s'agit alors de quantifier l'influence réciproque de ces deux paramètres.

2 Chapitre 2 : Modèles d'évaporation

2.1 Introduction

Ce chapitre, divisé en trois sections, présente les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays développés au cours de ce travail de recherche et les compare entre eux. La première partie décrit le modèle d'évaporation de gouttes et présente son étude paramétrique. Ce modèle d'évaporation de gouttes, issu de la littérature, est modifié pour tenir compte de la déformation de la goutte et de la pression ambiante. La deuxième partie présente le modèle d'évaporation de spray. Il est également issu de la littérature et a été modifié pour tenir compte de la pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa. Cette deuxième partie propose une étude paramétrique du modèle d'évaporation de spray modifié et permet de mettre en évidence les différences avec le modèle d'évaporation de gouttes, notamment l'influence de l'entraînement d'air et l'influence de la concentration en vapeur loin de la goutte. La dernière section compare les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays modifiés, en mettant l'accent sur l'influence de l'entraînement d'air et l'influence de la concentration de vapeur loin de la goutte et propose une méthodologie permettant de déterminer le cas où le modèle d'évaporation de gouttes modifié peut être suffisant pour modéliser l'évaporation d'un spray. L'objectif de ce travail étant *in fine* de pouvoir utiliser un modèle d'évaporation de gouttes pour étudier l'évaporation d'une pulvérisation de produits chimiques liquides. Cette dernière section présente un travail innovant, car non disponible dans la littérature.

2.2 Modèle d'évaporation de gouttes

L'étude bibliographique a recensé différents modèles d'évaporation de gouttes selon l'environnement dans lequel elles évoluent (stagnant / convectif) et les conditions thermodynamiques de cet environnement (pression / température). Rappelons que l'objectif est de développer un modèle d'évaporation de gouttes en chute libre dans une atmosphère close, à température ambiante et pressurisée entre 100 et 600 KPa en pression absolue.

2.2.1 Description du modèle

Le modèle d'évaporation proposé est basé sur celui de Guella *et al.* (2008). Ce modèle issu de la littérature a été choisi car il s'agit du modèle d'évaporation de gouttes, inférieures au millimètre, en chute libre dans un milieu à pression atmosphérique le plus récent, à notre connaissance. Dans ce travail de recherche, nous avons extrapolé le modèle de Guella *et al.* (2008) à des pressions ambiantes comprises entre 100 KPa et 600 KPa et à des gouttes de diamètre compris entre 0.5 et 6.5 mm. Il se décompose en deux parties :

- La dynamique des gouttes
- Les mécanismes d'échange de chaleur et les bilans thermiques.

Hypothèses du modèle

Le modèle de Guella *et al.* (2008) a été développé à pression atmosphérique et à température ambiante (18 – 20°C) pour des gouttes d'eau, de 2-éthyl-1-hexanol, d'éthanol et d'acétone ayant un diamètre inférieur à 650 µm. Ce modèle tient compte des hypothèses suivantes :

- La goutte isolée est considérée en chute libre dans l'air ambiant pressurisé et en évaporation,
- La goutte est considéré sphérique,
- Les interactions entre les particules, dans le cas d'un train de gouttes, ne sont pas prises en compte,
- La température de la goutte est supposée uniforme au cours de sa chute,
- La pression de la phase gazeuse est supposée uniforme,
- Il n'y a pas de réaction chimique entre les différentes espèces du liquide,
- L'interface liquide-gaz est supposée être à l'équilibre thermodynamique,
- Les transferts radiatifs entre la goutte et son environnement sont négligés.

Discussion autour de l'hypothèse de la température uniforme

L'hypothèse de la température uniforme est justifiée si le critère de Biot est satisfait. Le nombre de Biot (De Vriendt, 1982 ; Incropera et Dewitt, 1981 ; Kakaç *et al.*, 1987 ; Sacadura, 1985) représente le rapport entre le taux de convection et la conduction interne ou encore le rapport entre la résistance au transfert de chaleur de la phase liquide et celle de la phase gazeuse et est défini par :

$$Bi = \frac{hd}{\lambda_l}$$

Équation 20

Où h est le coefficient de transfert de chaleur en phase gazeuse, d le diamètre des gouttes et λ_l la conductivité thermique de la phase liquide.

Le critère de Biot indique que lorsque $Bi < 0.1$, la résistance de la phase liquide peut être négligée devant celle de la phase gazeuse.

Dans le cas d'une goutte, d'eau ou d'acétone, ayant un diamètre compris entre 0.5 mm et 6.5 mm, le nombre de Biot vaut, après 1 m de chute (hauteur d'étude fixée dans le cadre de ce travail de recherche) :

- 0.05 pour une goutte d'eau de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique,
- 0.07 pour une goutte d'eau de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 500 KPa,
- 0.15 pour une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique,
- 0.21 pour une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 500 KPa.
- 0.18 pour une goutte d'eau de 6.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique,
- 0.38 pour une goutte d'eau de 6.5 mm dans un environnement pressurisé à 500 KPa,
- 0.60 pour une goutte d'acétone de 6.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique,
- 1.31 pour une goutte d'acétone de 6.5 mm dans un environnement pressurisé à 500 KPa.

Ces calculs montrent que le critère de Biot est rempli pour des gouttes d'eau de 0.5 mm quelque soit la pression ambiante étudiée. En revanche, il n'est pas satisfait pour des gouttes d'eau de 6.5 mm quelque soit la pression ambiante étudiée et pour des gouttes d'acétone quelque soit leur taille et la pression ambiante étudiée, ce qui signifie que la résistance de la phase liquide au transfert de chaleur n'est pas négligeable devant la résistance de la phase gazeuse.

Par ailleurs, il faut noter que le critère de Biot s'applique à un liquide stagnant. Dans le cas de gouttes en chute libre, les forces aérodynamiques et le frottement de l'air provoquent de la convection à l'intérieur de la goutte, ce qui uniformise la température du liquide et diminue le nombre de Biot effectif. De plus, plus le diamètre des gouttes est important, plus le développement de la circulation interne est favorisé et la température uniformisée à l'intérieur de la goutte. **Cette dernière remarque peut justifier l'hypothèse de température uniforme, même dans le cas d'une goutte de 6.5 mm.**

Etude de la dynamique d'une goutte en chute libre

Pour étudier la dynamique d'une goutte en chute libre, Guella *et al.* (2008) partent du bilan des forces s'appliquant sur elle. Ainsi, une goutte de diamètre r est soumise à la force de pesanteur, à la poussée d'Archimède et à la force de traînée, comme le montre la Figure 17 :

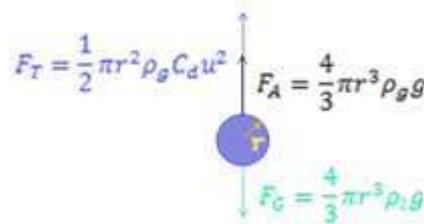


Figure 17 : Bilan des forces sur une goutte en chute libre

Où r est le rayon de la goutte, ρ_l la masse volumique du liquide, g l'accélération de la pesanteur, ρ_g la masse volumique du gaz, C_d le coefficient de traînée et u la vitesse de la goutte.

Le principe fondamental de la dynamique appliqué à cette goutte donne le bilan des forces suivant :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l \frac{du}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_g g - \frac{1}{2}\pi r^2 \rho_g C_d u^2$$

Équation 21

Détermination de la masse volumique du gaz

La masse volumique du gaz intervient dans le bilan des forces appliquées à la goutte. Dans le cadre de ce travail de recherche, la goutte évolue dans un milieu pressurisé inférieur à 1 MPa. Le *Chapitre 1 : Etude bibliographique*, a mis en évidence qu'il peut être justifié de déterminer la masse volumique du gaz grâce à la loi des gaz parfaits (Équation 22) dans ces conditions de pression :

$$P_g V = nRT_g$$

$$\rho_g = \frac{P_g M}{RT_\infty}$$

Équation 22

Où P_g est la pression du gaz, V le volume occupé par le gaz, ρ_g la masse volumique de la phase gaz et n la quantité de matière, R la constante universelle des gaz parfaits et M la masse molaire du gaz.

L'Équation 21 devient alors :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l \frac{du}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l g - \frac{4}{3}\pi r^3 \frac{P_g M}{RT_g} g - \frac{1}{2}\pi r^2 \frac{P_g M}{RT_g} C_d u^2$$

Équation 23

La vitesse instantanée de chute de la goutte est obtenue en intégrant le bilan des forces appliquées à la goutte (Équation 24).

$$\frac{du}{dt} = g \left(1 - \frac{P_g M}{RT_g \rho_l} \right) - \frac{3}{8} \frac{P_g M}{\rho_l RT_g} \frac{C_d}{r} u^2$$

Équation 24

Détermination du coefficient de traînée de la goutte

La Figure 17 et l'Équation 21 montrent que la force de traînée de la goutte fait intervenir le coefficient de traînée. Le *Chapitre 1 : Etude bibliographique* a mis en évidence plusieurs corrélations possibles pour le coefficient de traînée.

Rappelons que Taylor (1949) a proposé un nombre de Weber critique de 12 à partir duquel une goutte n'est plus stable (*1.2.2 Evaporation d'une goutte unique*). Cependant, plus le nombre de Weber de cette goutte s'approche de cette valeur critique, plus la goutte est susceptible de se déformer. Le Tableau 3 indique les valeurs du nombre de Weber des gouttes considérées dans le cadre de ce travail de recherche pour deux pressions extrêmes (100 kPa et 600 kPa).

Diamètre des gouttes (mm)	Pression ambiante (kPa)	Eau	Acétone	Ethanol
0.5	100	0.02	0.05	0.06
	600	0.03	0.06	0.08
6.5 mm	100	1.87	5.16	5.8
	600	6.08	10.34	10.95

Tableau 3 : Nombre de Weber obtenu après 1 m de chute dans le cadre de ce travail de recherche

Pour calculer le nombre de Weber, la masse volumique du gaz est déterminée à partir de la loi des gaz parfaits et la vitesse des gouttes est estimée à partir du modèle d'évaporation de gouttes. Le Tableau 3 montre que le nombre de Weber reste inférieur à 12 pour tous les cas rencontrés dans le cadre de ce travail, mais se rapproche de cette valeur pour les gouttes de 6.5 mm et surtout pour une pression ambiante de 600 KPa. Le coefficient de traînée est alors modélisé par la corrélation de Loth (2008) car elle tient compte de la déformation des gouttes en introduisant le nombre de Weber.

Bilan thermique / énergétique de la goutte

La deuxième partie de ce modèle détaille le bilan thermique appliqué à la goutte. Ce bilan, issu de Guella *et al.* (2008), est modifié pour tenir compte de la pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa. Le flux de chaleur convectif provenant de l'écoulement gazeux arrive à la surface de la goutte par convection. Il permet d'une part le transfert de chaleur entre le milieu ambiant et la goutte et, d'autre part, il sert au processus d'évaporation. Il se produit alors un dégagement de vapeur qui s'éloigne de la goutte par diffusion et convection, comme le montre la Figure 18. Au cours de l'évaporation, la goutte perd de la masse et se refroidit par chaleur latente.

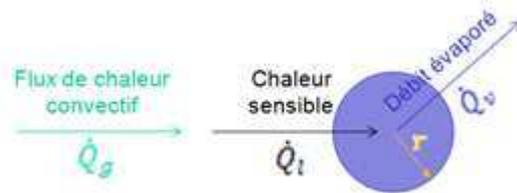


Figure 18 : Bilan thermique d'une goutte soumise à un flux de chaleur convectif

Le bilan thermique s'exprime de la façon suivante :

$$\dot{Q}_g = \dot{Q}_l + \dot{Q}_v$$

Équation 25

Où \dot{Q}_l représente la variation temporelle de la chaleur sensible de la goutte et \dot{Q}_v le flux de chaleur dû à l'évaporation.

La variation temporelle de la chaleur sensible de la goutte est donnée par le taux de variation de l'énergie interne :

$$\dot{Q}_l = V_l \rho_l C_{pl} \frac{dT_l}{dt}$$

Équation 26

Où V_l représente le volume de la goutte, T_l est la température moyenne de la goutte et C_{pl} est la capacité calorifique du liquide.

Le flux de chaleur dû à l'évaporation :

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_l L_v$$

Équation 27

Où L_v est l'enthalpie de vaporisation de liquide et \dot{m}_l est le débit massique de liquide vaporisé à chaque instant. Ochs (1990), Crowe et *al.* (1998), Cheremisinoff (1986) proposent la corrélation suivante pour déterminer le débit massique liquide:

$$\dot{m} = S_l \frac{Sh_g D_g}{d} \rho_g (Y_{v,s} - Y_{v,\infty})$$

Équation 28

Où S_l est la surface de la goutte, Sh_g est le nombre de Sherwood de la phase gaz, D_g le coefficient de diffusion de la vapeur dans la phase gaz, $Y_{v,s}$ la fraction massique de vapeur à la surface de la goutte et $Y_{v,\infty}$ la fraction massique de vapeur loin de la surface de la goutte.

Sh_g est le nombre de Sherwood dans la phase gazeuse. Le nombre de Sherwood est un nombre sans dimension qui représente le rapport entre le transfert total de masse et le transfert par diffusion. Il est défini par l'Équation 29 :

$$Sh_g = \frac{K_c L_c}{D_g}$$

Équation 29

Où K_c représente le coefficient de transfert de masse, L_c une longueur caractéristique, comme le diamètre de la goutte et D_g le coefficient de diffusion.

Le nombre de Sherwood est calculé à partir de l'expression proposée par Beard et Pruppacher (1971) et Pruppacher et Rasmussen (1979) pour des diamètres de gouttes compris entre 20 et 2500 μm .

$$Sh_g = 1.61 + 0.718 Re^{0.5} Sc_g^{0.33}$$

Équation 30

Où Re et Sc_g sont les nombres de Reynolds et de Schmidt calculés pour la phase gazeuse. Le nombre de Schmidt est donné par la relation suivante :

$$Sc_g = \frac{\nu_g}{D_g}$$

Équation 31

Où ν_g est la viscosité cinématique de l'air.

Pour tenir compte de l'influence de la pression ambiante dans le modèle d'évaporation de gouttes développé au cours de ce travail de thèse, la corrélation choisie pour le coefficient de diffusion de la vapeur de carburant dans l'air est une fonction de la pression et de la température proposée par Fuller et *al.* (1966) :

$$D_g = \frac{10^{-7} T_g^{1.75} \left(\frac{1}{M_l} + \frac{1}{M_g} \right)^{1/2}}{\frac{P}{P_0} \left[(\sum V_l)^{1/3} + (\sum V_g)^{1/3} \right]^2}$$

Équation 32

Où $\sum V_i$ est la somme des volumes de diffusion pour le composant i (Tableau 4).

Elément	Volume de diffusion atomique spécial correspondant ($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)
C	16.5
H	1.98
O	5.48
Air	20.1

Tableau 4 : Volumes de diffusion atomiques spéciaux

Pour calculer la pression de vapeur saturante $P_{sat}(T_l)$, on considère qu'il y a en permanence l'équilibre liquide/vapeur à l'interface. P_{sat} représente alors la pression partielle de vapeur au voisinage de la goutte.

La fraction molaire de la vapeur à la surface de la goutte est donnée par la loi de Raoult :

$$y_l^v = \frac{P_{sat}(T_l)}{P_g}$$

Équation 33

Où $P_{sat}(T_l)$ correspond à la pression de vapeur saturante calculée pour la température de liquide. Par conséquent, la fraction massique de la vapeur à la surface de la goutte est :

$$Y_{v,s} = y_l^v \frac{M_l}{M_t}$$

Équation 34

Avec

$$M_t = y_l^v M_l + (1 - y_l^v) M_g$$

Équation 35

Pour une pression ambiante P_g la fraction massique de vapeur est alors :

$$Y_{v,s} = \frac{P_{sat}}{P_{sat} + (P_g - P_{sat}) \frac{M_g}{M_l}}$$

Équation 36

Le flux de chaleur par convection entre l'air et la surface de la goutte peut être exprimé par :

$$\dot{Q}_g = S_l \frac{Nu_g \lambda_g}{d} (T_\infty - T_l)$$

Équation 37

Où Nu_g représente le nombre de Nusselt de la phase gazeuse et λ_g la conductivité thermique de la phase gazeuse.

Par analogie avec le transfert de matière, l'Équation 30 nous conduit à déterminer le nombre de Nusselt de la phase gazeuse :

$$Nu_g = 1.61 + 0.718 Re^{0.5} Pr_g^{0.33}$$

Équation 38

Où Pr_g est le nombre de Prandtl de la phase gazeuse. Le gaz étudié étant de l'air, ce nombre vaut 0.708.

Par conséquent le bilan thermique se traduit par :

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_g - \dot{m}L_v$$

Équation 39

Le bilan énergétique de la goutte est alors donné par la corrélation suivante :

$$V_l \rho_l C_{pl} \frac{dT_l}{dt} = S_l \frac{Nu_g \lambda_g}{d} (T_\infty - T_l) - \dot{m}L_v$$

Équation 40

Ce bilan permet alors de déterminer la température instantanée de la goutte.

Dans le cas d'un corps pur, les propriétés physico-chimiques de la phase liquide : sa viscosité, sa pression de vapeur saturante, sa capacité calorifique et son enthalpie de vaporisation, en fonction de la température sont déterminées grâce au logiciel Component Plus développé par la société ProSim. Les valeurs de ces différentes propriétés physico-chimiques pour chaque liquide étudié, à savoir l'eau, l'éthanol et l'acétone, à 20°C sont rappelées dans le Tableau 5.

Liquide	Eau	Ethanol	Acétone
Viscosité (Pa.s)	1.02×10^{-3}	1.19×10^{-3}	3.22×10^{-4}
Pression de vapeur saturante (Pa)	2.34×10^3	5.90×10^3	2.47×10^4
Capacité calorifique (J/(kg.K))	4.193×10^3	2.40×10^3	2.16×10^3
Enthalpie de vaporisation (J/Kg)	2.45×10^6	1.01×10^6	5.91×10^5

Tableau 5 : Valeurs des propriétés physico-chimiques des produits étudiés à 20°C

Pour conclure sur la description du modèle d'évaporation de gouttes développé au cours de cette thèse, la Figure 19 permet de bien visualiser les modifications qui y ont été apportées par rapport au modèle de Guella et al. (2008).



Figure 19 : Schéma de fonctionnement du modèle d'évaporation développé au cours de ce travail de recherche

Cette figure montre que le modèle développé au cours de ce travail de recherche est proposé pour une goutte millimétrique en chute libre dans une atmosphère dont la pression ambiante est comprise entre 100 et 600 KPa. Le diamètre des gouttes est une donnée d'entrée principale du modèle. Le volume de la goutte est déterminé à partir de ce diamètre en considérant la goutte sphérique. Ensuite, le modèle détermine la dynamique des gouttes à l'aide des équations résultant du bilan des forces appliquées sur la goutte. Les modifications apportées au modèle dynamique de Guella *et al.* (2008) sont, d'une part, l'implémentation de la loi des gaz parfaites pour tenir compte de la pression ambiante entre 100 et 600 KPa, et d'autre part, la modification de la corrélation du coefficient de traînée par la corrélation proposée par Loth (2008) pour tenir compte de la déformation des gouttes. Cette partie dynamique du modèle permet de déterminer la vitesse instantanée de chute de la goutte. Ensuite, le modèle proposé comporte également une partie permettant de déterminer l'évaporation de la goutte. La modification apportée au modèle de Guella *et al.* (2008) au cours de ce travail de thèse est la prise en compte de la pression ambiante comprise entre 100 et 600 KPa au travers du coefficient de diffusion. Cette partie du modèle sur l'évaporation de goutte permet de déterminer la température instantanée de la goutte. Cette température permet de calculer le débit massique d'évaporation, de remonter au calcul du volume et du diamètre et de procéder ainsi de suite de façon itérative.

2.2.2 Résolution numérique

L'intégration de l'Équation 24 donne la vitesse instantanée de la goutte au cours de sa chute. Le débit massique évaporé est calculé à l'aide de l'Équation 28, le nombre de Sherwood est calculé à partir de l'Équation 30 et les fractions massiques de vapeurs de liquide sont calculées par l'Équation 36. Par la suite, on détermine le nouveau diamètre de la goutte. L'intégration de l'Équation 40 donne alors la température de la goutte à l'instant t .

Les équations différentielles permettant de déterminer la vitesse et la température instantanées de la goutte sont discrétisées pour pouvoir être codées sous MATLAB. La formule de discrétisation utilisée est :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y_1 - y_0}{\Delta t}$$

Équation 41

Avec y la variable à discrétiser, t le temps, $\Delta t = t_1 - t_0$ l'intervalle de temps entre les instants t_0 et t_1 , y_0 la valeur de la variable à discrétiser à l'instant t_0 et y_1 la valeur de la variable à discrétiser à l'instant t_1 .

Ainsi, on a :

$$\frac{du}{dt} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta t}$$

Équation 42

Avec la condition initiale $u_0 = 0$ à $t = 0$.

La vitesse u_1 à l'instant t_1 est exprimée en fonction de la hauteur par :

$$u_1 = \frac{h_1 - h_0}{\Delta t}$$

Équation 43

Avec $h_0 = 0$ à $t=0$.

La Figure 20 présente l'organigramme de calcul développé.

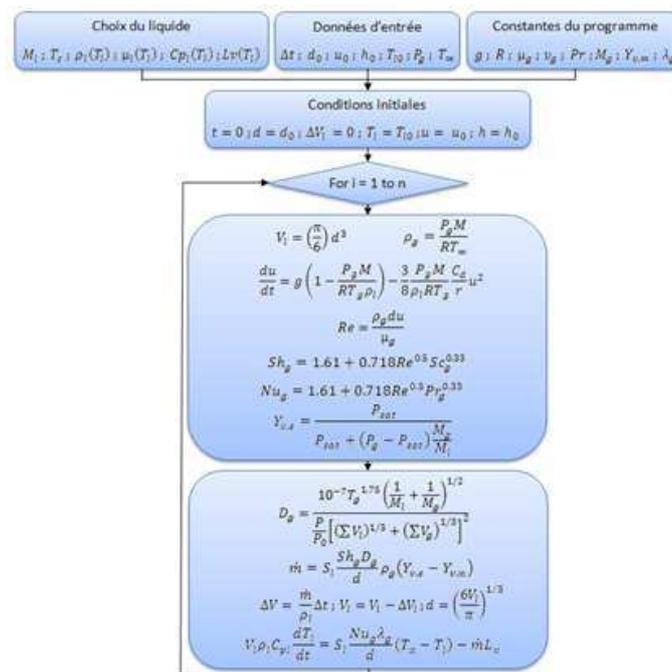


Figure 20 : Organigramme de calcul du modèle d'évaporation proposé

2.2.3 Validation du modèle

Les variables retenues pour valider le modèle d'évaporation de gouttes sont le diamètre des gouttes, leur vitesse et leur débit massique d'évaporation. La validation de ce modèle nécessite une comparaison avec les mesures réalisées sur le dispositif expérimental entre deux points situés à 1m d'écart.

Etude paramétrique

L'objet de ce paragraphe est d'estimer la sensibilité du modèle d'évaporation aux variations des paramètres d'entrée. Ces paramètres d'entrée sont la pression de la phase gazeuse, les propriétés physico-chimiques du liquide, le diamètre initial de la goutte, la température de la phase gazeuse et la concentration en vapeur loin de la goutte. L'influence de chacun de ces paramètres est montrée sur l'évolution du diamètre de la goutte, sa vitesse et son débit d'évaporation : caractéristiques principales de son évaporation. Les diamètres des gouttes choisis pour cette étude paramétrique sont représentatifs des diamètres mesurés expérimentalement (entre 0.5 et 6.5 mm).

Influence de la pression de la phase gazeuse

La Figure 21 représente l'influence de la pression de la phase gazeuse (100, 300 et 600 KPa) sur le diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial pour une température ambiante de 20°C. Ce diamètre a été choisi car il est représentatif des diamètres de gouttes mesurés expérimentalement. Les résultats présentés sur cette figure sont issus du modèle d'évaporation de gouttes développé au cours de ce travail de recherche.

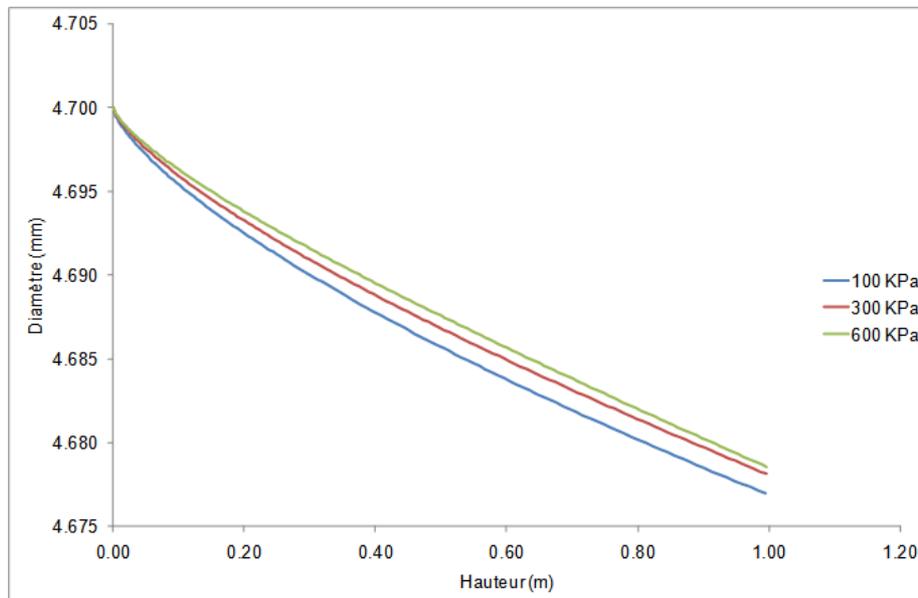


Figure 21 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute

La Figure 21 montre plusieurs tendances : le diamètre de la goutte diminue avec la hauteur de chute et l'augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du diamètre de la goutte. En effet, une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial qui chute de 1 m à pression atmosphérique, va voir son diamètre diminuer de 23 μm . Cette diminution atteint 21 μm dans un environnement pressurisé à 600 KPa. Ce résultat est dû au coefficient de diffusion qui est inversement proportionnel à la pression ambiante. En effet, une augmentation de pression entraîne une diminution du coefficient de diffusion, donc une diminution du débit massique d'évaporation et par conséquent une diminution du diamètre de la goutte moins marquée.

L'influence de la pression ambiante sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm est différente et est représentée sur la Figure 22.

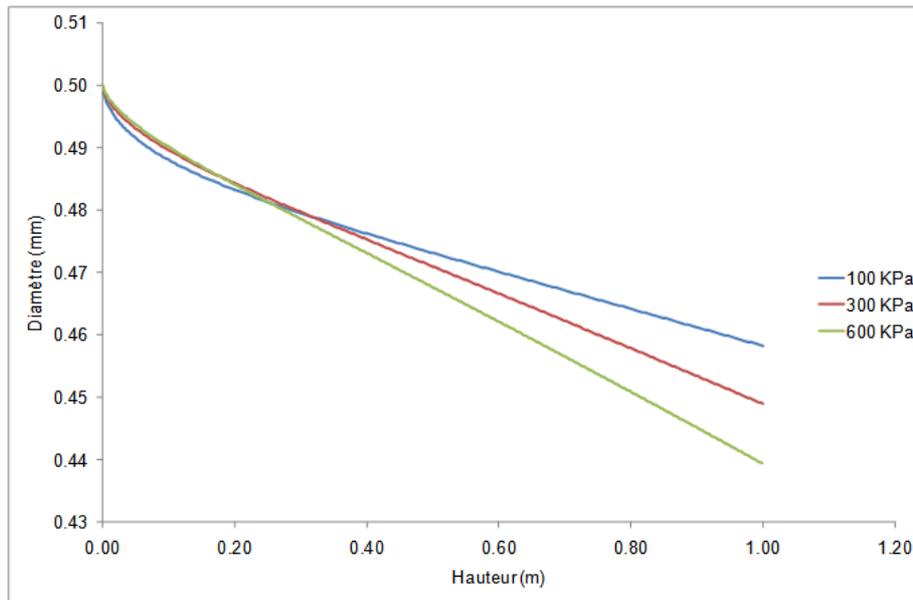


Figure 22 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial

La Figure 22 montre que sur les 20 premiers cm plus la pression de la phase gazeuse est élevée, moins le diamètre de la goutte diminue rapidement et donc moins la goutte s'évapore. Entre 0 et 20 cm, l'évaporation de la goutte est alors régie par le coefficient de diffusion. A partir de 20 cm, cette tendance s'inverse. En effet, une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution de la vitesse de la goutte, le temps de chute étant plus important, la goutte s'évapore plus. Entre 20 cm et 1 m, l'effet du ralentissement de la goutte est mis en évidence : l'augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du diamètre de la goutte d'acétone plus importante. Selon cette figure, les prédictions du modèle indiquent que le diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre diminue de 55 μm maximum après 1 m de chute. Le dispositif expérimental devra alors permettre de visualiser cette variation sur le diamètre de la goutte.

La Figure 23 représente l'influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial et d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial en fonction de leur hauteur de chute.

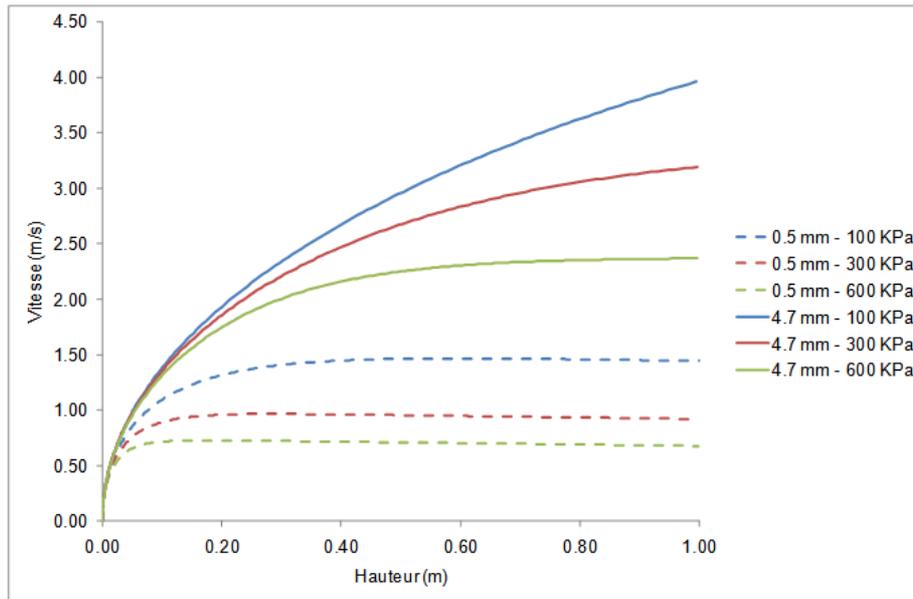


Figure 23 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial et d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial

Cette figure montre que la goutte de 4.7 mm de diamètre initial n'a pas atteint sa vitesse terminale après 1 m, alors qu'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre atteint sa vitesse terminale entre 20 et 45 cm selon la pression ambiante considérée. De plus, la goutte de 0.5 mm chute moins vite que la goutte de 4.7 mm. Cette figure montre également qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution de la vitesse de la goutte, et ce pour les deux diamètres de gouttes présentés. Plus la pression de la phase gazeuse augmente, plus la vitesse tend rapidement vers une vitesse terminale. En effet, une augmentation de la pression ambiante se traduit par une augmentation de la masse volumique de la phase gazeuse. La force de traînée devient alors plus importante et freine la goutte dans sa chute. Ces résultats sont aussi observés dans le cas d'une goutte d'acétone de 0.5 mm.

La Figure 24 représente l'influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial. Elle montre que, pour des pressions ambiantes de 300 KPa et 600 KPa, le débit massique d'évaporation augmente jusqu'à atteindre un maximum (à 0.75 cm pour 300 KPa et à 0.45 cm pour 600 KPa) puis diminue. Par ailleurs, pour une pression ambiante de 100 KPa, le débit massique d'évaporation augmente continuellement. Le débit varie essentiellement en fonction de la surface d'échange de la goutte, du nombre de Sherwood de la phase gazeuse, du diamètre et de la fraction massique de vapeur à la surface de la goutte. La surface d'échange et le diamètre de la goutte varient de la même façon : ils diminuent avec la hauteur de chute. Le nombre de Sherwood augmente continuellement avec la hauteur de chute car il est fonction du nombre de Reynolds. Quant à la fraction massique de vapeur, elle diminue continuellement avec la hauteur de chute car la pression de vapeur saturante diminue avec la température de la goutte.

Ainsi, à partir d'une certaine hauteur, la fraction massique de vapeur est suffisamment faible pour compenser les mécanismes physiques représentés par le nombre de Sherwood de la phase gaz ce qui entraîne une diminution du débit massique d'évaporation.

Cette figure montre également qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du débit massique d'évaporation. En effet, une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du coefficient de diffusion, et par conséquent une diminution du débit massique d'évaporation.

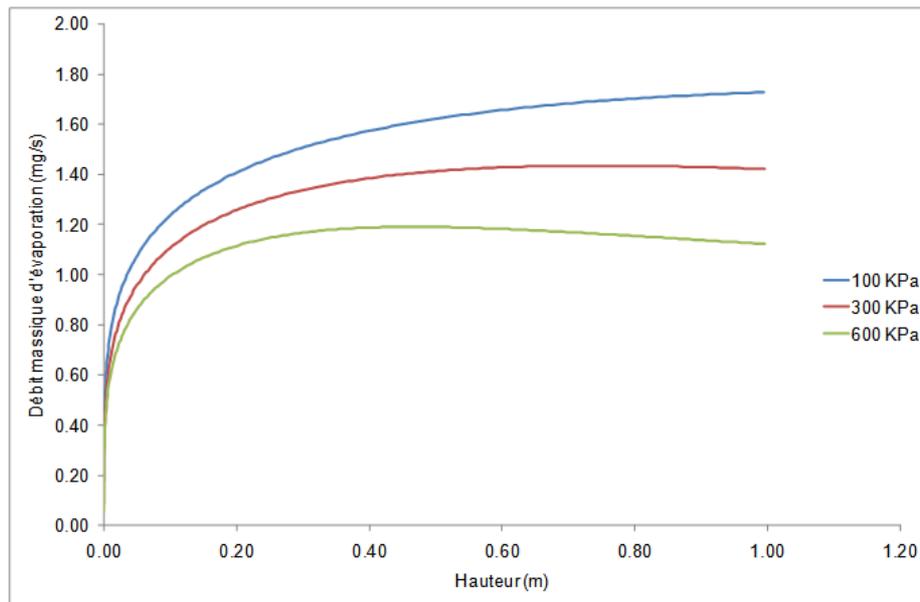


Figure 24 : Influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial

L'analyse précédente montre que **plus la pression ambiante est faible, plus l'évaporation est favorisée dans le cas de gouttes d'acétone de 0.5 à 6.5 mm de diamètre. Ce phénomène a également été remarqué pour des gouttes d'eau et d'éthanol de 0.5 à 6.5 mm de diamètre.** Dans le cas des plus petites gouttes, leur vitesse de chute libre diminue et les gouttes disposent alors de plus de temps pour s'évaporer.

Influence du liquide

L'influence du liquide, et surtout l'influence de la pression de vapeur saturante, sur l'évaporation est plus significative pour une goutte de 0.5 mm de diamètre dans un environnement à pression atmosphérique et à une température ambiante de 20°C (Figure 25). Cette figure montre qu'une goutte d'acétone s'évapore plus rapidement qu'une goutte d'éthanol ou encore qu'une goutte d'eau à pression atmosphérique. A travers l'influence du liquide, c'est surtout l'influence de la pression de vapeur saturante qui est importante pour l'évaporation. Le Tableau 5 indique que la pression de vapeur saturante de l'eau (2.3 KPa) est inférieure à celle de l'éthanol (5.9 KPa), qui est elle-même encore inférieure à celle de l'acétone (24.7 KPa). La pression de vapeur saturante intervient dans la fraction massique de vapeur à la surface de la goutte, puis dans le calcul du débit massique évaporé

et enfin dans le calcul du diamètre de la goutte. Par conséquent, plus la pression de vapeur saturante est élevée, plus le débit massique augmente et plus le diamètre de la goutte diminue.

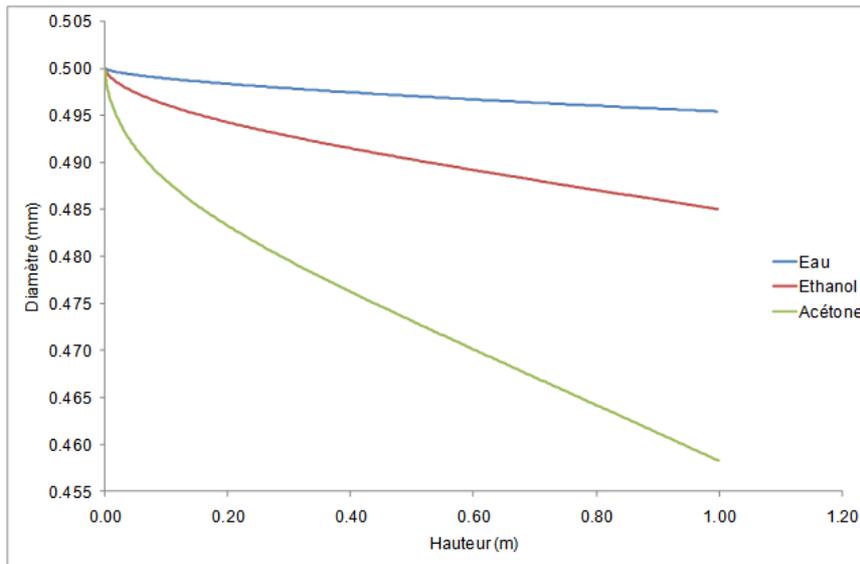


Figure 25 : Influence du liquide sur l'évolution du diamètre d'une goutte de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique.

La Figure 26 représente l'évolution de la vitesse d'une goutte de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique et à une température ambiante de 20°C.

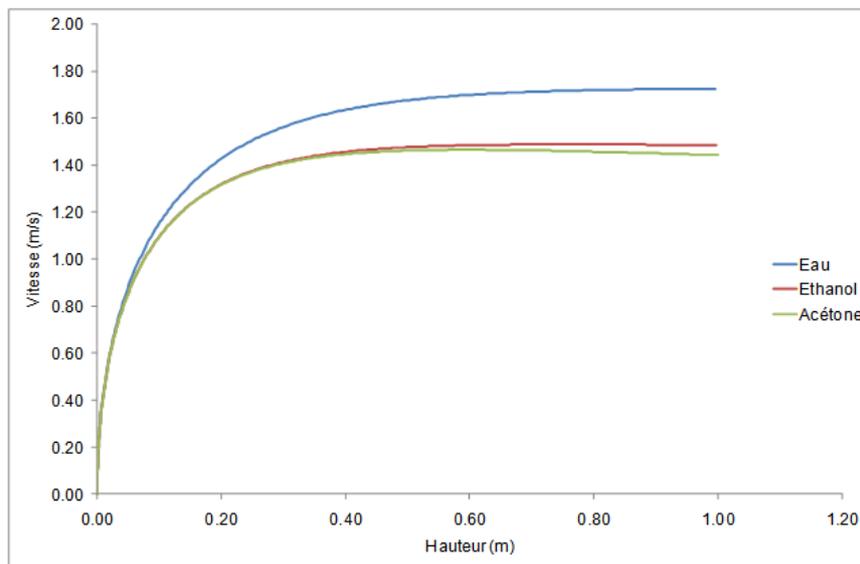


Figure 26 : Influence du liquide sur l'évolution de la vitesse d'une goutte de 0.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 26 montre que l'évolution de la vitesse des trois produits présente des différences. L'acétone et l'éthanol atteignent une vitesse maximale de chute après 50 cm de chute environ pour l'acétone et 75 cm pour l'éthanol, alors que l'eau atteint ce plateau après 1 m. La vitesse d'une goutte d'eau de 500 μm dans un environnement à pression atmosphérique est plus rapide que celle d'une goutte d'éthanol et d'une goutte d'acétone. Le diamètre de la goutte d'eau diminue moins

rapidement que celui d'une goutte d'acétone, par conséquent une goutte d'eau aura une plus grande inertie et donc une plus grande vitesse, ce qui rejoint l'évolution du diamètre (Figure 25).

On observe sur cette figure qu'une augmentation de la pression de vapeur saturante entraîne une diminution de la vitesse de chute de la goutte. La pression de vapeur saturante influence la vitesse de chute à travers le débit et indirectement à travers le volume et le diamètre de la goutte.

La Figure 27 représente l'influence de la nature du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte de 0.5 mm de diamètre dans un environnement à pression atmosphérique.

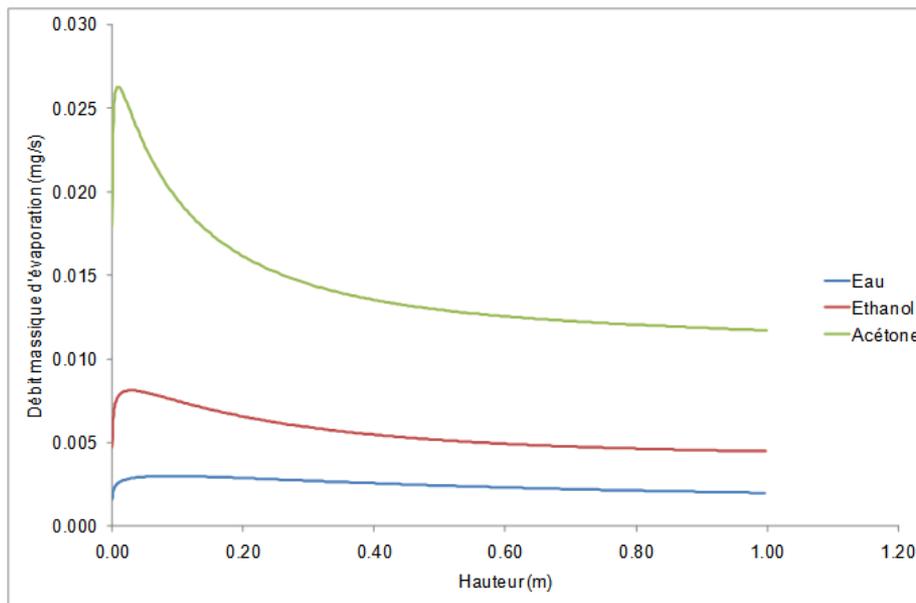


Figure 27 : Influence du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte de 0.5 mm de diamètre dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 27 montre que, pour les trois liquides testés, le débit massique d'évaporation augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis décroît. Cette augmentation est liée à l'augmentation du nombre de Sherwood au début de la chute de la goutte. Quand à la diminution, elle est associée à la diminution de la concentration en vapeur à la surface de la goutte liée à la pression de vapeur saturante. Cependant, le débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone est plus élevé que celui d'une goutte d'éthanol ou encore que celui d'une goutte d'eau, car la pression de vapeur saturante de l'acétone est supérieure à celle de l'éthanol et à celle de l'eau. Par conséquent, le débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone est supérieur à celui d'une goutte d'éthanol ou encore celui d'une goutte d'eau. Par ailleurs, le débit d'évaporation semble atteindre une constante après 1m de chute.

Influence du diamètre initial de la goutte

L'influence du diamètre initial de la goutte est plus important pour une goutte d'acétone s'évaporant dans un environnement à pression atmosphérique, car le coefficient de diffusion massique est le plus élevé à cette pression. La Figure 28 représente l'influence du diamètre initial de la goutte sur l'évolution du diamètre adimensionné par le diamètre initial dans le cas d'une goutte d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique. Elle montre que plus le diamètre initial de la goutte est petit, plus la goutte s'évapore rapidement. Le débit massique d'évaporation varie inversement proportionnellement au diamètre de la goutte. Une petite goutte a alors, proportionnellement, un plus grand débit massique d'évaporation et s'évapore plus rapidement qu'une grosse goutte.

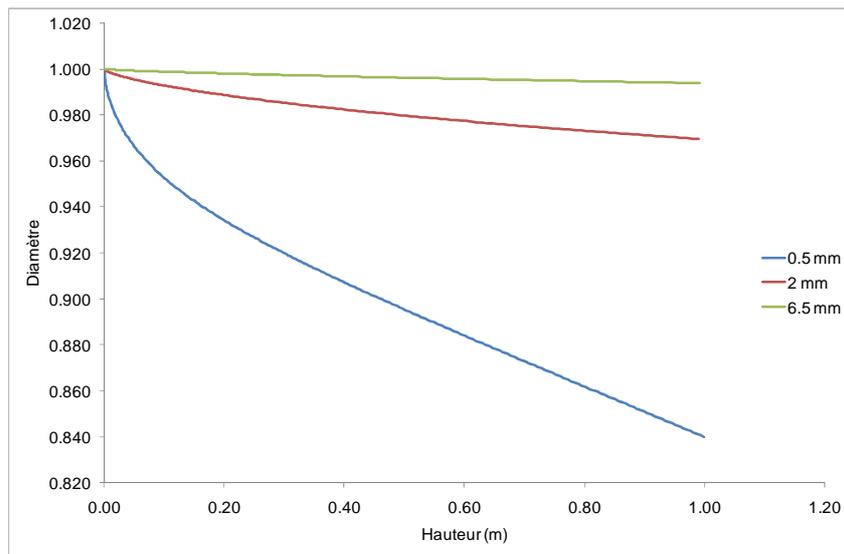


Figure 28 : Influence du diamètre initial de la goutte sur l'évolution du diamètre adimensionné dans le cas d'une goutte d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique.

La Figure 29 représente l'influence du diamètre initial de la goutte sur sa vitesse dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique.

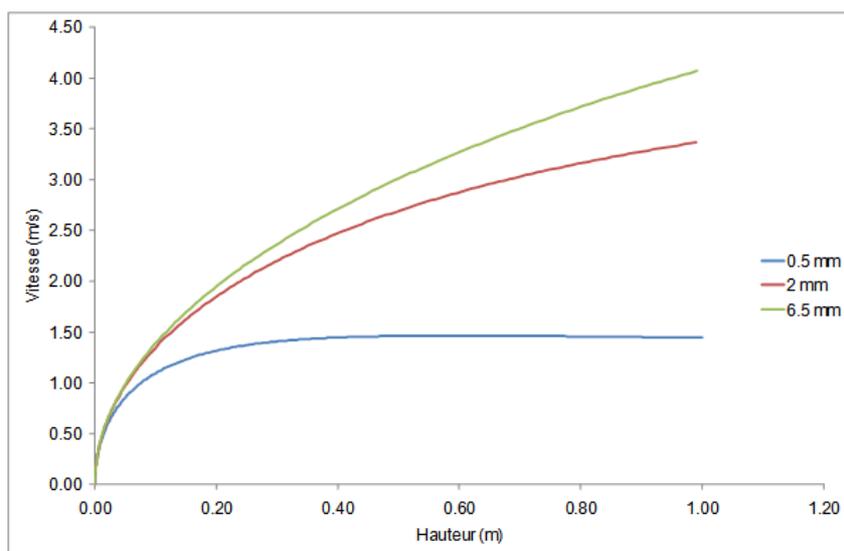


Figure 29 : Influence du diamètre initial de la goutte sur sa vitesse dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique

La Figure 29 montre qu'une plus grosse goutte chute avec une vitesse plus importante que celle d'une petite goutte, à cause de la force de pesanteur et de la traînée, même dans le cas d'une goutte d'acétone en évaporation. Toutefois, pour une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial, la vitesse augmente puis diminue à cause de l'évaporation : la goutte a atteint sa vitesse maximale vers 60 cm de chute et a commencé sa décélération due à son évaporation. Quand aux gouttes de diamètre supérieur à 0.5 mm (2 mm et 6.5 mm), elles n'atteignent pas de vitesse maximale.

La Figure 30 représente l'influence du diamètre initial de la goutte sur son débit d'évaporation dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique.

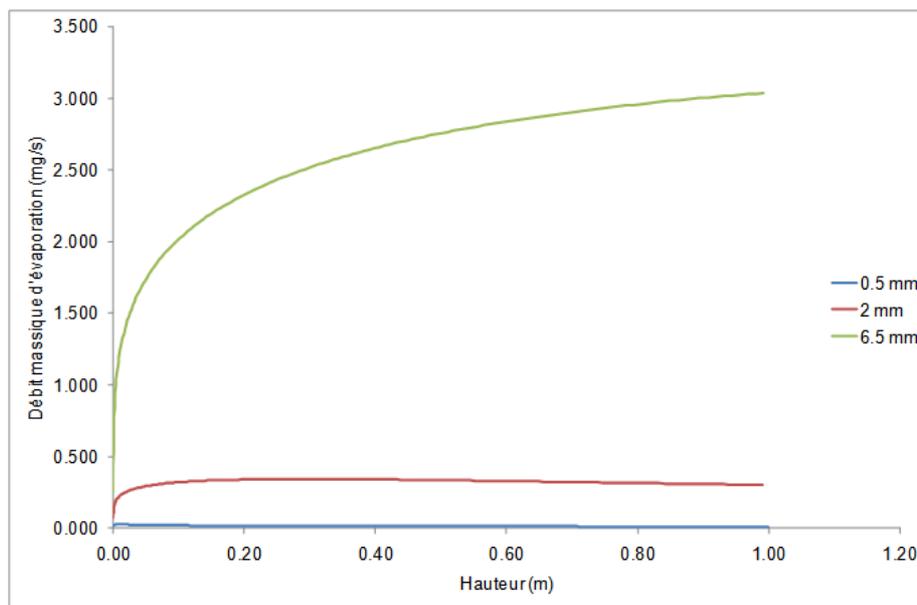


Figure 30 : Influence du diamètre initial de la goutte sur son débit massique d'évaporation dans le cas d'une goutte d'acétone à pression atmosphérique.

La Figure 30 montre que le débit massique d'évaporation d'une goutte de 6.5 mm augmente continuellement sur 1 m de chute, alors qu'il augmente puis diminue pour des gouttes de 2 et 0.5 mm : il est maximal à 2 cm pour une goutte de 0.5 mm et à 30 cm pour une goutte de 2 mm. Plus le diamètre de la goutte est important, plus le débit massique d'évaporation l'est aussi. Le nombre de Sherwood est plus élevé pour une grosse goutte que pour une petite goutte, car le nombre de Reynolds d'une grosse goutte est plus élevé que celui d'une petite goutte. De plus, la température d'une petite goutte en évaporation diminue plus que celle d'une grosse goutte, car la circulation interne est plus importante dans une grosse goutte qu'une petite goutte, ce qui ralentit le refroidissement dû à l'évaporation : la pression de vapeur saturante d'une petite goutte est alors plus importante que celle d'une grosse goutte. Ainsi, la fraction massique de vapeur d'une grosse goutte compense difficilement les mécanismes représentés par le nombre de Sherwood. On peut aussi noter que le rapport des débits massiques d'évaporation suit le rapport des surfaces d'échange pour 2 et 6.5 mm, mais pas pour 0.5 et 2 mm. Cela tend à montrer que le débit maximum évaporé pour la plus petite goutte est plus faible que ce qui est simplement dû aux différences de surface d'échange. **Ainsi, plus une goutte est petite, plus son évaporation est favorisée.**

Influence de la température de la phase gazeuse

Les conditions expérimentales évoluent tout au long de la journée notamment via le chauffage des projecteurs : la température augmente de 20°C à 40°C (*Chapitre 3 : Approche expérimentale*). Par conséquent, il a semblé pertinent de caractériser l'influence de cette augmentation sur l'évaporation des gouttes.

L'évaporation est la plus visible dans le cas d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa : ce cas est pris comme exemple dans cette section.

La Figure 31 représente l'influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa.

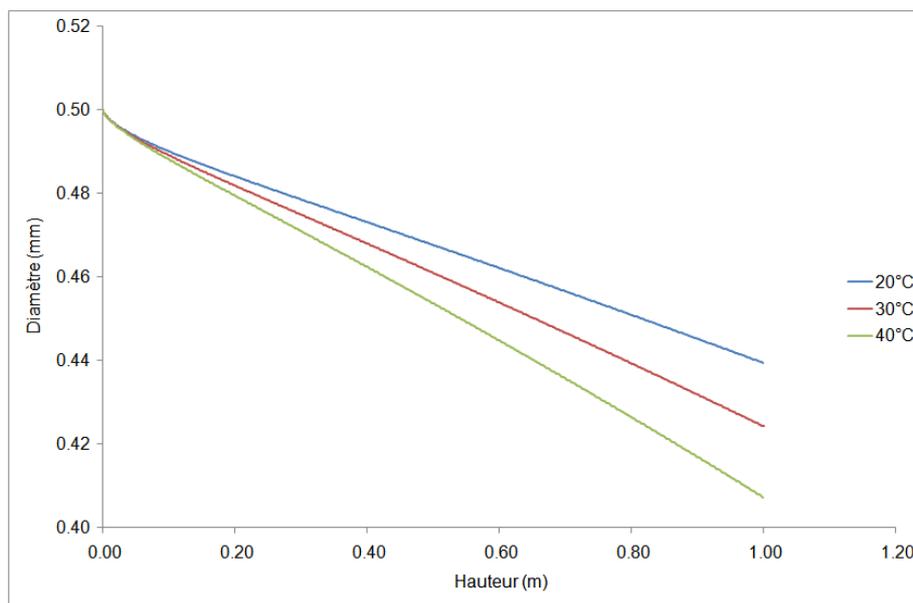


Figure 31 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa

La Figure 31 montre que plus la température de la phase gazeuse est élevée, plus le diamètre de la goutte diminue. La température de la phase gazeuse influence le coefficient de diffusion massique. Plus la température est élevée, plus le coefficient de diffusion massique l'est aussi et plus le diamètre de la goutte diminue rapidement. Dans le cas d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa, celle-ci subit une diminution de diamètre de 80 μm après 1 m de chute dans une atmosphère à une température ambiante de 40°C, soit 30 μm de plus que dans un environnement à une température ambiante de 20°C.

Par ailleurs, plus la taille de la goutte augmente, moins la température de la phase gazeuse a une influence sur la variation de son diamètre. Par exemple, le diamètre de gouttes de 2 et 6 mm de diamètre initial n'est pas affecté par une variation de température de la phase gazeuse de 20°C (Figure 32 et Figure 33).

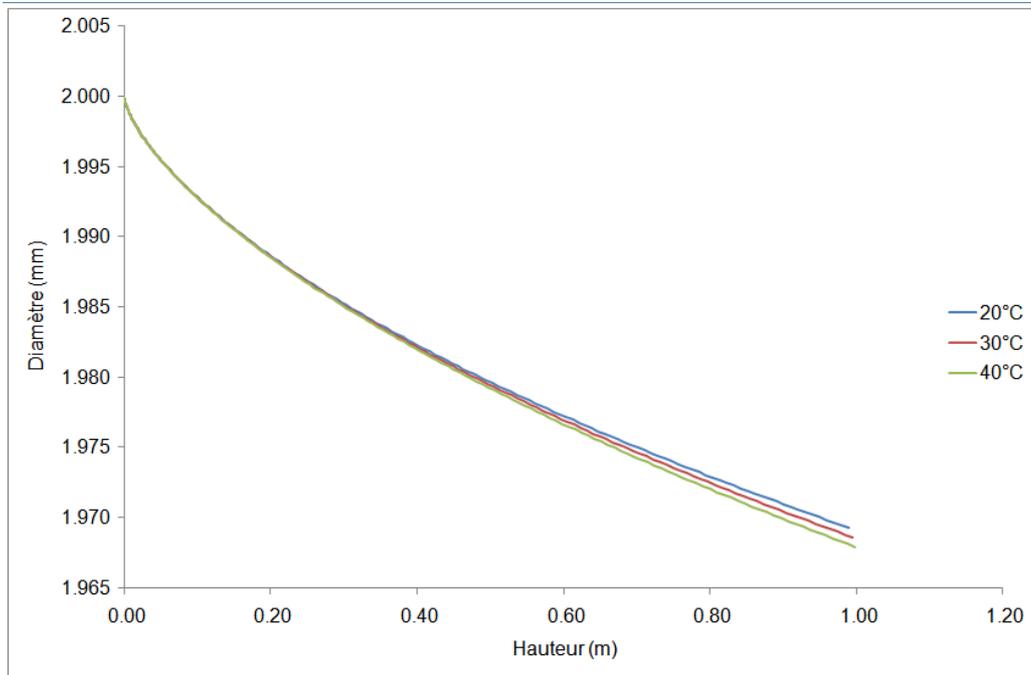


Figure 32 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 2 mm dans un environnement à pression atmosphérique

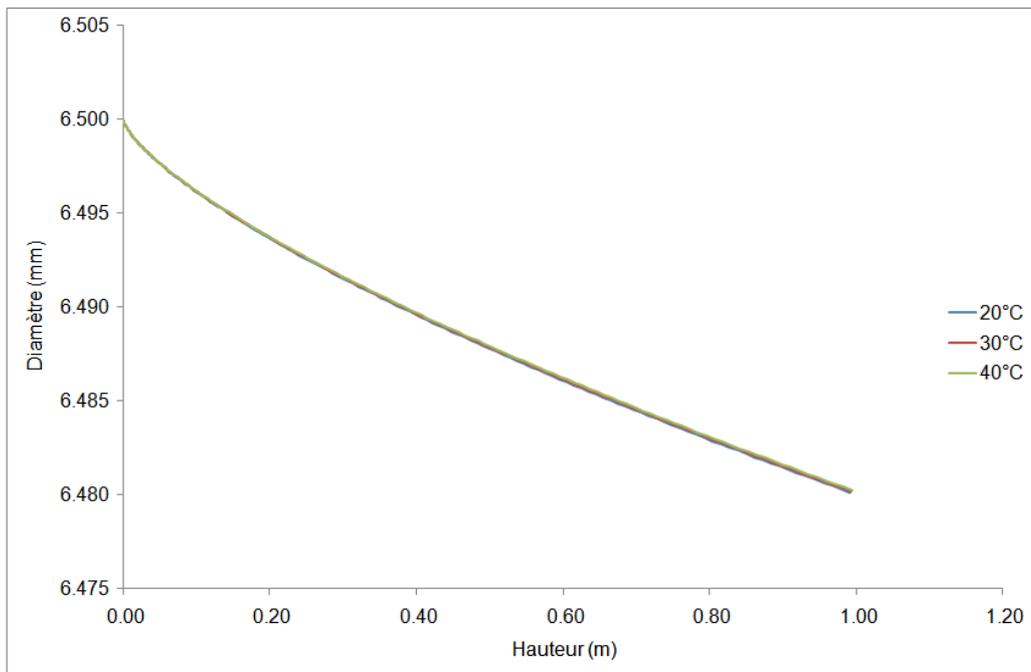


Figure 33 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 6.5 mm dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 34 représente l'influence de la température de la phase gazeuse sur la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa.

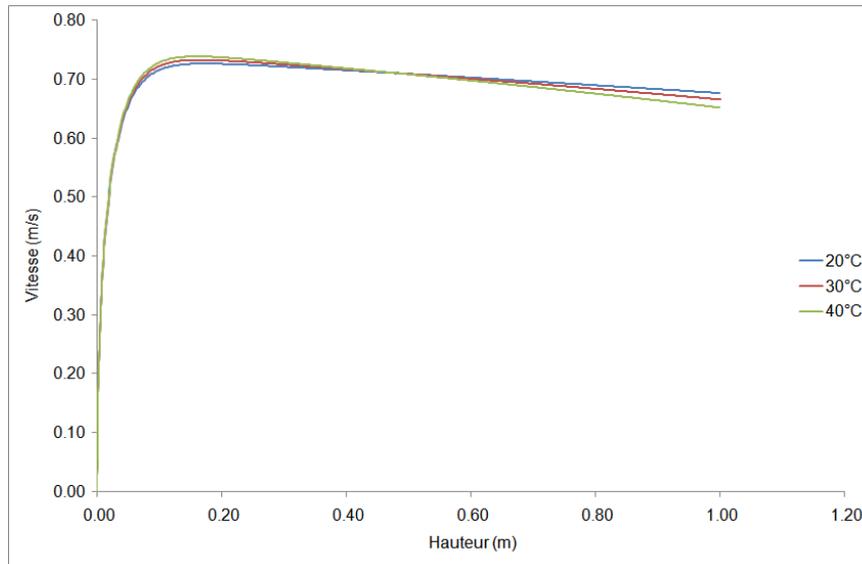


Figure 34 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa

La Figure 34 montre qu'une augmentation de 20°C de la température de la phase gazeuse n'entraîne pas de variation significative sur l'évolution de la vitesse de la goutte : après 1 m de chute, l'écart entre la vitesse prédite à une température ambiante de 293 K et celle prédite à une température ambiante de 313 K est de 3.6%. Par ailleurs, les courbes s'inversent après 50 cm.

La Figure 35 représente l'influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa.

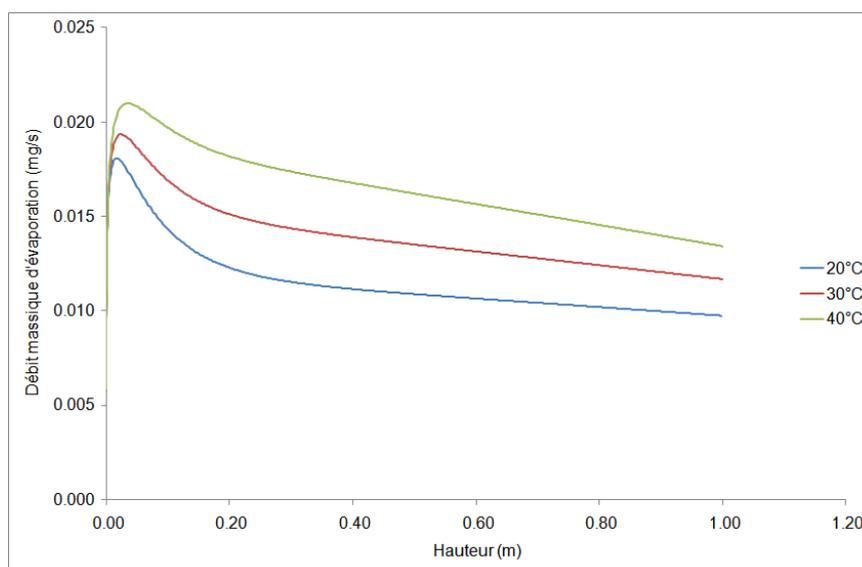


Figure 35 : Influence de la température de la phase gazeuse sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone de 0.5 mm dans un environnement pressurisé à 600 KPa

La Figure 35 montre que, pour chacune des trois températures testées, le débit massique d'évaporation augmente jusqu'à atteindre un maximum puis diminue. Une augmentation de la température de 20°C de la phase gazeuse entraîne une augmentation de près de 38% du débit massique d'évaporation après 1 m de chute. L'augmentation de la température de la phase gazeuse augmente le coefficient de diffusion massique et par conséquent le débit massique d'évaporation. Ce phénomène est plus significatif pour des petites gouttes que pour des grosses gouttes, car le débit varie inversement proportionnellement au diamètre des gouttes. Pour une goutte d'acétone de 2 mm de diamètre dans un environnement à pression atmosphérique, une augmentation de température de la phase gazeuse entraîne une augmentation du débit massique d'évaporation de 10%, après 1 m de chute. Par contre, une goutte d'acétone de 6.5 mm de diamètre initial n'est pas affectée par une telle variation de température (0.46%).

Ainsi, **une augmentation de la température de la phase gazeuse de 20°C favorise l'évaporation d'une goutte**. Ce phénomène est le plus remarquable pour des petites gouttes de 0.5 mm de diamètre initial. Par contre pour des gouttes de 2 mm ou de 6.5 mm, l'influence de la température de la phase gazeuse n'est pas significative.

Influence de la concentration loin de la goutte

Le modèle d'évaporation de gouttes proposé doit être applicable à l'étude de l'évaporation de gouttes en milieu clos. Jusqu'à présent, la concentration en vapeur loin de la goutte est considéré nulle $Y_{v,\infty} = 0$. Cependant, dans un milieu clos, $Y_{v,\infty}$ peut être différent de 0, car dans un tel milieu, la concentration en liquide évaporé loin de la goutte est plus élevée que dans un milieu ouvert. Pour quantifier l'influence de cette concentration loin de la goutte, la sensibilité du modèle à la concentration en vapeur loin de la goutte est étudiée et quantifiée. Reprenons le cas d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa, cas le plus propice à l'évaporation (Figure 36).

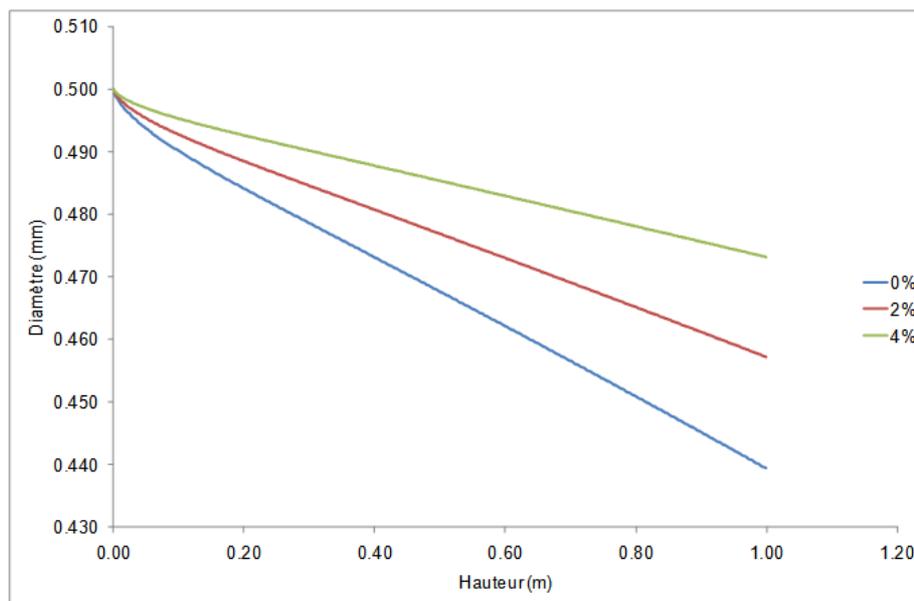


Figure 36 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa

La Figure 36 montre qu'une augmentation de la concentration en vapeur loin de la goutte (de 0 à 4%) entraîne une plus faible variation du diamètre (26 μm au lieu de 60 μm), c'est-à-dire une diminution de l'évaporation. Une augmentation de la concentration en vapeur loin de la goutte entraîne une diminution du débit massique et, par conséquent, une diminution de la variation du diamètre.

La Figure 37 représente l'influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa.

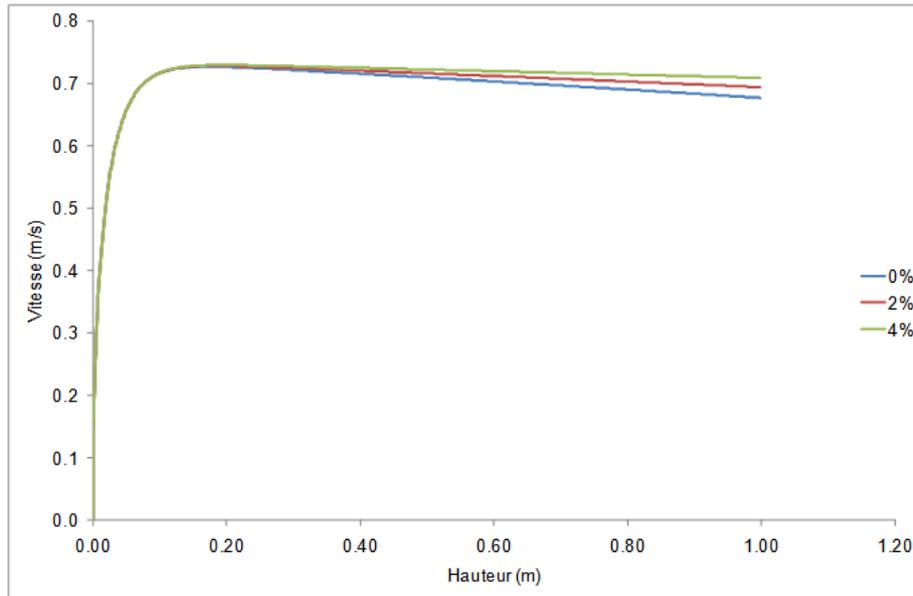


Figure 37 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa

La Figure 37 montre que, pour les trois valeurs de la concentration en vapeur loin de la goutte représentées, la vitesse augmente fortement jusqu'à 10 cm jusqu'à atteindre une valeur maximale de 0.75 m/s puis diminue faiblement. Une augmentation de la concentration en vapeur dans le milieu ambiant de 4% entraîne une augmentation de la vitesse de chute de la goutte de moins de 5% après 1 m de chute, car le diamètre de la goutte est plus gros et son inertie est alors plus importante.

La Figure 38 représente l'influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution du débit massique d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa. Cette figure montre que, pour les trois concentrations en vapeur loin de la goutte testées, le débit massique d'évaporation augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue. Plus la concentration en vapeur loin de la goutte est élevée, plus le débit massique d'évaporation diminue : une augmentation de la concentration en vapeur loin de la goutte de 4% entraîne une diminution de l'ordre de 50% du débit massique d'évaporation pour une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa.

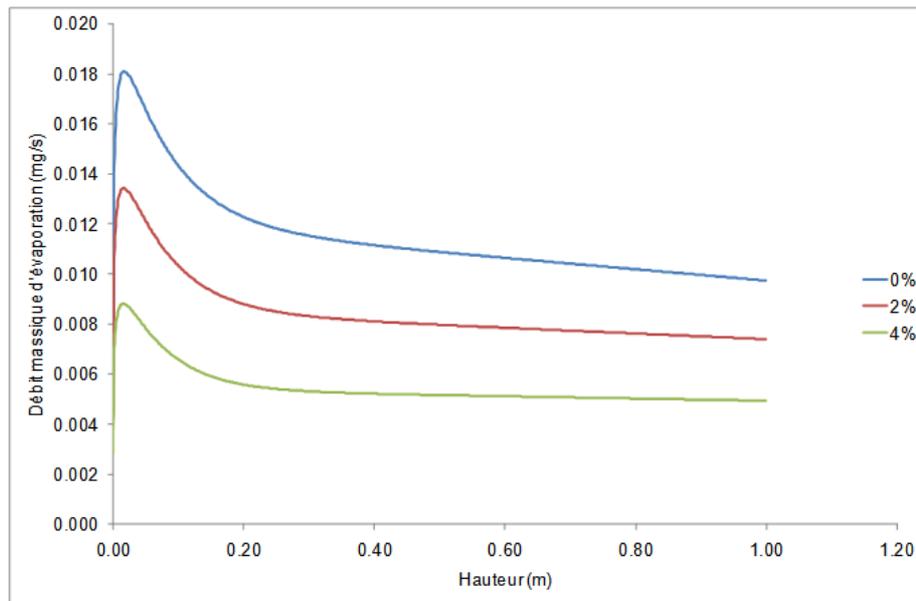


Figure 38 : Influence de la concentration en vapeur loin de la goutte sur l'évolution du débit massique d'une goutte d'acétone de 0.5 mm de diamètre initial dans un environnement pressurisé à 600 KPa

Ainsi, une augmentation de la concentration de vapeur loin de la goutte défavorise l'évaporation de la goutte, mais pas de façon significative par rapport à une sensibilité de la technique de mesure de 30 μm par pixel (*Chapitre 3 : Approche expérimentale*).

Comparaison du modèle avec des données expérimentales de la littérature

Pour compléter la validation du modèle d'évaporation de gouttes, celui-ci a été comparé avec des données expérimentales issues de la littérature. A notre connaissance, peu de travaux ont étudié l'évaporation d'une goutte en chute libre : il s'agit de ceux de Guella *et al.* (2008) et de Stengele *et al.* (1999). Ces derniers ont étudié l'évaporation d'une goutte dans des environnements à haute pression et haute température (pressions comprises entre 2 et 4 MPa et températures comprises entre 550 et 650 K), alors que les travaux de Guella *et al.* (2008) ont été réalisés à pression et à température ambiante.

Guella *et al.* (2008) ont étudié la chute d'une hauteur de 1.4 m de gouttes ayant un diamètre initial inférieur au millimètre et ont validé leur modèle avec des points expérimentaux obtenus avec des gouttes de diamètre inférieur à 200 μm (Sartor et Abbott, 1975) et leurs points expérimentaux obtenus avec des gouttes de diamètres initiaux compris entre 270 μm et 650 μm . Les produits testés sont de l'eau, de l'acétone, de l'éthanol et du 2-éthyl-1-hexanol dans un environnement à température et à pression ambiante. Les auteurs ont uniquement présentés des résultats sur les vitesses des gouttes.

La Figure 39 compare le modèle d'évaporation de goutte proposé avec les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) pour des gouttes d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique.

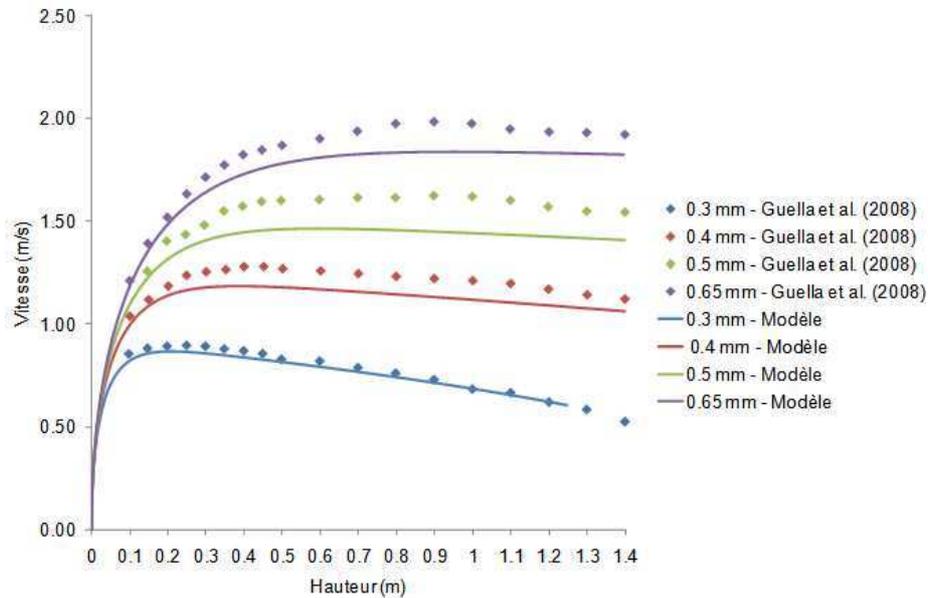


Figure 39 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) pour des gouttes d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 39 montre que pour chaque diamètre testé, la vitesse de la goutte augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue, aussi bien pour les mesures expérimentales de Guella et *al.* (2008) que pour les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes. Plus le diamètre de la goutte augmente, plus la vitesse maximale est atteinte au bout d'une hauteur de chute plus importante. La vitesse maximale de chute est atteinte pour une hauteur de chute similaire dans le cas des expérimentations et des prédictions du modèle. De plus, elle semble montrer que, dans le cas de goutte d'acétone en chute libre dans un environnement à pression atmosphérique, plus le diamètre de la goutte augmente, plus l'écart augmente entre le modèle d'évaporation de gouttes développé au cours de cette thèse et les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008). Pour des gouttes de diamètre initial supérieur à 300 μm , l'écart entre le modèle et les expérimentations est de 10% maximum, il est probablement dû au choix du coefficient de diffusion.

Les Figure 40 et Figure 41 comparent le modèle d'évaporation de gouttes proposé avec les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) pour, respectivement, des gouttes d'éthanol et d'eau. La Figure 40 montre des résultats très proches de la Figure 39. Pour chaque diamètre testé, sauf le plus grand (0.65 mm), la vitesse de la goutte d'éthanol augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis diminue, aussi bien pour les mesures expérimentales de Guella et *al.* (2008) que pour les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes. Plus le diamètre de la goutte augmente, plus la vitesse maximale est atteinte au bout d'une hauteur de chute plus importante. La vitesse maximale de chute est atteinte pour une hauteur de chute similaire dans le cas des expérimentations et des prédictions du modèle. Par ailleurs, pour le plus grand diamètre de goutte testé, la vitesse de la goutte augmente continuellement et il semble qu'une hauteur de chute de 1.4 m ne permette pas de visualiser de vitesse maximale de chute. Comme dans le cas de la goutte d'acétone, plus le diamètre de la goutte d'éthanol augmente, plus l'écart semble augmenter entre le modèle d'évaporation de gouttes

développé au cours de cette thèse et les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008). Pour des gouttes de diamètre initial supérieur à 300 μm , l'écart entre le modèle et les expérimentations est de 25% maximum, il est probablement dû au choix du coefficient de diffusion.

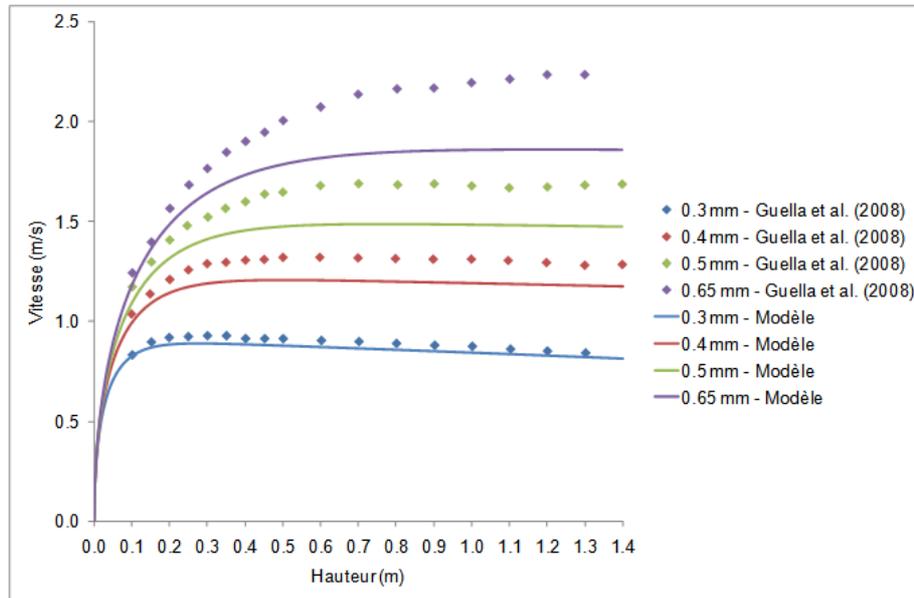


Figure 40 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) pour des gouttes d'éthanol dans un environnement à pression atmosphérique

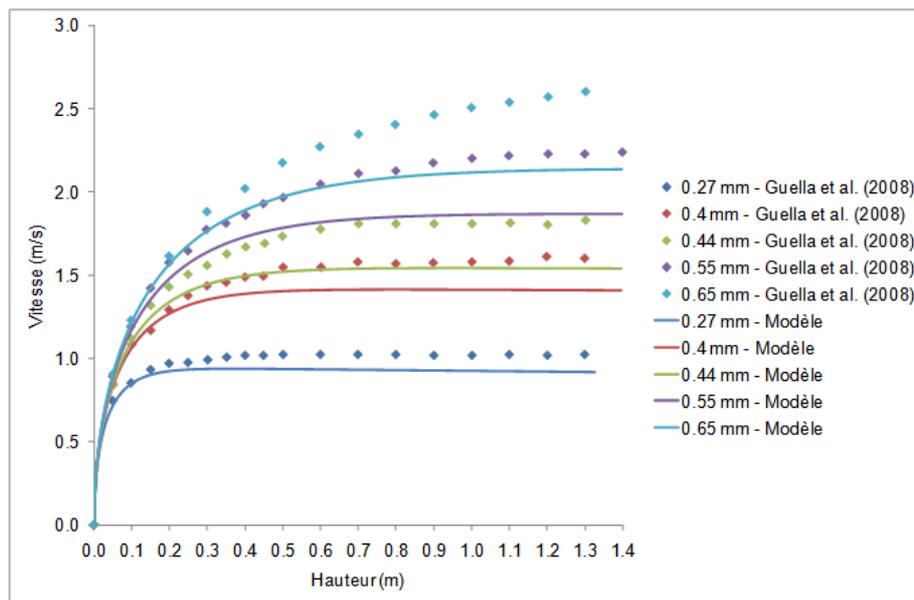


Figure 41 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) pour des gouttes d'eau dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 41 montre que la vitesse de la goutte augmente continuellement jusqu'à atteindre une vitesse maximale, sans diminuer par la suite, contrairement aux Figure 39 et Figure 40. Ce résultat est sans doute dû au fait qu'une goutte d'eau ne s'évapore pas suffisamment pour que la diminution de sa taille ait un impact sur sa force de traînée et donc sur la diminution de sa vitesse. L'écart entre le modèle et les résultats expérimentaux de Guella et *al.* (2008) est inférieur à 20% et semble se

justifier par la choix du coefficient de diffusion, comme dans le cas de la goutte d'acétone et de celui de la goutte d'éthanol. Il semble également que le modèle ait tendance à sous-estimer les mesures expérimentales.

Stengele et *al.* (1999) ont également travaillé avec des gouttes de diamètres inférieurs au millimètre. Ils ont travaillé sur une hauteur de chute de 0.7 m et ont obtenu des points expérimentaux pour des gouttes de diamètres compris entre 630 μm et 820 μm . Les produits testés sont du n-pentane, du n-nonane et des mélanges binaires de ces deux corps purs. Ils ont uniquement travaillé dans un environnement pressurisé entre 2 et 4 MPa à une température comprise entre 550 et 650 K. Il faut noter que leurs conditions d'étude sont largement supérieures à celles proposées dans le cadre de cette étude. Les auteurs ont présenté l'évolution du diamètre et de la vitesse des gouttes en fonction de la hauteur. La Figure 42 compare le modèle d'évaporation de gouttes avec les résultats expérimentaux de Stengele et *al.* (1999) pour une goutte de n-pentane de 630 μm de diamètre et une goutte de n-nonane de 740 μm de diamètre (toutes deux à une température initiale de 380 K) dans un environnement pressurisé à 3 MPa et à une température ambiante de 550 K.

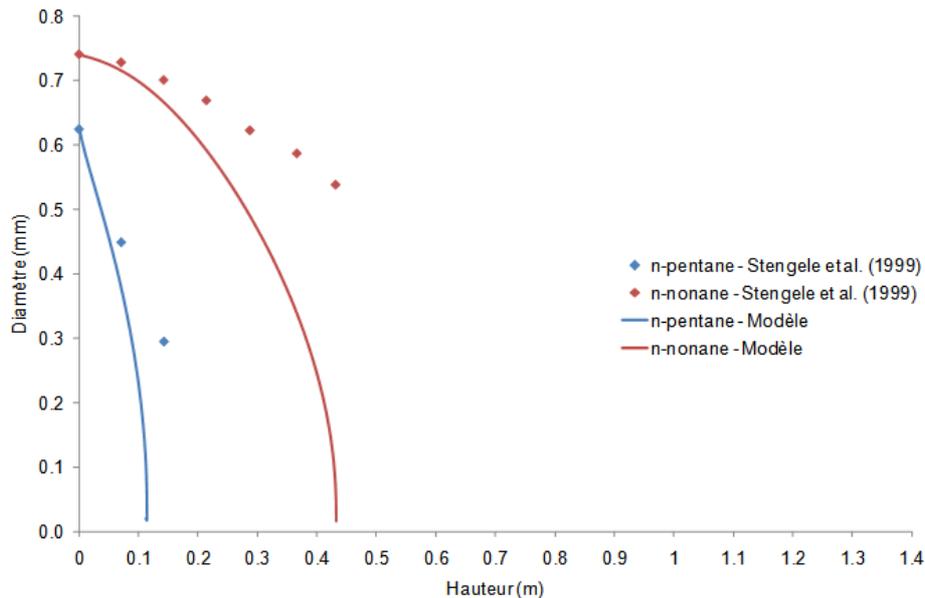


Figure 42 : Comparaison du modèle d'évaporation de goutte avec les résultats expérimentaux de Stengele et *al.* (1999) pour des gouttes de n-pentane (630 μm) et de n-nonane (740 μm) dans un environnement pressurisé à 3 MPa et à une température ambiante de 550 K

La comparaison des résultats expérimentaux de Stengele et *al.* (1999) avec les prédictions du modèle développé au cours de ces travaux permet de voir si ce modèle peut être extrapolé à d'autres conditions expérimentales. La Figure 42 montre que le modèle prédit correctement l'évolution du diamètre d'une goutte de n-pentane de 630 μm jusqu'à une hauteur de chute de 7 cm avec un écart maximal de 4.76% et celle d'une goutte de n-nonane de 740 μm jusqu'à une hauteur de chute de 36 cm avec un écart maximal de 2.95%. Ensuite, le modèle sous-estime le diamètre des gouttes et prédit l'évolution du diamètre d'une goutte de n-pentane de 630 μm avec un écart maximal de 76.05% (soit 224 μm) après 10 cm de chute et l'évolution du diamètre d'une goutte de n-nonane de 740 μm avec un écart maximal de 15.10% (soit 81 μm) après 43 cm de chute. Ainsi, l'écart entre le modèle et les mesures expérimentales est plus faible dans les premiers instants de la chute de la goutte. Cet écart

peut s'expliquer par la non prise en compte des effets des gaz réels dans notre modèle d'évaporation.

Ainsi, le modèle d'évaporation de goutte proposé est testé et présente un écart inférieur à 10%, par rapport aux mesures expérimentales de Guella et al. (2008), à pression atmosphérique pour des gouttes d'eau, d'acétone et d'éthanol de diamètre initial compris entre 270 μm et 650 μm . Cependant, pour des conditions où l'évaporation est favorisée, comme par exemple pour des gouttes d'acétone de 300 μm de diamètre initial, l'écart entre les expérimentations et le modèle devient plus important. En revanche, le modèle présente des limites à des pressions ambiantes de 3 MPa et à des températures ambiantes de 550 K.

2.3 Modèle d'évaporation de spray

La section précédente a proposé un modèle d'évaporation de gouttes dans les conditions thermodynamiques de l'étude. L'étude paramétrique de ce modèle a été présentée ainsi que sa comparaison avec des données expérimentales issues de la littérature. Pour étendre ce modèle de gouttes à un modèle de spray, la prise en compte de l'entraînement d'air est nécessaire. Par conséquent, ce modèle d'évaporation de gouttes est comparé à un modèle d'évaporation de sprays issu de la littérature prenant en compte l'entraînement d'air. Cette section décrit dans un premier temps le modèle et les modifications qui lui sont apportées pour tenir compte de l'augmentation de la pression ambiante. L'analyse paramétrique est présentée par la suite afin d'évaluer la sensibilité et la fiabilité du modèle aux paramètres d'entrée. Enfin, les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sont comparés afin de déterminer dans quelles mesures, un spray peut être modélisé par un ensemble de gouttes isolées sans tenir compte de l'entraînement d'air.

2.3.1 Description du modèle

Le modèle d'évaporation de sprays choisi est issu des thèses de St-Georges (1993) et de Pretrel (1997).

St-Georges (1993) a étudié l'hydrodynamique des pulvérisations liquides pour des applications avec des rideaux d'eau. Les rideaux d'eau sont généralement utilisés pour diluer les nuages toxiques suite à des rejets accidentels de gaz. Le modèle développé tient compte de l'hydrodynamique, de l'absorption de matière du polluant, du transfert de chaleur et du transfert de matière.

Pretrel (1997) a étudié le comportement thermohydraulique de pulvérisations liquides sous l'effet d'un rayonnement infrarouge. Son modèle est appliqué à la protection des incendies par rideaux d'eau. Il a également comparé les modèles de diffusion de Fick et de soufflage.

Dans ce modèle, la vitesse d'éjection des gouttes, qui est un paramètre d'entrée, est déterminée à partir du débit de liquide et de la section de la buse. Les équations principales de ce modèle d'évaporation de spray s'appliquent à un volume d'étude et sont les suivantes :

Conservation de la masse :

$$\frac{d}{dz} [\dot{m}_g + \dot{m}_l] = \frac{d}{dz} \dot{m}_g + \sum_{i=1}^{nd} \frac{d}{dz} \dot{m}_{di} = \frac{d}{dz} \dot{m}_{g,ent}$$

Équation 44

Où \dot{m}_g représente le débit massique du gaz, \dot{m}_l le débit massique du liquide, z l'axe d'étude, di la classe de goutte i , nd le nombre total de classes de tailles de gouttes, $\frac{d}{dz} \dot{m}_{di}$ la variation de masse due à l'évaporation de la phase liquide et $\dot{m}_{g,ent}$ le débit d'air entraîné dans la pulvérisation qui équilibre ainsi la variation de débit de la phase liquide et de la phase gazeuse dans le rideau d'eau.

Conservation de quantité de mouvement :

Le bilan de la quantité de mouvement à travers le volume de contrôle est exprimé par l'Équation 45. Les deux mécanismes qui modifient la quantité de mouvement du spray sont l'entrée ou la sortie d'air et les forces extérieures agissant sur le spray.

$$\frac{d}{dz} [u_g \dot{m}_g] + \sum_{i=1}^{nd} \frac{d}{dz} [u_{di} \dot{m}_{di}] = \sum \vec{F} + u_g^* \frac{d}{dz} \dot{m}_{g,ent}$$

Équation 45

Où u_g^* est la vitesse d'entrée d'air, à travers l'enveloppe du spray, projetée sur l'axe z . Le terme $\sum \vec{F}$ représente les forces appliquées au volume de contrôle, à savoir la force de gravité et la force de flottabilité.

Conservation de l'énergie :

Le bilan d'enthalpie totale sur le volume de contrôle est donné par (Équation 46) :

$$\frac{d}{dz} [\dot{m}_g h_{e_g}] + \sum_{i=1}^{nd} \frac{d}{dz} [\dot{m}_{di} h_{e_{di}}] = (a h_{e_g} + b h_{e_g}) \frac{d}{dz} \dot{m}_{g,ent}$$

Équation 46

Où h_{e_g} est l'enthalpie massique du gaz, a et b des coefficients : en situation d'entraînement d'air, $a = 1$ et $b = 0$.

Ce modèle d'évaporation de spray, nommé ASTRRE (**A**tténuation de **S**ource **T**hermique **R**adiative par **R**ideau d'**E**au), est basé sur le modèle de Buchlin (1988). Les hypothèses sont les suivantes :

- L'écoulement est supposé stationnaire et uniforme : les propriétés sont considérées constantes sur une section de la pulvérisation, le modèle est unidimensionnel,
- La pulvérisation est axisymétrique autour de son axe dont l'origine est à la buse,
- La distribution continue de tailles de gouttes est remplacée par un nombre fini de classes : ces classes sont choisies suffisamment petites pour que le comportement d'une classe puisse être considéré uniforme,
- Les interactions entre les gouttes sont négligées : pas de collisions, coalescence, etc.
- La pulvérisation est effectuée dans un milieu gazeux infini, initialement au repos,
- Le gaz entraîné pénètre dans la pulvérisation perpendiculairement à l'enveloppe,
- Les gouttes sont supposées sphériques,
- Les transferts de matière et de chaleur sont pris en compte.

Des modifications ont été apportées à ce modèle pour tenir compte de la pression de la phase gazeuse. Les propriétés physico-chimiques, notamment le coefficient de diffusion massique (corrélation de Fuller (1966)), de l'éthanol et de l'acétone tenant compte de la pression de la phase gaz ont été rajoutées.

Pour d'avantages de détails sur ces modèles, il faut se référer aux thèses de St-Georges (1993) et de Pretrel (1997).

2.3.2 Cadre d'étude

La principale différence entre ce modèle d'évaporation de spray et le modèle d'évaporation de gouttes, décrit précédemment, est la prise en compte de l'entraînement d'air dans le spray et la dispersion en tailles de gouttes.

Le module ASTRRE permet la simulation de deux mécanismes :

- L'hydrodynamique pure du spray
- L'hydrodynamique du spray couplée aux transferts de masse et de chaleur.

Dans le cadre de cette thèse, toutes les simulations réalisées avec ASTRRE tiennent compte de l'hydrodynamique du spray couplée aux transferts de masse et de chaleur pour étudier l'évaporation d'un spray.

Le module ASTRRE permet la modélisation de pulvérisations liquides issues d'atomiseurs ou de buses. **Dans notre cas, seuls les sprays pulvérisés par une buse sont étudiés.** Deux géométries de buses peuvent être rencontrées : les buses coniques et les buses à jet plat. Parmi les buses coniques, on compte les buses à cône creux et les buses à cône plein. **Dans notre cas, seules les buses coniques à cône plein sont étudiées.**

Une buse est caractérisée par son nombre d'écoulement (Flow Number), il dépend du débit et de la pression relative (ou ΔP). La pression relative est définie comme la différence entre la pression d'alimentation de la buse et la pression du milieu ambiant. Ce nombre varie selon le liquide utilisé.

Le module ASTRRE permet la modélisation de pulvérisations monodispersées et polydispersées. Une pulvérisation est dite monodispersée si les tailles des gouttes sont uniformes et polydispersée si les tailles des gouttes générées n'ont pas toutes les mêmes diamètres et suivent une loi de distribution. **Dans notre cas, seul le cas polydispersé a été étudié.** Le nombre de classes de la granulométrie, le diamètre moyen et le paramètre de dispersion (compris entre 2 et 4) au sens de la loi de Rosin-Rammler sont alors nécessaires. **Le nombre de classes est fixé à 10 (St-Georges (1993), Pretrel (1997)). Le diamètre moyen et le paramètre de la dispersion pour la distribution selon Rosin-Rammler sont issus des expérimentations.**

Un des paramètres d'entrée du module est la vitesse d'éjection des gouttes. La vitesse d'éjection des gouttes est déterminée à partir de la pression d'alimentation de la buse et de la densité du liquide.

Le débit massique de la buse est déterminé grâce à la pression relative entre le liquide et le milieu ambiant, la densité du liquide, et la section liée au diamètre d'orifice de la buse. Le diamètre d'orifice de la buse est fixé à 0.85 mm pour être représentatif des conditions expérimentales de cette étude. Les liquides testés pour ces simulations sont l'eau, l'éthanol et l'acétone. Le débit a été corrigé selon l'Équation 47 pour tenir compte des différences de densité de l'éthanol et de l'acétone (*Chapitre 3 : Approche expérimentale*) :

$$\dot{V}_{Fl} = \dot{V}_w \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_{Fl}}}$$

Équation 47

Avec \dot{V}_{Fl} le débit massique de l'acétone, \dot{V}_w le débit massique d'eau, ρ_{Fl} le débit d'acétone et ρ_w le débit d'eau. Cette expression est proposée par le constructeur de la buse.

Le module ASTRRE a également besoin du diamètre des gouttes situées sur l'enveloppe du spray : il s'agit du diamètre moyen en mètre et du demi-angle d'éjection, comme le programme utilise un modèle axisymétrique. L'expérience montre que **le diamètre moyen est 1.25 fois plus gros que le diamètre moyen de la distribution de Rosin-Rammler.** Quant à l'angle d'éjection, il est de 45° dans notre cas soit un demi-angle de 22.5°.

La hauteur de calcul dans le spray, la température de l'air et l'humidité de l'air sont d'autres paramètres d'entrée du programme.

Le module ASTRRE peut tenir compte de l'effet du vent sur l'hydrodynamique du spray. Cependant, **dans notre cas, nous supposons que l'air ambiant est au repos et fixons donc la vitesse de l'air à 0 m/s.**

La Figure 43 schématise le fonctionnement du code ASTRE.

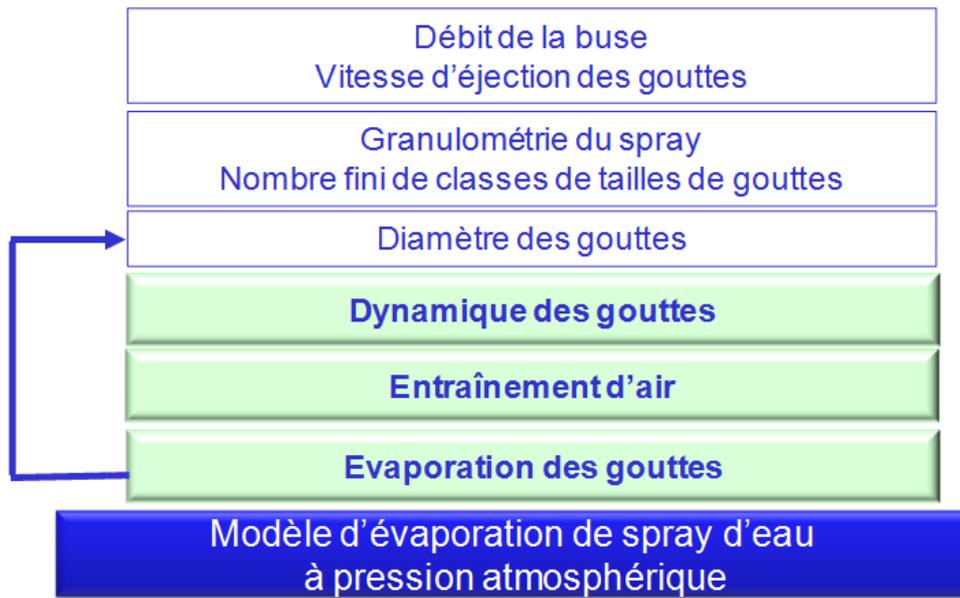


Figure 43 : Modèle d'évaporation de spray adapté à l'étude des rideaux d'eau (St-Georges (1993) et Pretrel (1997))

Cette figure montre que la première donnée d'entrée du code est le débit de la buse, à partir duquel est déterminée la vitesse d'éjection des gouttes. La deuxième donnée d'entrée du code est la granulométrie du spray, sous la forme d'une loi de Rosin-Rammler, à partir de laquelle est déterminé un nombre fini de classes de tailles de gouttes. Chaque classe de taille de goutte est considéré comme un diamètre uniforme. A partir du diamètre des gouttes, le code permet de déterminer la dynamique des gouttes, l'entraînement d'air et l'évaporation des gouttes. Dans le code, l'entraînement d'air est modélisé par la corrélation de McQuaid (1975) (Équation 48) :

$$\frac{G_v}{L_{vn}} = 18.7 \left(\frac{\sqrt{\rho_l}}{4x_e} FN \right)^{-0.5} \quad \text{avec} \quad \left(\frac{\sqrt{\rho_l}}{4x_e} FN \right) \approx 0.1$$

$$\frac{G_v}{L_{vn}} = 1.33 \left(\frac{\sqrt{\rho_l}}{4x_e} FN \right)^{-5/6} \quad \text{avec} \quad \left(\frac{\sqrt{\rho_l}}{4x_e} FN \right) \approx 5$$

Équation 48

Où G_v représente le débit d'air entraîné, L_{vn} le débit d'eau pulvérisée, ρ_l la masse volumique du liquide, x_e le rayon de l'enveloppe du spray et FN le nombre d'écoulement de la buse de pulvérisation.

Ensuite, ce code permet de déterminer l'évaporation des gouttes, de remonter au calcul du diamètre et de procéder ainsi de façon itérative.

Les modifications apportées à ce code dans le cadre de ce travail de recherche ont alors consisté à prendre en compte les propriétés physico-chimiques de l'acétone et de l'éthanol, la pression ambiante comprise entre 1 et 6 bar, notamment au travers l'implémentation de la corrélation de Füller *et al.* (1966).

2.3.3 Etude paramétrique

Les variables retenues pour valider le modèle sont la pression relative, la pression de la phase gazeuse, la nature du liquide, la température de la phase gazeuse et l'humidité de l'air. L'influence de ces paramètres est étudiée sur l'évolution du diamètre, de la vitesse et du débit massique d'évaporation des gouttes du spray.

Influence de la pression relative

La pression relative est un paramètre important à prendre en compte pour déterminer la granulométrie du spray, car il influe notamment sur le débit de la buse. Comme le montre l'Équation 47, le débit de la buse varie aussi en fonction de la nature du liquide. Des simulations sont alors réalisées avec de l'eau et de l'acétone. L'eau sera utilisée lors des expérimentations et l'acétone est le cas dans lequel l'évaporation est la plus remarquable.

La granulométrie du spray est définie par un diamètre moyen et par un paramètre de dispersion au sens de la loi de Rosin-Rammler. Il est connu qu'une augmentation de la pression relative augmente le nombre de petites gouttes. Ainsi, différentes distributions de Rosin-Rammler doivent être utilisées pour étudier l'influence de la pression relative sur un spray d'eau ou d'acétone, pour des pressions relatives variant entre 100 et 400 KPa. La Figure 44 représente les distributions granulométriques de Rosin-Rammler choisies arbitrairement et utilisées pour étudier l'influence de la pression relative sur un spray d'eau. On considère que les distributions granulométriques sont similaires pour de l'acétone.

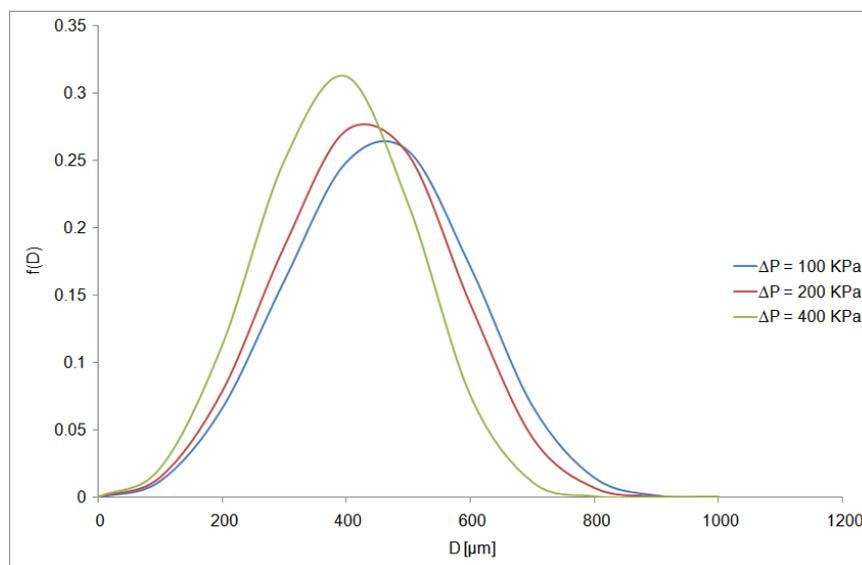


Figure 44 : Représentation des distributions granulométriques de Rosin-Rammler utilisées pour étudier l'influence de la pression relative sur un spray d'eau (ou d'acétone)

Cette figure montre que plus la pression relative augmente, plus la distribution se déplace vers les petits diamètres et plus la distribution est resserrée autour de la valeur moyenne. Ainsi, les classes de tailles de gouttes déterminées par le code ASTRRE seront différentes pour ces trois pressions relatives.

Le Tableau 6 donne les paramètres (diamètre moyen et paramètre de dispersion) choisis arbitrairement pour les distributions granulométriques de Rosin-Rammler représentées à la Figure 44, les quatre classes de diamètres initiaux de gouttes et leur vitesse initiale correspondante déterminées par le code ASTRRE pour des pulvérisations d'eau et d'acétone à des pressions relatives d'alimentation de 100, 200 et 400 KPa, dans un environnement à pression atmosphérique.

Liquide	Eau	Eau	Eau	Acétone	Acétone	Acétone
Pression relative (KPa)	100	200	400	100	200	400
Diamètre moyen (μm)	505	480	430	505	480	430
Paramètre de dispersion	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
1 ^{ère} classe de diamètre (μm)	204	194	174	204	194	174
2 ^{ème} classe de diamètre (μm)	371	353	316	371	353	316
3 ^{ème} classe de diamètre (μm)	538	512	458	538	512	458
4 ^{ème} classe de diamètre (μm)	705	671	601	705	671	601
Vitesse initiale (m/s)	22	29	38	25	33	43

Tableau 6 : Influence du liquide et de la pression relative sur quelques classes de diamètre initiales de gouttes du spray et leur vitesse initiale – Cas de pulvérisations dans un environnement à pression atmosphérique

Le Tableau 6 montre que les classes de diamètres de gouttes initiales déterminées par le modèle ASTRRE sont influencées par les paramètres choisis pour la distribution granulométrique de Rosin-Rammler, pour l'eau et l'acétone. Une augmentation de la pression relative de 100 à 400 KPa entraîne une augmentation de la vitesse initiale des gouttes de 16m/s dans le cas d'une pulvérisation d'eau et de 18m/s dans le cas de l'acétone. Dans le module ASTRRE, la vitesse initiale des gouttes est la même quelque soit la taille de goutte, car elle dépend uniquement de la pression relative et de la densité du liquide. La vitesse varie proportionnellement avec la pression relative, ainsi, pour un liquide donné, une augmentation de la pression relative correspond à une augmentation de la vitesse initiale des gouttes. Par contre, cette même vitesse varie inversement proportionnellement à la densité du liquide. La densité de l'acétone étant moins importante que celle de l'eau, ceci traduit une vitesse initiale des gouttes plus élevée dans le cas d'une pulvérisation d'acétone que dans le cas d'une pulvérisation d'eau.

Ainsi, une augmentation de la pression relative entraîne une vitesse initiale des gouttes plus élevée, ce phénomène est accentué avec la diminution de la densité du liquide. Les paramètres choisis arbitrairement pour les distributions de Rosin-Rammler permettent de représenter la diminution des diamètres initiaux des différentes classes de tailles de gouttes avec l'augmentation de la pression relative.

La Figure 45 représente l'influence de la pression relative sur l'évolution du diamètre adimensionné de la plus petite classe de goutte (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre qu'une augmentation de la pression relative de 100 à 200 KPa entraîne une diminution moins importante du diamètre de la goutte considérée. Comme l'augmentation de la pression relative entraîne une augmentation de la vitesse initiale des gouttes, les gouttes pulvérisées avec une pression relative élevée chutent plus rapidement que celles pulvérisées avec une pression relative plus faible. Cependant, le temps d'évaporation d'une goutte est plus long que son temps de chute, ce qui explique que l'évaporation soit favorisée dans le cas d'une pression relative faible. En revanche, une augmentation de la pression relative de 200 à 400

KPa entraîne une diminution plus importante du diamètre de la goutte considérée. Toutefois, l'écart observé sur le diamètre adimensionné entre ces deux pressions est inférieur à 1%.

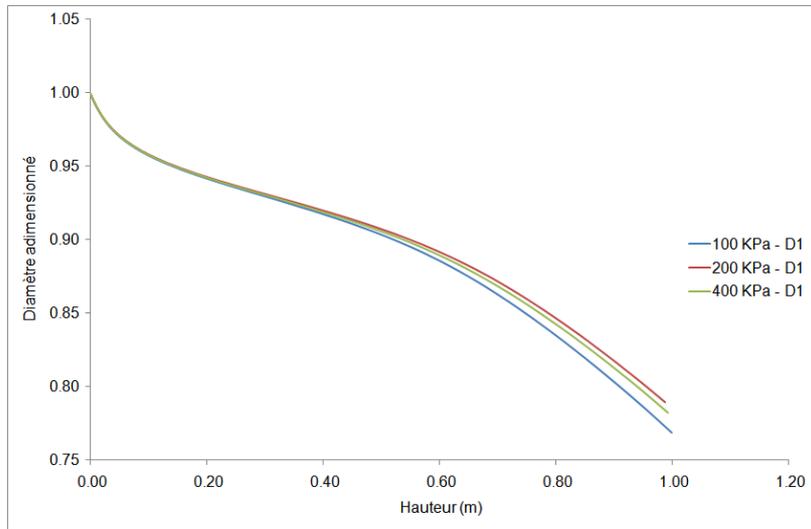


Figure 45 : Influence de la pression relative sur l'évolution du diamètre adimensionné de la plus petite classe de diamètre de gouttes (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 46 représente l'influence de la pression relative sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique.

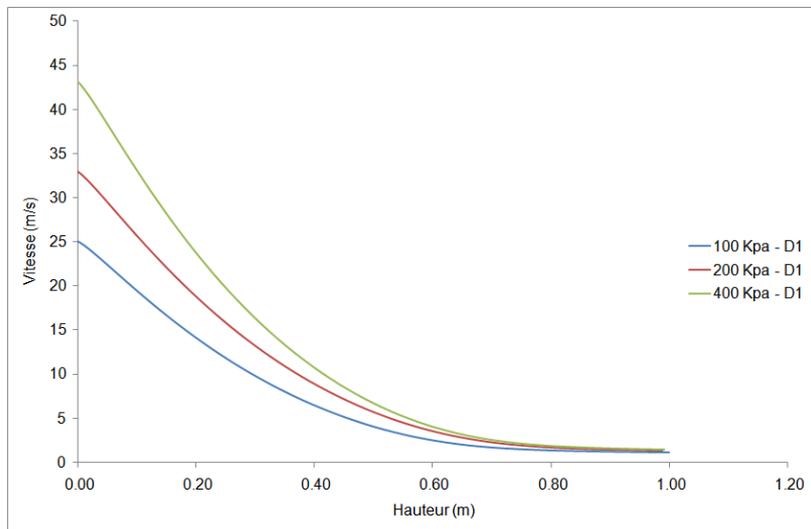


Figure 46 : Influence de la pression relative sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (D1) d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 46 montre tout d'abord que les vitesses initiales sont différentes avec la pression relative : une augmentation de la pression relative entraîne une augmentation de la vitesse initiale des gouttes. Cette figure montre aussi que plus la pression relative est élevée, plus la vitesse des gouttes de cette classe diminue rapidement. Plus la vitesse des gouttes est élevée, moins la goutte s'évapore et donc elle est plus grosse et a plus d'inertie. A partir d'une hauteur de chute de 80 cm, les courbes

se rejoignent et les gouttes atteignent une vitesse limite au bout d'1 m. Cette vitesse limite est de 1.1 m/s pour une pression relative de 100 KPa et de 1.49 m/s pour une pression relative de 400 KPa.

La Figure 47 représente l'influence de la pression relative sur le débit massique d'évaporation d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique.

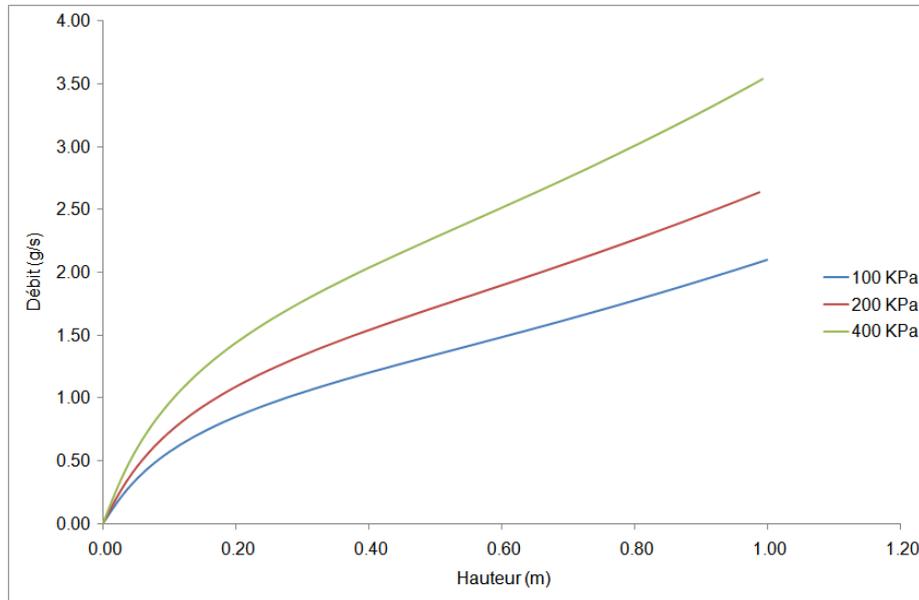


Figure 47 : Influence de la pression relative sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une pulvérisation d'acétone dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 47 montre tout d'abord que quelque soit la pression relative, le débit massique d'évaporation augmente avec la hauteur de chute. De plus, cette figure montre qu'une augmentation de la pression relative de 100 à 400 KPa entraîne une augmentation du débit massique d'évaporation de près de 70% à une hauteur de 1 m.

Influence de la pression de la phase gazeuse

La pression de la phase gazeuse est le paramètre d'entrée le plus important à étudier car l'étude de son influence est l'objectif même de cette étude. L'influence de la pression de la phase gazeuse sur l'évaporation d'un spray est étudiée dans le cas d'une pulvérisation d'eau avec une pression relative de 100 KPa.

La Figure 48 représente l'influence de la pression ambiante sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre initial) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa. Cette figure montre qu'une augmentation de la pression ambiante de 100 à 500 KPa entraîne une diminution plus importante du diamètre de goutte. En effet, une augmentation de la pression ambiante augmente la densité de l'air, augmente les frottements et diminue la vitesse des gouttes, ce qui favorise l'évaporation de gouttes.

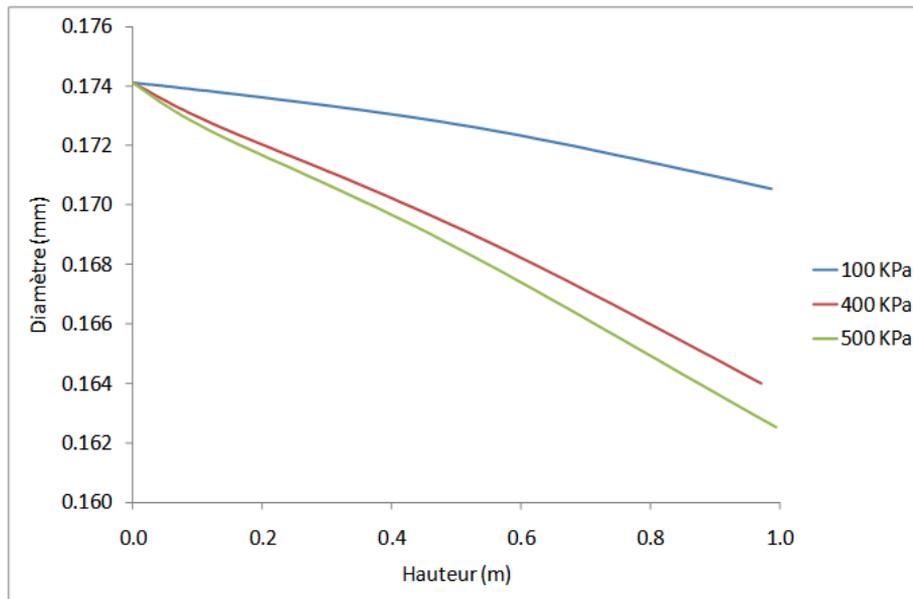


Figure 48 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 µm de diamètre initial) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa

La Figure 49 représente l'influence de la pression ambiante sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (174 µm) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa.

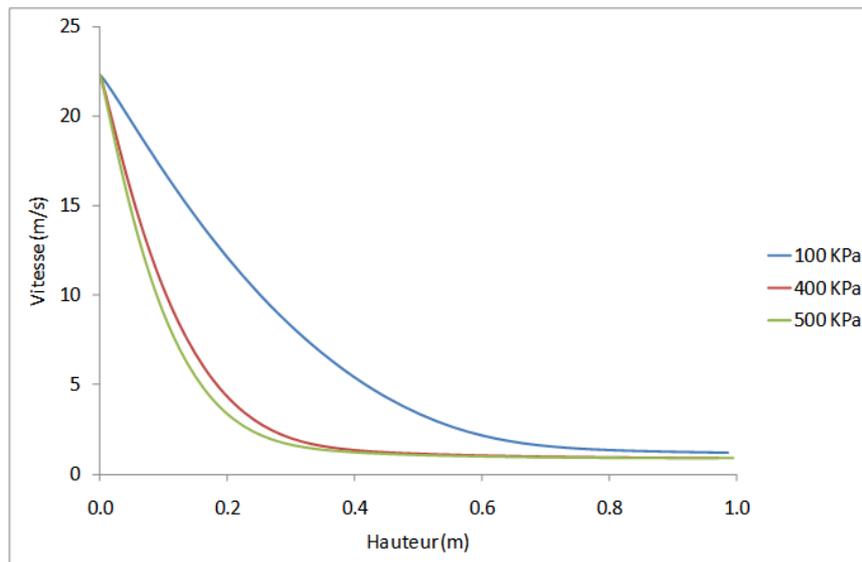


Figure 49 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution de la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètres (174 µm) d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa

La Figure 49 montre qu'une augmentation de la pression de la phase gazeuse de 100 à 500 KPa entraîne un ralentissement plus important des gouttes de la plus petite classe de diamètre, car cette augmentation de pression ambiante augmente comme précédemment la densité de l'air ambiant et, par conséquent, ralentit les gouttes. La vitesse limite de la goutte est différente entre 100 KPa (1.18 m/s) et 500 KPa (0.88 m/s). Ce phénomène a également été observé pour les autres classes de diamètres de gouttes, mais de façon un peu moins significative.

La Figure 50 représente l'influence de la pression ambiante sur le débit massique d'évaporation d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa.

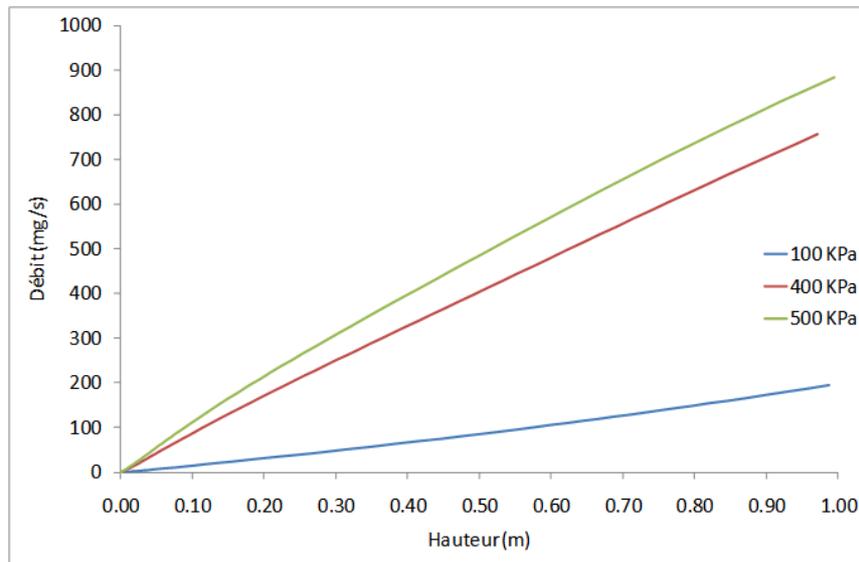


Figure 50 : Influence de la pression ambiante sur le débit massique d'évaporation d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 100 KPa.

La Figure 50 montre qu'une augmentation de la pression ambiante de 100 à 500 KPa entraîne une augmentation du débit massique d'évaporation d'un facteur 4, ce résultat est différent de ceux montrés avec le modèle d'évaporation de gouttes où une augmentation de la pression ambiante diminue l'évaporation. Ainsi, dans le cas d'un spray, la diffusion n'est plus le mécanisme prépondérant.

Influence de la nature du liquide

Selon le liquide contenu dans le réservoir de stockage, le débit à la brèche varie, donc la granulométrie du spray varie, et l'évaporation du spray varie également. Les deux produits choisis pour cette comparaison sont l'eau et l'acétone. Ils sont comparés dans le cas d'une pulvérisation dans un environnement à pression atmosphérique.

La Figure 51 représente l'influence de la nature du liquide sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 μm de diamètre) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre qu'une goutte d'acétone voit son diamètre diminuer davantage par rapport à une goutte d'eau, comme dans le cas du modèle de goutte. Plus le diamètre initial de la goutte est faible, plus elle va s'évaporer rapidement. En effet, la pression de vapeur de l'acétone est plus élevée que celle de l'eau, ce qui peut expliquer ce résultat.

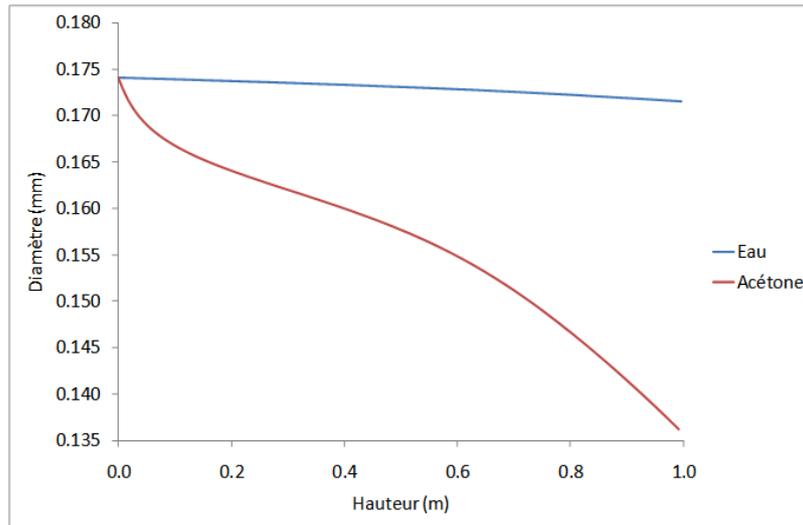


Figure 51 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 µm de diamètre initial) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 52 représente l'influence de la nature du liquide sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 µm de diamètre) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre que la vitesse initiale d'une goutte d'eau est inférieure à celle d'une goutte d'acétone jusqu'à 25 cm pour un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique, car le débit est obtenu à partir de la pression relative mais aussi de la densité du liquide (Équation 47). Plus la densité de liquide est élevée, plus son débit et sa vitesse initiale sont faibles. Par contre, la vitesse des gouttes d'acétone diminue plus rapidement que celle des gouttes d'eau. Enfin, la vitesse limite de la goutte d'eau est de 1.68 m/s alors que celle de l'acétone est de 1.49 m/s.

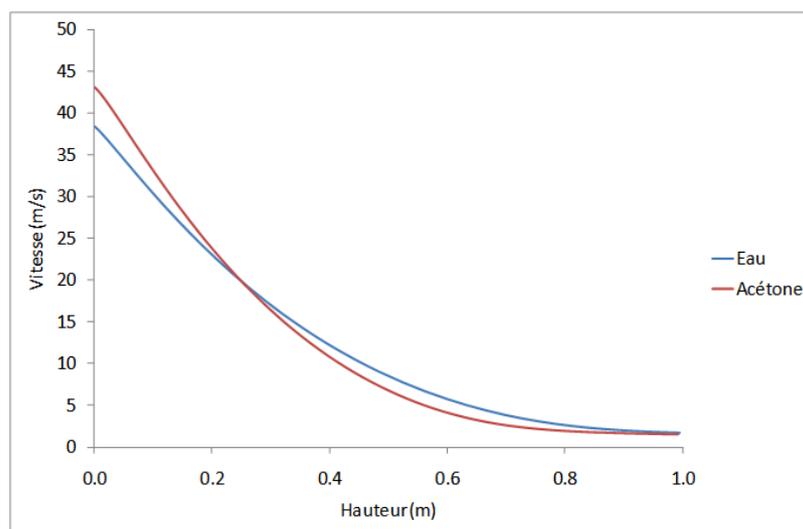


Figure 52 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174.12 µm de diamètre initial) d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 53 représente l'influence de la nature du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.

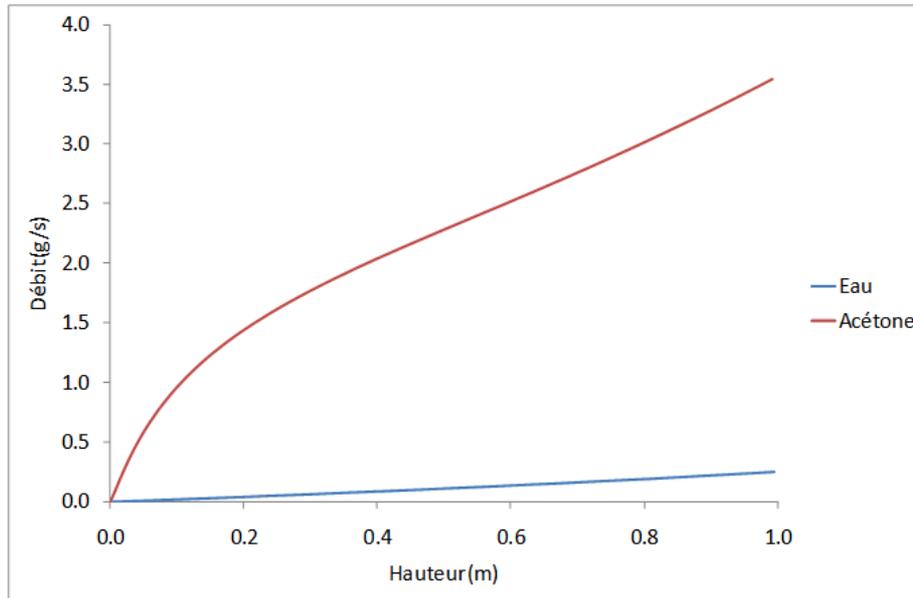


Figure 53 : Influence de la nature du liquide sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 53 montre tout d'abord que le débit massique d'évaporation augmente avec la hauteur de chute quelque soit le liquide. Elle montre également que le débit massique d'évaporation d'un spray d'acétone est plus important que celui d'un spray d'eau.

Influence de la température de la phase gaz

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer l'influence de la température sur un spray de produit évaporant. Pour analyser ce paramètre, le modèle défini précédemment a été testé en faisant varier la température de 20°C à 40°C pour de l'acétone à 400 KPa.

La Figure 54 représente l'influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètres de gouttes (174µm de diamètre) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre qu'une augmentation de la température de la phase gazeuse de 20°C à 40°C entraîne une diminution plus rapide du diamètre de la plus petite classe de gouttes du spray : le diamètre de la goutte diminue de 20% sur une hauteur de chute de 1 m pour une température ambiante de 293 K, alors qu'il diminue de 26% sur une hauteur de chute similaire pour une température ambiante de 313K. Ainsi, comme dans le cas de l'évaporation d'une goutte, l'évaporation est favorisée par une augmentation de la température ambiante. Cependant, cette tendance est moins marquée avec l'augmentation des classes de diamètres de gouttes.

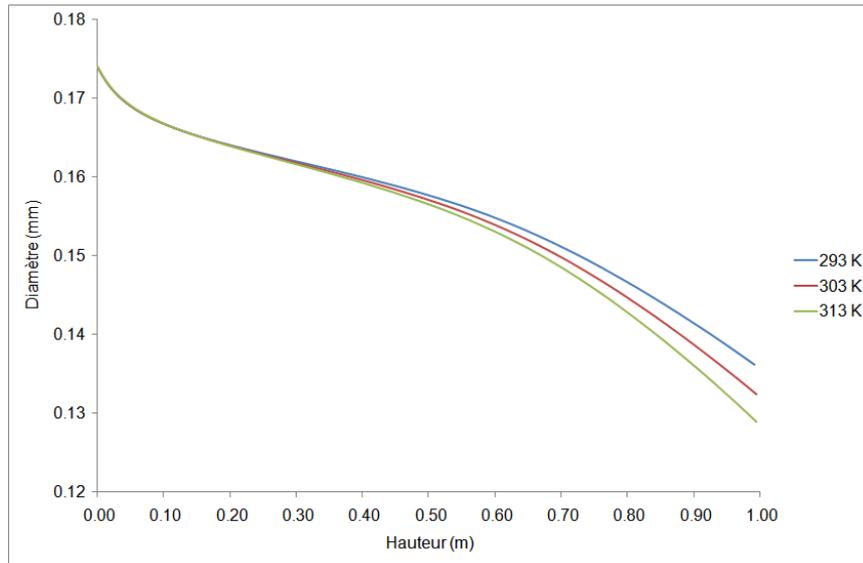


Figure 54 : Influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174 µm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 55 représente l'influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse d'un spray d'acétone.

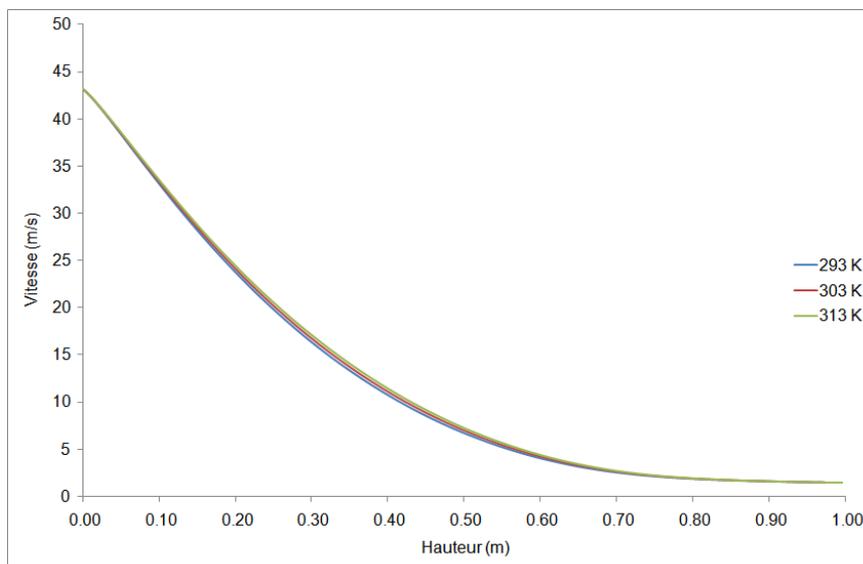


Figure 55 : Influence de la température du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètres de gouttes (174 µm de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 55 montre qu'une augmentation de la température de la phase gazeuse de 20°C à 40°C n'a pas d'influence sur la vitesse des gouttes de la plus petite classe de diamètre de gouttes et que la valeur de la vitesse limite est de 1.49 m/s. Cette tendance est similaire pour toutes les classes de tailles de gouttes.

La Figure 56 représente l'influence de la température ambiante sur le débit d'évaporation massique pour un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa à pression atmosphérique.

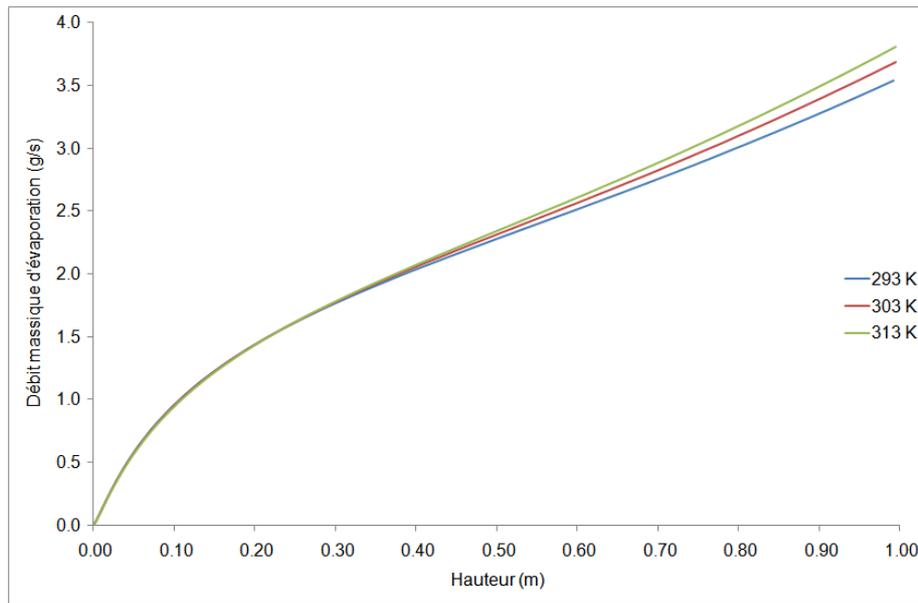


Figure 56 : Influence de la température ambiante sur le débit d'évaporation massique pour un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa à pression atmosphérique

La Figure 56 montre qu'une augmentation de la température ambiante de 20°C à 40°C entraîne une augmentation du débit d'évaporation massique de 3.54 g/s à 3.81 g/s soit plus de 7%. Dans le cas du modèle d'évaporation de gouttes, il a également été remarqué qu'une augmentation de la température ambiante entraînait une augmentation du débit d'évaporation.

Influence de l'humidité

L'objectif de cette partie est de montrer l'influence de l'humidité pour justifier l'augmentation de l'humidité lors des essais dans le dispositif expérimental. La Figure 57 représente l'influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes (174µm de diamètre) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre qu'une augmentation de l'humidité ambiante (de 1% à 4%) n'a pas d'influence sur l'évolution du diamètre de la plus petite classe de diamètres des gouttes du spray. Cette tendance est identique pour les autres classes de diamètres.

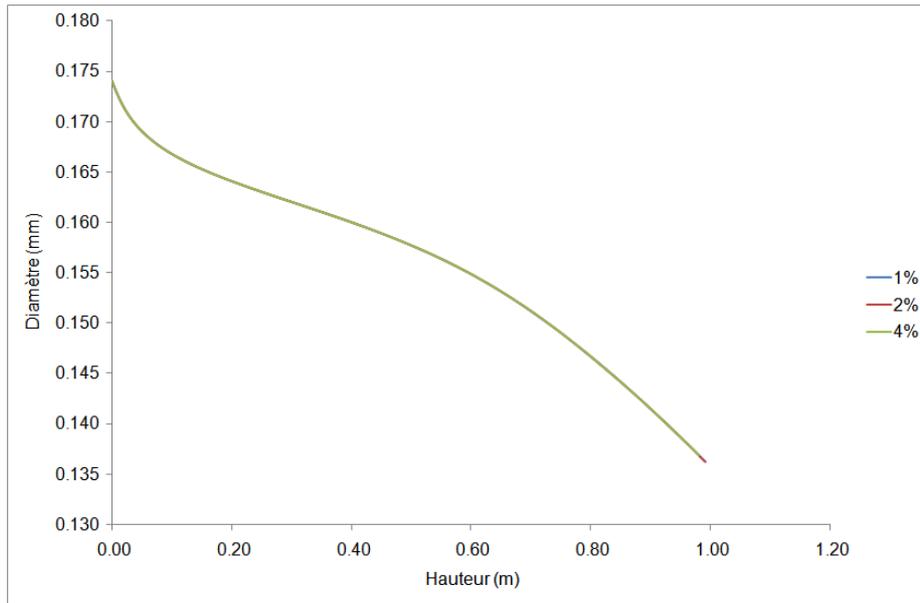


Figure 57 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la plus petite classe de diamètre de gouttes ($174.12 \mu\text{m}$ de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 58 représente l'influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes ($174 \mu\text{m}$ de diamètre) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique. Cette figure montre qu'une augmentation de l'humidité du milieu ambiant de 1% à 4% n'influence pas l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes. Pour chacune des trois valeurs testées, la vitesse limite est de 1.49 m/s. Cette tendance est similaire pour les autres classes de tailles de diamètres.

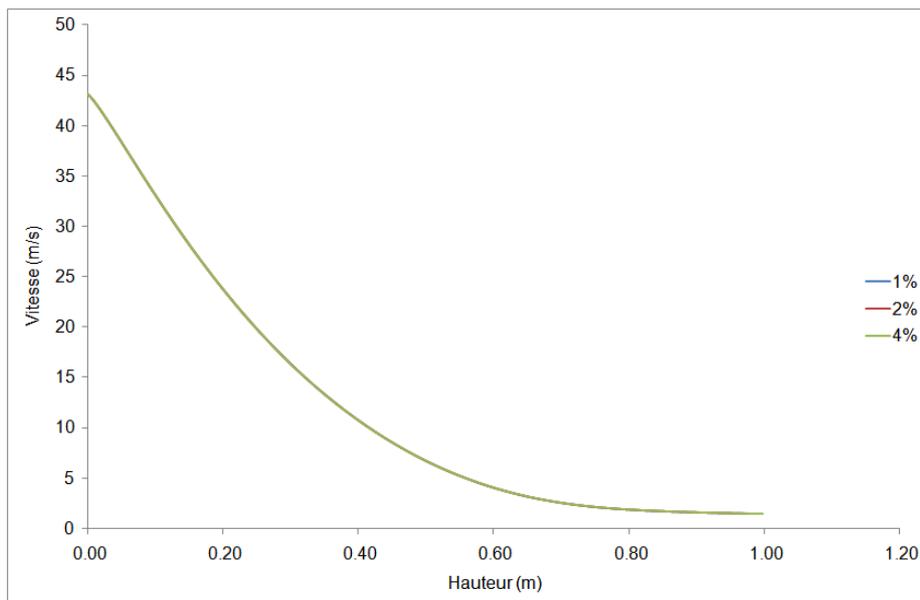


Figure 58 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes ($174 \mu\text{m}$ de diamètre initial) d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 59 représente l'influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.

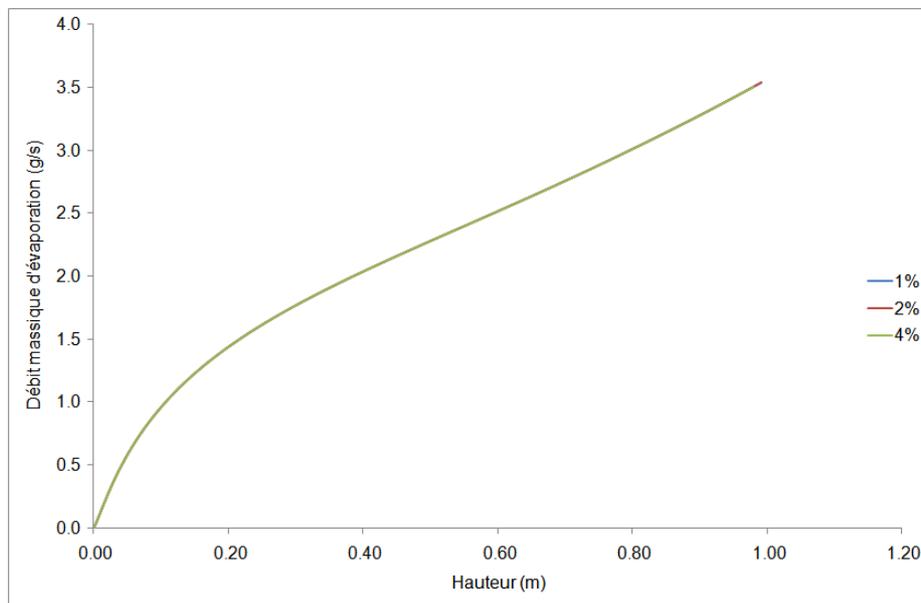


Figure 59 : Influence de l'humidité du milieu ambiant sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'un spray d'acétone pulvérisé avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique.

La Figure 59 montre qu'une augmentation de l'humidité du milieu ambiant de 1% à 4% n'a pas d'influence sur l'évolution du débit d'évaporation massique. Ainsi, de façon générale, l'humidité du milieu ambiant a plus d'influence sur l'évaporation d'une goutte que sur celle d'un spray, au vu des résultats des deux études paramétriques des modèles.

2.4 Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays

L'objectif de cette section est de déterminer la différence entre le modèle d'évaporation d'une goutte simple et le modèle d'évaporation d'un spray. Il s'agit de déterminer si les gouttes d'un spray s'évaporent comme un train de gouttes isolées, dont les tailles sont représentatives des classes des tailles de gouttes du spray, et dans quelles conditions. Si les différences entre les deux modèles ne sont pas significatives, cela peut être plus judicieux d'utiliser un modèle plus simple.

La principale différence du modèle d'évaporation de spray par rapport au modèle d'évaporation de gouttes est la prise en compte de l'entraînement d'air, qui rappelons-le est considéré comme pénétrant dans la pulvérisation perpendiculairement à l'enveloppe dans le modèle ASTRRE. L'objectif est donc de voir s'il y a une influence de l'entraînement d'air sur les résultats obtenus.

Une fois que le domaine de « correspondance » entre le modèle de gouttes et le modèle de sprays est déterminé, il est envisageable d'utiliser le modèle d'évaporation de gouttes présenté précédemment pour déterminer la cinétique d'évaporation d'un spray. La simplicité de ce modèle de gouttes permettra de réduire considérablement le temps de calcul pour déterminer l'évaporation d'un spray.

Les classes de diamètres de gouttes déterminées avec le module ASTRE et leur vitesse initiale deviennent alors des données d'entrée pour le modèle d'évaporation de gouttes.

La Figure 60 compare les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution du diamètre de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μm) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement pressurisé. Cette figure montre que l'écart entre les modèles d'évaporation de spray et de gouttes est supérieur à 10% au-delà de 60 cm de chute. Le modèle d'évaporation de gouttes prédit qu'une goutte d'acétone s'évapore complètement au bout d'1 m de chute, alors que le modèle d'évaporation de spray prédit une diminution du diamètre de la goutte de 20%.

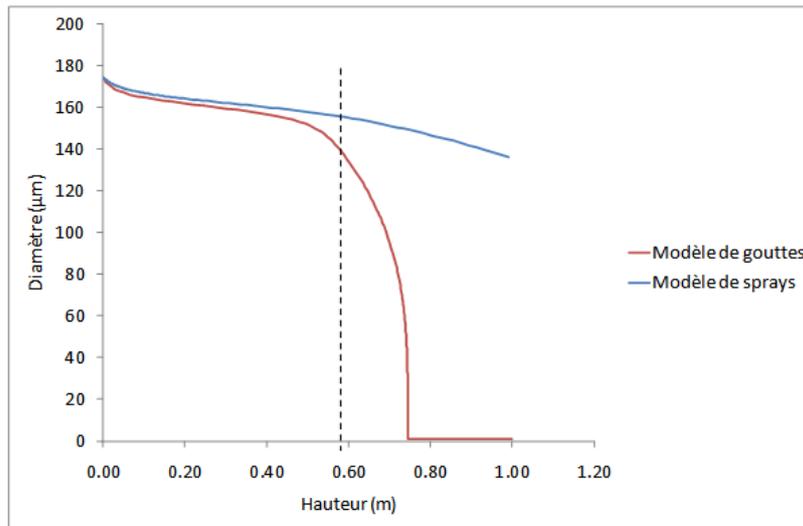


Figure 60 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de spray sur l'évolution du diamètre de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μm) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

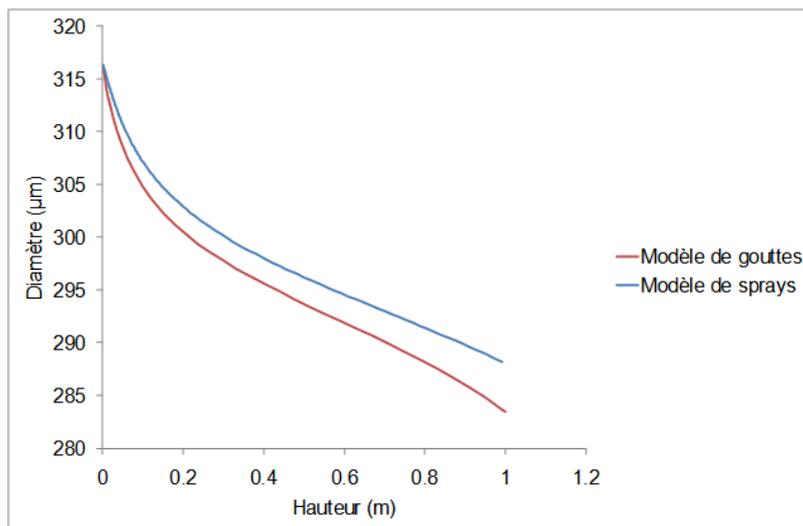


Figure 61 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution du diamètre d'une goutte de 300 μm dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 61 compare les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution du diamètre d'une goutte de 300 μm dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement pressurisé. Cette figure montre que l'écart entre le modèle d'évaporation de gouttes et le modèle d'évaporation de sprays est inférieur à 3 % sur une hauteur de chute de 1m, c'est-à-dire sur la hauteur de chute étudiée dans le cadre de ce travail de thèse. Une évolution similaire a été remarquée pour des diamètres de gouttes supérieurs à 300 μm .

La Figure 62 compare les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μm) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement pressurisé.

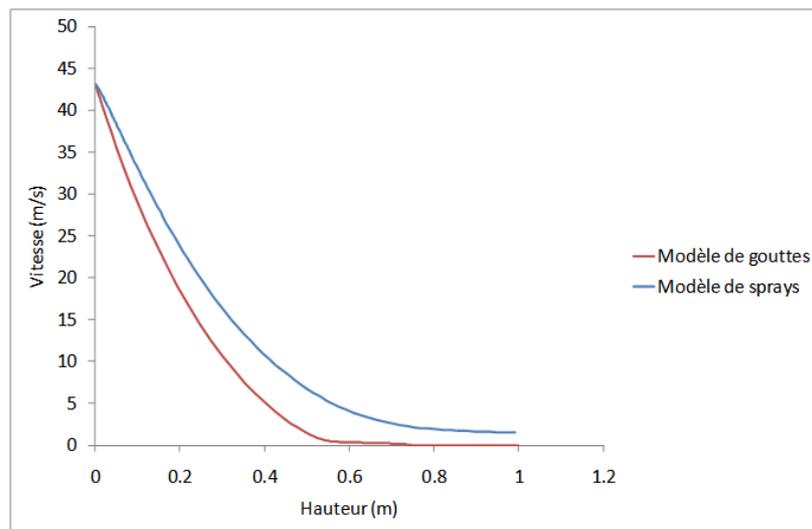


Figure 62 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse de la plus petite classe de diamètre de gouttes (soit 170 μm) dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 62 montre que les deux modèles prédisent une évolution similaire de la vitesse d'une goutte de 170 μm et que l'écart entre le modèle d'évaporation de gouttes et le modèle d'évaporation de sprays est inférieur à 1% (par rapport à la vitesse initiale) sur une hauteur de chute de 1 m, pour une goutte de 170 μm de diamètre.

La Figure 63 compare les modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse d'une goutte de 300 μm dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement pressurisé. Cette figure montre que les deux modèles prédisent une évolution de la vitesse d'une goutte de 300 μm similaire, comme dans le cas d'une goutte de 170 μm , et que l'écart entre les prédictions de ces deux modèles est inférieur à 2% (par rapport à la vitesse initiale) sur 1 m de chute, dans le cas d'une goutte de 300 μm . Une telle évolution de la vitesse et un tel écart entre les modèles a également été trouvé pour des gouttes de diamètres supérieurs à 300 μm .

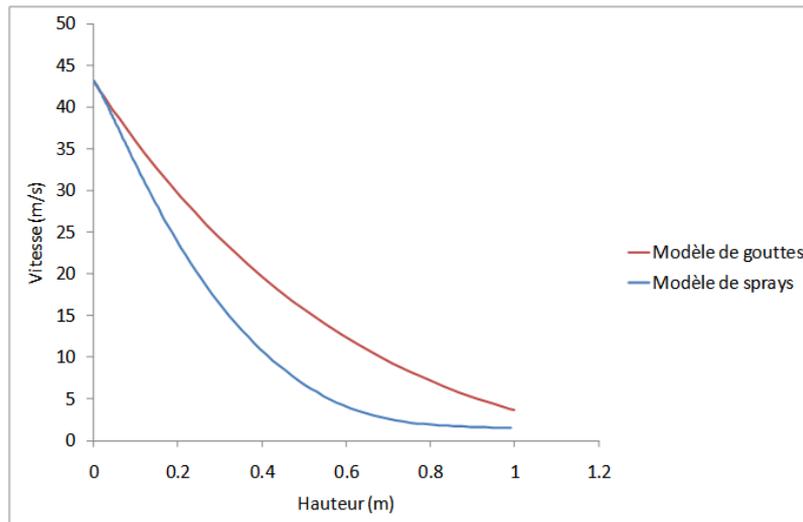


Figure 63 : Comparaison des modèles d'évaporation de gouttes et de sprays sur l'évolution de la vitesse d'une goutte de 300µm dans le cas d'une pulvérisation d'acétone avec une pression relative de 400 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

Ainsi, les modèles de gouttes et de sprays prédisent une évolution du diamètre de gouttes similaire et leur écart est inférieur à 3% pour des gouttes supérieures à 300µm. Par contre, dans le cas de gouttes de 170 µm de diamètre, l'évolution prédite par les deux modèles diffère au-delà de 60 cm de chute et l'écart entre ces deux modèles est supérieur à 10%. En ce qui concerne les prédictions des vitesses, le modèle d'évaporation de gouttes et le modèle d'évaporation de sprays présentent un écart inférieur à 2% pour tous les diamètres de gouttes testés. Comme la principale différence entre le modèle d'évaporation de gouttes et le modèle d'évaporation de spray est l'entraînement d'air, il est envisageable d'associer l'écart entre ces deux modèles à l'influence de l'entraînement d'air. Etant donné que l'écart entre ces deux modèles est inférieur à 3% pour les prédictions de l'évolution du diamètre de gouttes supérieures à 300µm et qu'il est inférieur à 2% pour les prédictions de l'évolution de la vitesse des gouttes pour tous les diamètres testés, **il est possible de considérer que l'entraînement d'air a une influence négligeable sur une hauteur de chute de 1m et pour des gouttes millimétriques, c'est-à-dire pour la hauteur et les tailles de gouttes étudiées dans le cadre de ce travail de recherche.**

2.5 Conclusion

L'étude du comportement de produits pulvérisés dans un environnement à température ambiante pressurisé entre 100 et 600 KPa a nécessité tout d'abord le développement d'un modèle d'évaporation de gouttes. Ce modèle d'évaporation de gouttes n'a jamais été utilisé dans ces gammes de pressions est peu étudiées dans la littérature. Il utilise les hypothèses de la température uniforme, néglige les interactions entre les particules et suppose l'équilibre thermodynamique liquide vapeur à l'interface de la goutte. Rappelons que l'objectif est de développer un modèle simple et robuste qui puisse être utilisé pour étudier l'évaporation d'une pulvérisation de produits chimiques liquides, d'où l'intérêt de ce modèle d'évaporation de gouttes.

Les tailles des gouttes d'une pulvérisation générée suite à une perte de confinement catastrophique dans un local de stockage industriel peuvent atteindre quelques centimètres. L'hypothèse de sphéricité des gouttes est remise en question. Pour tenir compte de la forme des gouttes dans le modèle, une attention toute particulière est portée sur le choix de la corrélation du coefficient de traînée.

L'analyse de sensibilité de ce modèle montre que le choix de la corrélation du coefficient de traînée influence légèrement les prédictions de la vitesse de la goutte (car la goutte est considérée sphérique dans le modèle). L'évaporation d'une goutte isolée en chute libre est favorisée pour un faible diamètre initial, une pression ambiante proche de la pression atmosphérique et une faible concentration en vapeur loin de la surface de la goutte. Une augmentation de la température ambiante favorise également l'évaporation de la goutte, mais pas de façon significative : une augmentation de 20°C entraîne une diminution supplémentaire du diamètre de la goutte de 30 μm . Ainsi, la sensibilité de la technique de mesure doit être de 30 μm par pixel pour permettre la visualisation de la variation de diamètre.

Ce modèle d'évaporation de goutte a également été validé avec des données expérimentales issues de la littérature. Il sous-estime les résultats expérimentaux obtenus avec des gouttes d'acétone de diamètres initiaux inférieurs à 600 μm à pression atmosphérique de 10%. Extrapolé à des pressions de 3 MPa et des températures de 550 K, ce modèle dérive car il ne tient pas compte des effets des gaz réels, mais cette dérive est acceptable dans les premiers instants de l'évaporation. Il est alors envisageable d'étendre les gammes de validité de pressions et de température de ce modèle.

Afin de justifier l'utilisation de ce modèle pour modéliser un spray, l'influence de la prise en compte de l'entraînement d'air a été étudiée. Ce modèle d'évaporation de gouttes a été comparé avec un modèle d'évaporation de spray issu de la littérature et extrapolé à des pressions ambiantes pouvant atteindre 600 KPa. Cette comparaison montre que le modèle d'évaporation de gouttes prédit des diamètres et des vitesses de gouttes proches de ceux prédits par le modèle de spray, dans le cas de gouttes dont le diamètre initial est supérieurs à 300 μm . L'écart entre les prédictions des diamètres n'excède pas 5 μm : cette erreur n'est pas décelable avec les techniques de mesure proposées dans ces travaux. Ainsi, compte-tenu des tailles de gouttes issues d'une perte de confinement catastrophique suite à un accident industriel dans un local de stockage, le modèle d'évaporation de gouttes développé pourrait être utilisé pour les plus grosses gouttes en rajoutant un terme correcteur pour prendre en compte l'entraînement d'air dans le jet. Il pourrait également être extrapolé à une plus grande gamme de pression et de température que celles étudiées dans cette thèse.

3 Chapitre 3 : Approche expérimentale

3.1 Introduction de l'approche expérimentale

Cette troisième partie décrit la méthode d'analyse sur la granulométrie par la visualisation et le traitement de gouttes et de sprays à l'aide de techniques de mesures optiques. Ce chapitre est divisé en trois parties : la première décrit le dispositif expérimental et la seconde la technique de mesure. Enfin, l'effet du confinement du spray sur sa granulométrie est présenté.

Un des objectifs de cette étude est de développer une technique optique et les procédures de calibration pour mesurer des gouttes. Cette méthodologie est inspirée des avancées réalisées dans le domaine de la combustion pour caractériser des sprays dans les chambres à combustion. L'étude propose une procédure de calibration et une technique de mesure, ainsi qu'une approche automatique de détermination de seuil basée sur le gradient de luminosité entre les particules et l'image de fond.

3.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été conçu pour visualiser et caractériser la granulométrie et l'évaporation de gouttes et d'un spray à cône plein dans une atmosphère close et pressurisée entre 100 et 600 KPa en pression absolue à l'aide d'une méthode de diagnostic optique. Ce dispositif est composé d'une veine d'essai et d'un générateur de gouttes ou de sprays ainsi que d'une instrumentation permettant de mesurer les conditions thermodynamiques.

3.2.1 Description de la veine d'essai

La veine d'essai est composée d'une enceinte pressurisée cylindrique en acier noir non traitée de 1.7m de haut et de 15 cm de diamètre intérieur. Cette enceinte est équipée de 6 hublots disposés face à face pour visualiser l'évolution des gouttes. Ce dispositif expérimental permet de simuler une augmentation de pression de 100 et 600 KPa en pression absolue. La pressurisation de la veine d'essai est assurée par un compresseur d'air comprimé ou par une bouteille d'azote (Figure 64 et Figure 65).

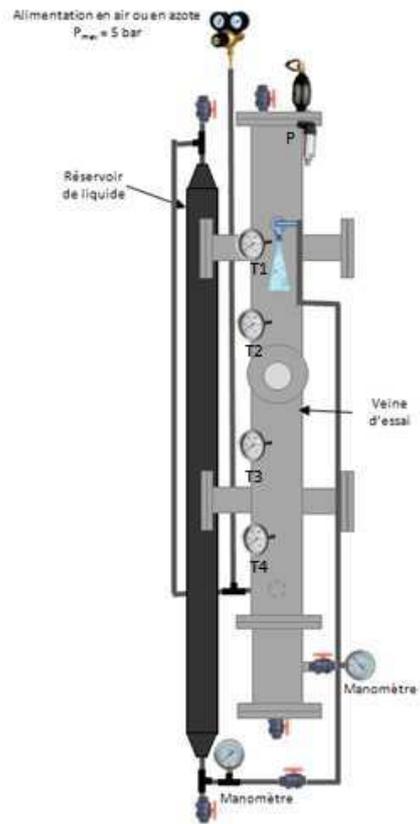


Figure 64 : Schéma du pilote d'étude de gouttes et de sprays

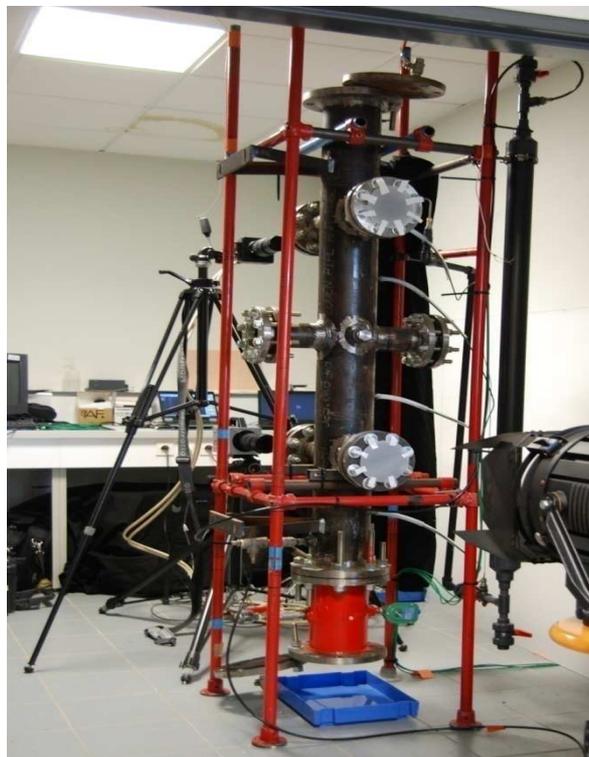


Figure 65 : Photo du pilote

3.2.2 Mesure des conditions thermodynamiques

La mesure des conditions thermodynamiques dans la veine d'essai est assurée par des thermocouples pour les mesures de température et par des capteurs de pression statiques et des manomètres pour les mesures de pression. Ces mesures permettent de déterminer l'évolution des conditions thermodynamiques suite à l'injection de liquide dans la veine d'essai.

Thermocouples

La veine d'essai est instrumentée par 4 thermocouples de type K (Chromel / Alumel de 0.5 mm (TC S.A.) pour mesurer la température à différentes positions le long de la veine d'essai avec une précision de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$.

Capteurs de pression / manomètre

Les mesures de pressions dans la veine d'essai sont assurées par un capteur de pression statique modèle XPM10, développé par FGP Sensors, (Figure 66) et un manomètre. Le capteur de pression mesure la pression en haut de la veine d'essai et le manomètre en bas. Ce manomètre a été étalonné à partir des capteurs de pression.



Figure 66 : Capteur de pression XPM10 FGP Sensors

3.2.3 Liquides étudiés

Les caractéristiques physico-chimiques de divers produits stockés dans l'industrie sont représentées en utilisant des solutions d'eau et de PolyÉthylène Glycol 400 de titre variable afin de faire varier les propriétés physico-chimiques, notamment la tension de surface et la viscosité. L'autre avantage d'utiliser une telle solution est qu'elle respecte le cahier des charges d'hygiène et de sécurité : une caractéristique nécessaire pour pouvoir l'utiliser dans la veine d'essai.

Solution	Tension de surface (mN/m)
Eau	73
PEG 400 10%	32.8

Tableau 7 : Tension de surface de l'eau, des solutions d'eau et de polyéthylène glycol 400 de titre variable et de polyéthylène glycol 400 pur

Le Tableau 7 présente la tension de surface des solutions étudiées à 20°C .

3.2.4 Générateur de gouttes ou de sprays

Le générateur de gouttes ou de sprays est constitué d'un réservoir de liquide et d'une buse de pulvérisation.

Réservoir de liquide

La génération de gouttes ou de sprays est possible grâce à un réservoir supplémentaire de liquide pressurisé à l'air comprimé. Ce réservoir de liquide peut supporter une pression maximale de 600KPa en pression absolue.

Le réservoir de liquide est équipé d'un capteur de pression ou d'un manomètre pour connaître la pression d'injection du liquide et en déduire le débit de liquide.

Buse de pulvérisation

La buse de pulvérisation de liquide située dans l'enceinte pressurisée permet la génération d'un train de gouttes ou d'un spray. Il s'agit d'une buse de pulvérisation LECHLER à cône plein de 45°. La pression d'alimentation de la buse est fixée à 100 KPa au dessus de la pression de la veine d'essai dans le cas du train de gouttes et entre 200 et 600 KPa dans le cas du spray. Pour générer un train de gouttes, la vanne reliant le réservoir de liquide à la buse de pulvérisation est ouverte légèrement manuellement de façon à faire du goutte à goutte.

Dans la suite du document, la pression d'alimentation de la buse et la pression dans le pilote sont exprimées en pressions absolues.

Le débit de la buse est déterminé grâce à la pression relative (ou ΔP) entre le liquide et le milieu ambiant, la densité du liquide et à la section, liée au diamètre d'orifice de la buse. Le diamètre d'orifice de la buse est de 0.85 mm. Pour les liquides de densité différente de 1, le constructeur donne la correction suivante sur le débit (cf. Équation 47 *Chapitre 2 : Modèles d'évaporation*).

3.3 Technique de mesure

3.3.1 Présentation de la technique de mesure optique

Le matériel de mesure utilisée pour cette étude est composée d'une caméra rapide, d'un objectif photographique et d'un logiciel de traitement d'images.

Caméras et objectifs

Deux caméras différentes ont été utilisées pour la procédure de calibration : une caméra Pike-F032B pouvant prendre 200 images/seconde avec une résolution de 640×480 pixels en pleine résolution (Figure 67) et une caméra Fastcam APX 120K (ou Photron SA3) à 2000 images/seconde avec une résolution de 1024×1024 pixels en pleine résolution (Figure 68). Le descriptif technique de la caméra Pike-F032B est disponible en Annexe 1, et celui de la caméra Photron SA3 est disponible en Annexe 2.



Figure 67 : Pike F-032B (200 images/s, 640×480 pixels en pleine résolution)



Figure 68 : Fastcam APX 120K PHOTRON (2000 images/s, 1024×1024 pixels en pleine résolution)

Chacune de ces caméras a été équipée d'un objectif Nikon 105 mm à une ouverture de 2.8 (Figure 69).



Figure 69 : Objectif Nikon 105 mm à une ouverture de 2.8

Système d'éclairage

La technique d'éclairage la plus adaptée est choisie parmi deux techniques disponibles : l'éclairage en réflexion et l'éclairage en transmission. Ces deux techniques d'éclairage ont été testées pour mettre en évidence leur influence sur la mesure de billes de verre calibrées en chute libre. Les schémas suivants illustrent les deux techniques :

- éclairage direct ou en réflexion : un fond favorisant le contexte est situé derrière le phénomène et le phénomène est éclairé par l'avant (Figure 70)

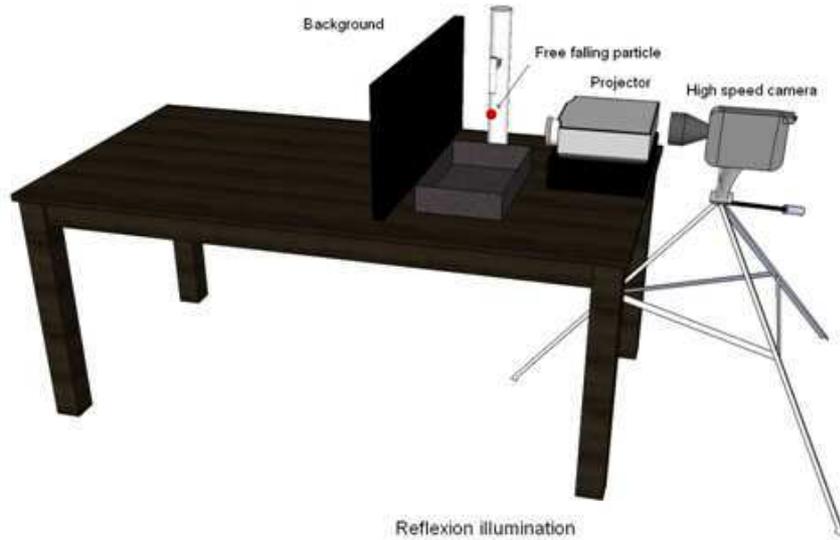


Figure 70 : Dispositif expérimental : Eclairage en réflexion

- éclairage en transmission : un fond diffusant est situé derrière le phénomène à visualisé et le phénomène est éclairé par l'arrière (Figure 71)

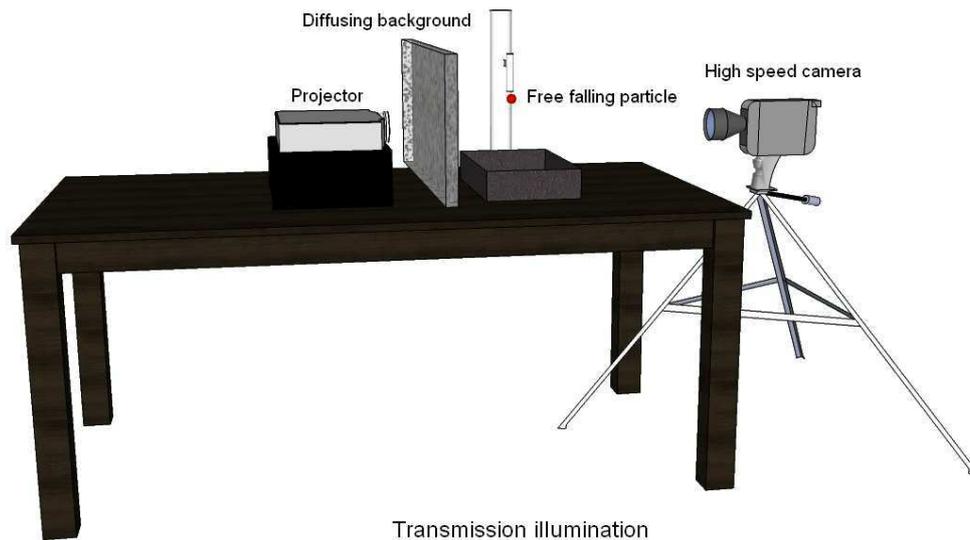


Figure 71 : Dispositif expérimental : Eclairage en transmission

La source d'éclairage utilisée est un projecteur de diapositif KODAK. Un fond diffusant translucide est utilisé pour diffuser la lumière et obtenir un fond plus uniforme.

Un tube en plastique fin est disposé verticalement pour guider la chute des billes de verre ou des gouttes d'eau. Les billes de verre sont lâchées par ce tube et collectées dans un récipient. Les images sont enregistrées avec la caméra Pike-F032B et l'objectif Nikon 105 mm. La lentille a une large ouverture pour produire une faible profondeur de champ. Ce système image la scène située dans le plan focal de la caméra. Plus la particule sort du plan focal, plus le contour devient flou et large (Figure 72).

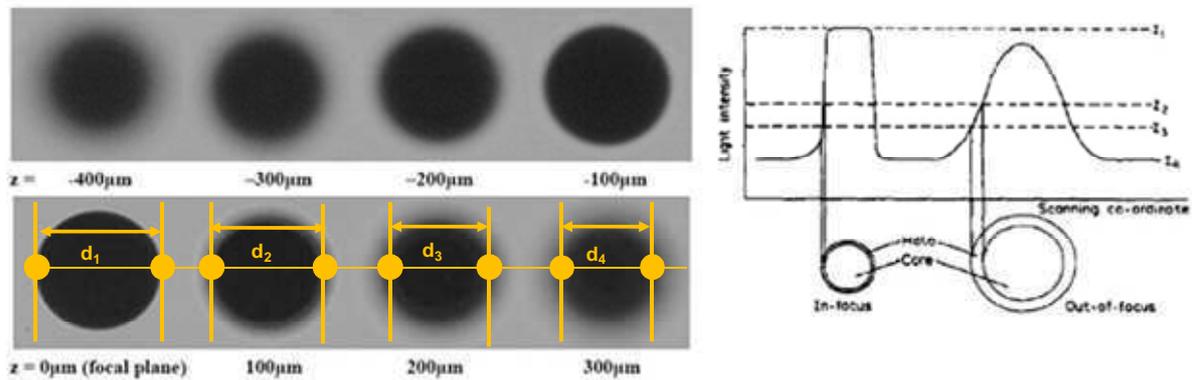


Figure 72 : Illustration de la profondeur de champ sur l'image de la particule (Adapté de Lee et Kim, 2003)

La Figure 72 montre également que pour un même niveau de seuil, le diamètre d_1 est supérieur au diamètre d_2 , qui est lui-même supérieur au diamètre d_3 , qui est lui-même supérieur au diamètre d_4 . Ainsi, le choix du niveau de seuil peut modifier la distribution granulométrique. Il est alors nécessaire de définir un critère de sélection des gouttes suivant leur niveau de mise au point.

Deux distances de travail (distance entre la caméra et le tube) ont été testées : 37 et 90 cm. Dans ces configurations, les résolutions du pixel sont respectivement de $25 \mu\text{m}/\text{pixel}$ et $62.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

Les expérimentations ont été réalisées dans deux configurations différentes : la mesure des particules de référence pour déterminer l'erreur de mesure dans le dispositif expérimental avec éclairage en transmission (Figure 71) et ensuite, l'étude dans le dispositif expérimental de génération de sprays (Figure 64).

Les expérimentations réalisées avec le dispositif expérimental d'études de sprays ont été réalisées avec la caméra Photron FASTCAM-APX 120 K et l'objectif Nikon 105 mm à une distance de travail de 51.5 cm. Ainsi, le facteur d'échelle est de $85.1 \mu\text{m}/\text{pixel}$. Cette distance de travail a été choisie pour permettre l'enregistrement du jet en pleine résolution. La caméra doit avoir une fréquence d'acquisition qui permet de suivre chaque goutte du spray dans le champ d'une image à l'autre. La trajectoire et la taille des gouttes peuvent alors être déduites pour étudier la granulométrie et la vélocimétrie du spray, et ainsi conduire à la cinétique d'évaporation.

Logiciel de traitement d'images

Le logiciel de traitement d'images (MEsure et TRacking d'Objets en Mouvements (METROM)) a été développé dans notre laboratoire sous LabVIEW. Ce logiciel offre de nombreuses fonctionnalités (filtrage, convolutions), mais dans le cadre de cette thèse, il a été utilisé pour fonctionner avec deux opérations de traitement d'images : la soustraction et la binarisation pour caractériser chaque particule de chaque image par sa position, sa taille et sa forme.

Ce logiciel soustrait d'abord une image de référence (image blanche, image minimum ou image moyenne) à partir des images du film pour améliorer le contraste de la scène. Ensuite, il binarise les images et caractérise chaque particule des images binarisées par la position de leur centre de masse (X, Y), sa surface (A), sa hauteur (H), et sa longueur (W) pour un niveau de seuil déterminé par

l'utilisateur. Ce niveau de seuil est un paramètre important car la précision de la mesure du diamètre dépend de cette valeur.

La soustraction d'une image de fond à chaque image à traiter permet d'en éliminer le bruit et de se concentrer uniquement sur le phénomène à étudier. Ensuite, ce logiciel est capable de binariser les images ainsi soustraites à partir d'une valeur seuil définie par l'utilisateur, d'où l'intérêt du choix de cette valeur. Enfin, le logiciel détermine les caractéristiques de la (des) particule(s) détectée(s) sur chaque image seuillée.

Le seuillage est une opération mathématique du traitement d'images. Usuellement, la valeur seuil est déterminée à partir de l'histogramme des niveaux de gris, comme l'a montré l'étude bibliographique (Chapitre 1). L'innovation de cette méthode est de déterminer le niveau de seuil à partir du gradient de luminosité entre les particules et le fond de l'image à partir de quelques lignes traversant la particule.

Détermination du diamètre mesuré

A partir des données obtenues par le logiciel, plusieurs calculs du diamètre sont possibles. Dans notre étude, deux méthodes de calculs du diamètre sont proposées.

Pour la méthode « rectangle » : le diamètre est calculé à partir du plus grand rectangle capable de contenir la particule ; c'est la moyenne de la hauteur et de la largeur de ce rectangle, en pixels, donné par l'Équation 49 :

$$d_{rectangle} = \frac{H + W}{2}$$

Équation 49

Pour la méthode « disque » : le diamètre est calculé à partir de la surface de la particule équivalente à un disque, déterminée par l'Équation 50 :

$$d_{disk} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Équation 50

Ces méthodes donnent un diamètre de particule en pixels. Ce diamètre doit être multiplié par la résolution spatiale du pixel pour obtenir des distances en mètre. La résolution spatiale est la distance représentée par un pixel de l'image. La plupart des études utilisent la méthode « disque » pour déterminer le diamètre de la particule mesuré (Boëdec, 1999 ; Yon, 2003). Un des objectifs de ces travaux de thèse consistent à déterminer si un tel choix est approprié pour notre étude, compte-tenu de la déformation de la goutte. En ce qui concerne la morphologie des particules détectées, le logiciel de traitement d'images détermine automatiquement le facteur de circularité d'Heywood. Le facteur de circularité d'Heywood permet de caractériser la circularité de la forme d'une particule. Il est défini par le rapport du périmètre de la particule sur le périmètre d'un disque de surface équivalente (Équation 51).

$$Hey = \frac{Perim_{particule}}{Perim_{disque_equivalent}}$$

Équation 51

Un cercle parfait a dès lors un facteur de circularité d'Heywood de 1 tandis que celui d'un carré serait de 1.128. Les particules longues ont tendance à avoir un facteur de circularité d'Heywood élevé.

3.3.2 Calibration de la technique de mesure

Avant toute mesure, il a été nécessaire de calibrer la technique optique. Cette méthodologie a été validée pour différentes particules étalonnées : des gouttes d'eau et des billes de verre ont été testées dans une gamme comprise entre 400 μm et 6500 μm , et dans différents dispositifs expérimentaux.

L'objectif de cette partie est de calibrer la technique de mesure optique à une distance de travail inférieure à 1m. Cette méthodologie est inspirée des avancées réalisées dans le domaine de la combustion pour caractériser des sprays d'injection.

L'objectif de ces expérimentations est de déterminer l'erreur de mesure des techniques proposées. Les mesures obtenues avec ces techniques optiques sont comparées avec celles obtenues avec des systèmes calibrés, comme une loupe binoculaire ou une balance de précision.

Particules étalons

Les particules étalons étudiées pour calibrer la technique de mesure sont de 2 types :

- des billes de verre de différentes tailles (Tableau 8),
- des gouttes d'eau calibrées avec une micropipette.

Catégorie	I	II	III	IV	V	VI	VII
Classe de taille (μm)	0 – 50	70 – 110	106 – 212	250 – 425	425 – 600	800 – 1200	6000

Tableau 8 : Classes granulométriques des billes de verre utilisées

Les diamètres des billes de verre ont d'abord été déterminées avec une loupe binoculaire avec rétro-éclairage(ou éclairage en transmission) pour trois classes de tailles : 425 – 600 μm , 800 – 1200 μm et 6 mm. La mesure de référence de chaque bille de verre est une moyenne de trois diamètres déterminés avec la loupe binoculaire (Figure 73).

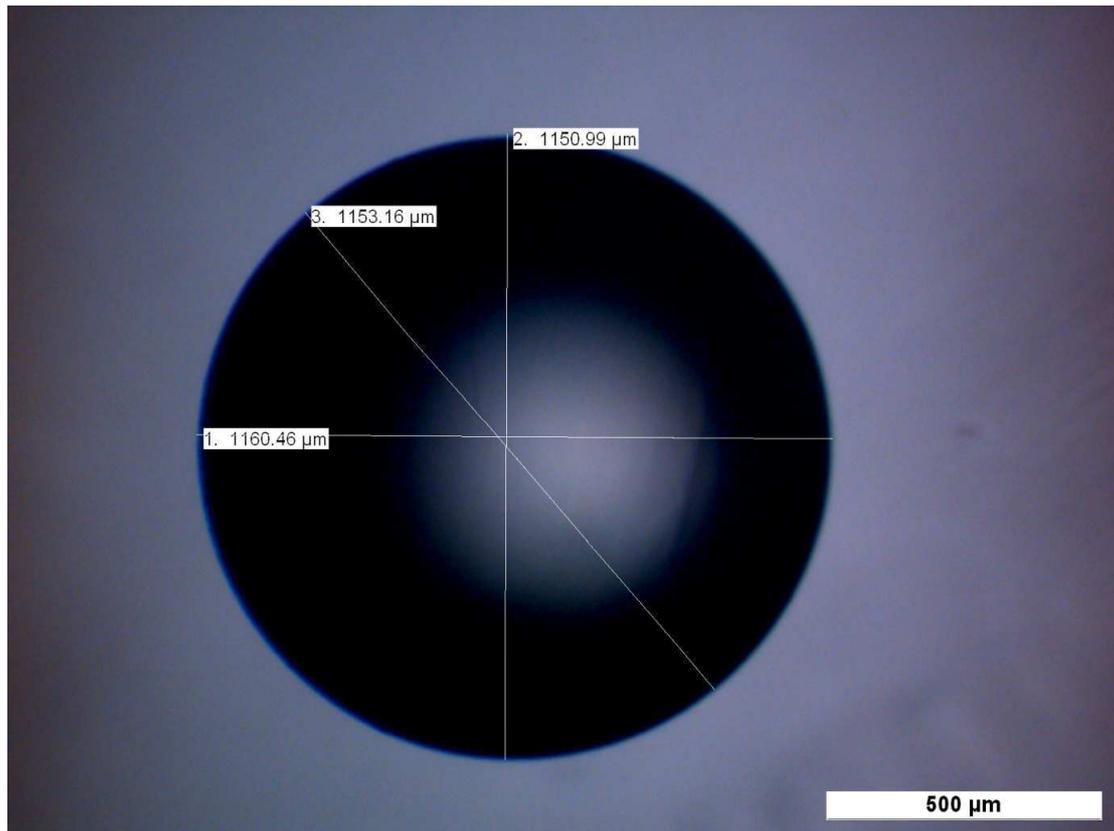


Figure 73 : Détermination du diamètre de référence des billes de verre

Le Tableau 9 donne le diamètre de 14 billes de verre, appartenant aux trois classes de diamètres.

Bille de verre (µm)	432	593	611	612	984	1155	1217	1225	1238	6143	6453	6483	6610	6637
Gouttes d'eau (µm)	2636	2972	4174											

Tableau 9 : Diamètres de référence des billes de verre et des gouttes d'eau testées

Les gouttes d'eau sont calibrées par pesée : pour chaque micropipette, dix gouttes d'eau bipermutées (de densité 1) générées avec la même micropipette ont été pesées avec une balance de précision, la masse mesurée et la densité de la goutte liquide déterminent le volume de référence (Tableau 9). Le diamètre de référence est calculé en assimilant la goutte à une sphère.

L'Équation 52 donne l'erreur de mesure :

$$err = \frac{abs(d_{ref} - d_{mes})}{d_{ref}}$$

Équation 52

Choix de la technique d'éclairage

Afin de mesurer précisément des particules de tailles caractéristiques d'un écoulement diphasique, des essais ont été réalisés pour déterminer la technique la plus adaptée, entre l'éclairage par réflexion (Figure 70) et l'éclairage par transmission (Figure 71).

La première partie de l'étude a consisté à étudier l'influence de la technique d'éclairage sur la visualisation d'un flot de billes de verre en chute libre.

Cette campagne de détermination de la technique d'éclairage la plus adaptée a mis en évidence que la technique d'éclairage direct ne permet pas de visualiser des particules de diamètre inférieur à 250 μm alors que la technique d'éclairage en transmission permettait de visualiser des particules de diamètre inférieur à 50 μm . Par ailleurs, en ce qui concerne le seuillage, il est plus adapté de seuiller une image prise en éclairage par transmission qu'une image prise en éclairage direct. En effet, avec un éclairage en transmission il y a une bonne homogénéité des niveaux de gris de la particule alors que ce n'est pas le cas avec un éclairage direct.

A une distance de travail de 37 cm (Tableau 10) la visualisation de billes de verre inférieures à la classe de taille 250 – 425 μm ne peut pas être atteinte avec la technique d'éclairage en réflexion, alors que la technique d'éclairage en transmission permet de visualiser des billes de verre de classe de taille inférieure à 50 μm , représentées par 1 ou 2 pixels. Il est alors possible d'observer les plus petits diamètres de billes de verre d'une taille inférieure à 70 μm .

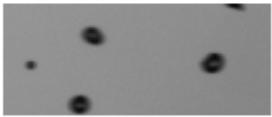
Classe de taille des billes de verre	Eclairage par réflexion	Eclairage par transmission
0 – 50 μm		
250 – 425 μm		
800 – 1200 μm		

Tableau 10 : Influence de la technique d'éclairage sur la visualisation des tailles des billes de verre (distance de travail de 37 cm)

Une bille de verre visualisée avec l'éclairage en transmission a une forme mieux définie et une meilleure uniformité de ces niveaux de gris qu'une bille de verre visualisée avec une technique d'éclairage en réflexion (Figure 74). La Figure 74 montre l'évolution des niveaux de gris le long du diamètre de la particule (ligne en pointillés). Les billes de verre sont représentées par une intensité lumineuse plus homogène avec un éclairage en transmission (Figure 74 b) qu'avec un éclairage en réflexion (Figure 74 a), où plusieurs intensités lumineuses sont représentées. Ainsi, il est plus adapté de seuiller l'image de particules avec la technique de transmission qu'avec la technique de réflexion. La technique par transmission étant a priori plus adaptée pour visualiser la chute de goutte d'eau, celle-ci a été choisie pour la suite de l'étude.

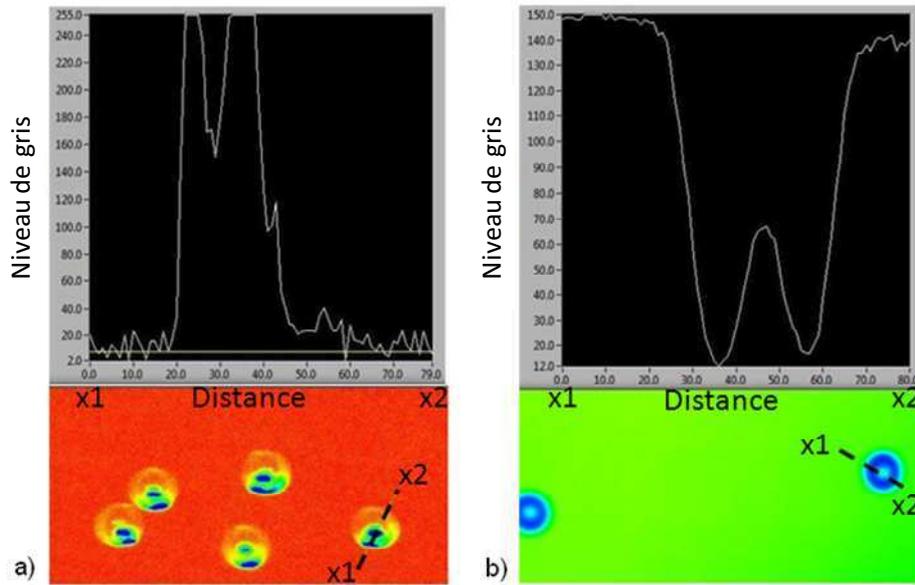


Figure 74 : Comparaison des niveaux de gris des billes de verre enregistrées avec la technique d'éclairage en réflexion (a) et des niveaux de gris des billes de verre enregistrées avec la technique d'éclairage en transmission (b)

Protocole de mesure

Chacune des particules étalons a été filmée durant sa chute. La calibration de la technique de mesure consiste alors à déterminer le niveau de seuil permettant de retrouver les diamètres de références.

A partir d'une image brute (Figure 75a) et d'une image de fond (Figure 75b), il est possible de déterminer une image soustraite (Figure 75c), cette image permet de mettre en évidence la particule en mouvement.

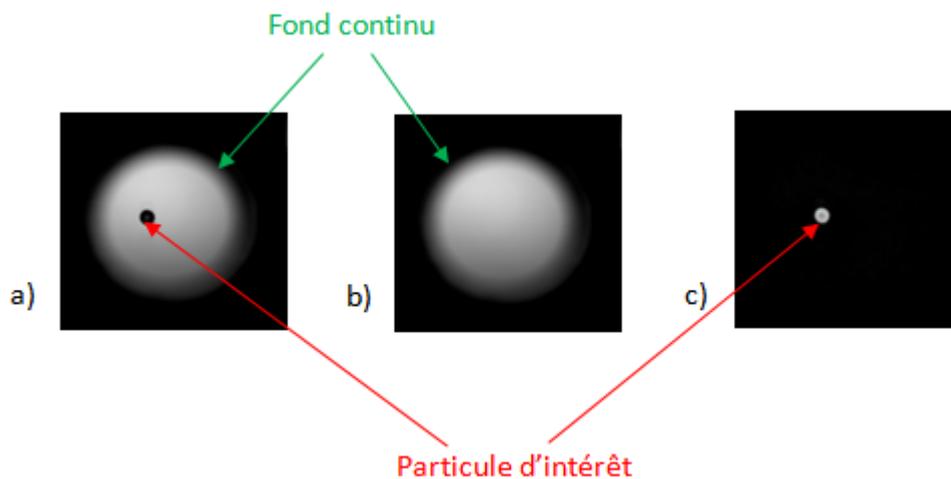


Figure 75 : a) Image brute, b) Image de fond et c) Image soustraite

Les billes de verre et les gouttes d'eau calibrées ont été filmées en chute libre dans différentes configurations expérimentales. L'objectif de cette procédure de calibration est de déterminer le seuil à appliquer dans le traitement d'images pour retrouver les mesures de références. Par conséquent,

chaque image de chaque film d'une bille de verre ou d'une goutte d'eau calibrée a été seuillée avec différentes valeurs afin de déterminer le seuil optimal. Ce seuil est celui permettant de retrouver le diamètre de référence : S_{opt} .

Un algorithme basé sur le gradient de niveau de gris entre le fond et la particule a été développé pour déterminer S_{opt} . Le principe de cet algorithme est de rechercher le segment de courbe ayant la plus grande pente. Le seuil obtenu correspond à la moyenne des niveaux de gris représentatifs de ce segment.

Détermination du niveau de seuil optimal

Le dispositif expérimental d'éclairage en transmission (Figure 71) et le dispositif expérimental d'étude de sprays (Figure 64) ont été utilisés pour réaliser ces expérimentations de calibration. Les billes de verre et les gouttes d'eau calibrées sont lâchées dans chacun de ces dispositifs expérimentaux.

Pour les expérimentations réalisées dans les dispositifs de calibration présentés à la Figure 70 et à la Figure 71, les images des particules en chute libre sont enregistrées avec une fréquence d'acquisition de 370 images par seconde. Ainsi, le temps entre 2 images est de 2.7 ms.

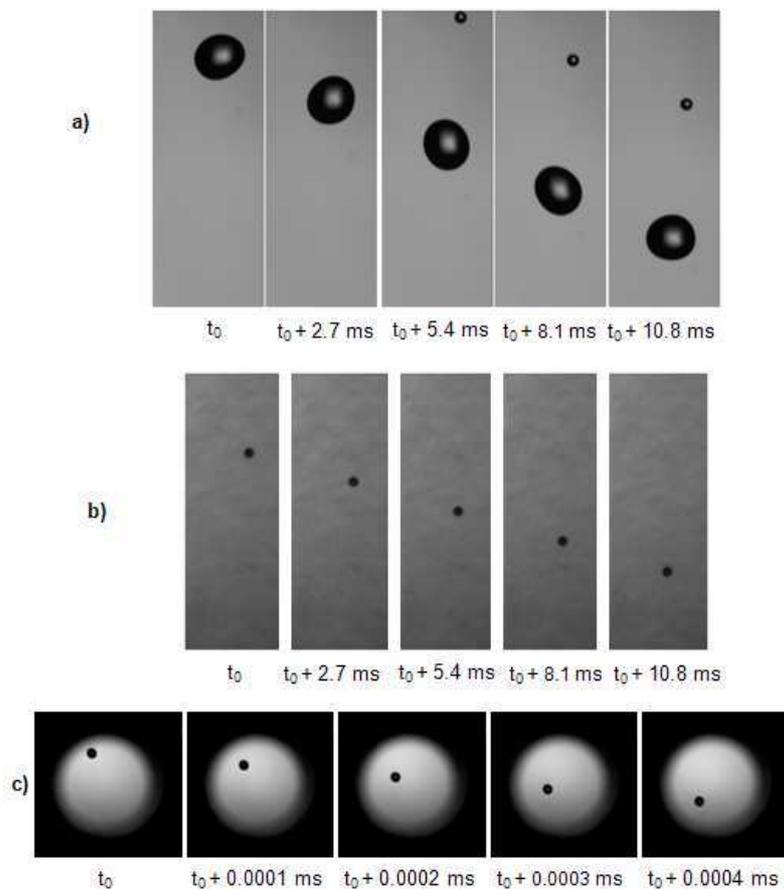


Figure 76 : a) Chute libre d'une goutte d'eau de $2636 \mu\text{m}$ à une distance de travail de 37 cm, b) Chute libre d'une bille de verre de $1150 \mu\text{m}$ à une distance de travail de 8 m, c) Chute libre d'une goutte d'eau de $6637 \mu\text{m}$ à une distance de travail de 51.5 cm.

La Figure 76 montre un exemple de séquences obtenues : a) une goutte d'eau en chute libre de $2636\mu\text{m}$ à une distance de travail de 37 cm, b) une bille de verre en chute libre de $1150\mu\text{m}$ à une distance de travail de 8 m et c) une goutte d'eau de $6637\mu\text{m}$ en chute libre à une distance de travail de 51.5 cm. La fréquence d'acquisition est la même pour les Figure 76 a) et Figure 76 b), mais différent pour la Figure 76 c). Ces images ont été analysées avec différents niveaux de seuils pour obtenir le diamètre optimum. Les diamètres sont calculés à partir de la méthode « disque » et de la méthode « rectangle ». La Figure 77 représente l'évolution du diamètre mesuré en fonction du niveau de seuil pour cinq images consécutives prises avec une fréquence d'acquisition de 2000 images par seconde pour un bille de verre de $6637\mu\text{m}$ à une distance de travail de 51.5 cm.

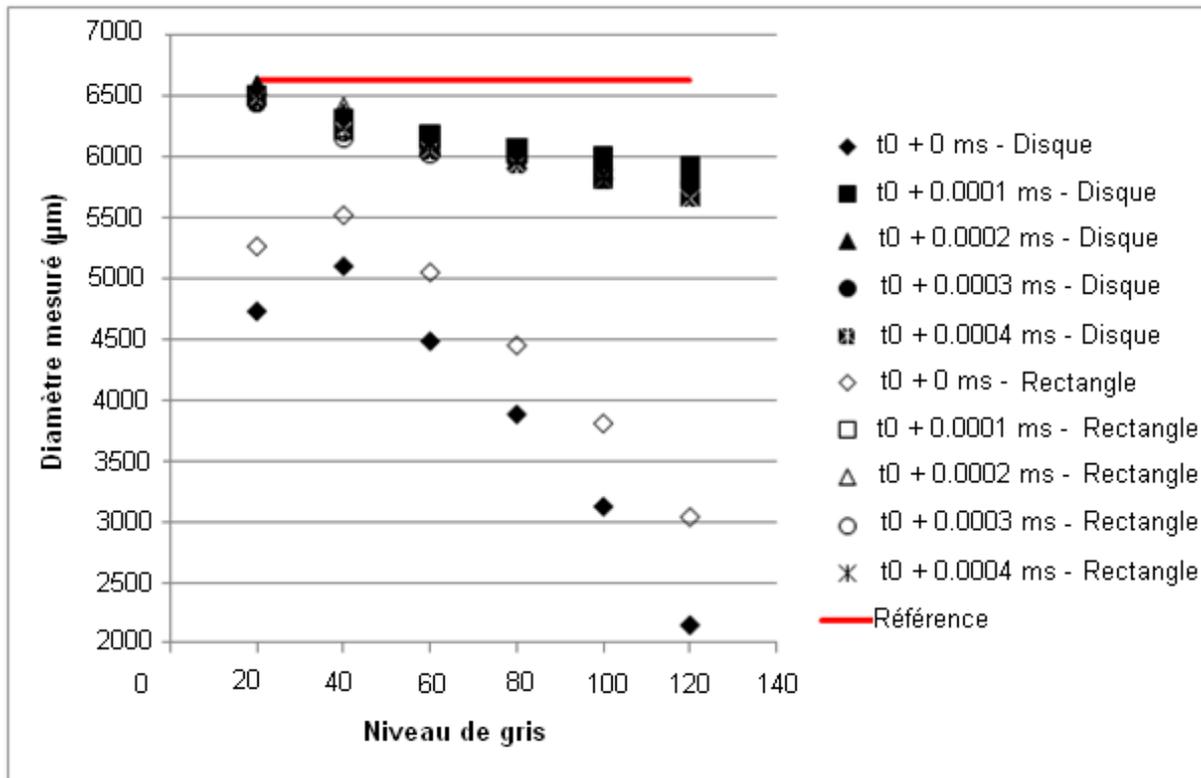


Figure 77 : Evolution du diamètre mesuré d'une goutte en fonction du niveau de seuil – Comparaison des deux méthodes de calcul du diamètre – Distance de travail de 51.5 cm (Diamètre de référence de la bille : $6637\mu\text{m}$)

Cette figure montre que le diamètre mesuré varie avec le niveau de seuil. Un niveau de seuil trop bas surdimensionne la taille de la particule alors qu'un niveau de seuil trop haut érode la particule et sous dimensionne sa taille. Il est alors nécessaire de déterminer le niveau de seuil qui donne la plus faible erreur de mesure : le niveau de seuil optimal. Une telle figure est obtenue pour chaque expérimentation. Ce résultat confirme les résultats de l'étude bibliographique qui montrent que le choix du niveau de seuil influence la taille apparente de la particule (Yon, 2003). Les deux méthodes de calcul de diamètre donnent les mêmes résultats, sauf pour la première image ($T_0 + 0\text{ ms}$), où la méthode « rectangle » donne les meilleurs résultats.

Le Tableau 11 donne pour chaque expérimentation la plus faible erreur de mesure (pour chaque ensemble d'images) et la méthode de calcul du diamètre, produisant la plus faible erreur de mesure. Un seuil optimal doit être obtenu par dichotomie manuelle pour avoir une plus faible erreur de mesure pour chaque expérimentation. C'est pourquoi il est difficile de connaître la méthode la plus

adaptée pour le calcul du diamètre. Cependant, ces deux méthodes de calcul donnent presque la même amplitude sur l'erreur de mesure. Ce tableau montre que l'algorithme proposé permet d'avoir une erreur de mesure généralement inférieure à 6% quelque soit le type de particule, le diamètre de la particule et la résolution du pixel, si le niveau de seuil est adapté. Cependant, si un mauvais seuil apparaît, l'erreur de mesure peut être plus grande. Si un ensemble d'images est seuillé avec le même seuil, différents cas sont possibles :

- Le niveau de seuil est trop bas ou trop haut pour la particule sélectionnée,
- La particule peut être sélectionnée, mais le niveau de seuil n'est pas bien adapté : l'erreur de mesure peut atteindre 25%, si la lumière entourant la particule est uniforme (Figure 78 a)). Cette erreur de mesure peut être bien plus grande si la lumière environnante est moins uniforme (Figure 78 b)).

Type de particule	Diamètre de référence (μm)	Résolution du pixel (μm)	Erreur de mesure minimale (%)	Méthode de calcul du diamètre la plus adaptée
Billes de verre	432	85.5	0.05	Disque
	593	85.5	0.24	Disque
	611	85.5	0.11	Disque
	612	25	0.05	Rectangle
	984	85.5	0.08	Rectangle
	1153	51.6	1.59	Rectangle
	1155	25	1.50	Rectangle
	1217	85.5	1.63	Rectangle
	1238	85.5	3.29	Rectangle
	6143	62.5	0.80	Rectangle
	6453	85.5	5.26	Rectangle
	6483	85.5	0.07	Disque
	6610	85.5	0.19	Disque
6637	85.5	0.15	Rectangle	
Gouttes d'eau	2972	51.6	0.48	Disque
	4174	25	1.21	Disque
	2636	25	0.89	Rectangle

Tableau 11 : Erreur de mesure minimale et méthode de calcul du diamètre la plus adaptée

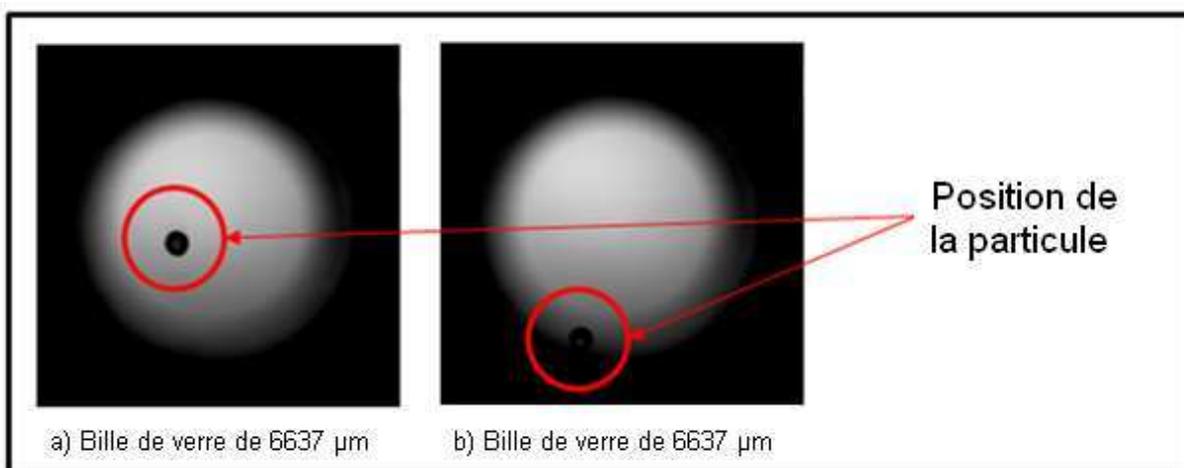


Figure 78 : Influence de la luminosité environnante à la goutte

Ainsi, le seuil optimal doit être changé pendant l'analyse de l'ensemble des images pour avoir la plus faible erreur de mesure sur chaque image. Cela signifie que différents niveaux de seuils doivent être utilisés pour analyser des images consécutives. Un algorithme a été développé pour déterminer le seuil optimal. Cette méthodologie doit être indépendante de la taille de la particule et de l'intensité du fond. En effet, le niveau de seuil optimal et l'erreur de mesure sont liés à l'image analysée. De plus, ces deux paramètres dépendent de la position de la particule dans l'image.

Chaque image du film est soustraite à partir d'une image de référence. Ensuite, les images du film « sans fond » sont obtenues. Ces images soustraites sont ensuite converties en tableau de niveau de gris. Chaque cellule du tableau représente un pixel de l'image soustraite, ainsi, la cellule correspondant à la première ligne et à la première colonne représente les coordonnées (1, 1). Dans ce tableau de valeurs représentant l'image soustraite, l'algorithme cherche la plus haute valeur correspondante au pixel le plus lumineux dans l'image soustraite. L'algorithme enregistre ensuite les valeurs des pixels à partir de ce pixel le plus clair jusqu'aux bords de l'image soustraite. L'évolution de valeurs de ces pixels est alors exprimée en fonction du nombre de pixels traversés par les huit demi-diagonales. La Figure 79 illustre ces mécanismes de recherche.

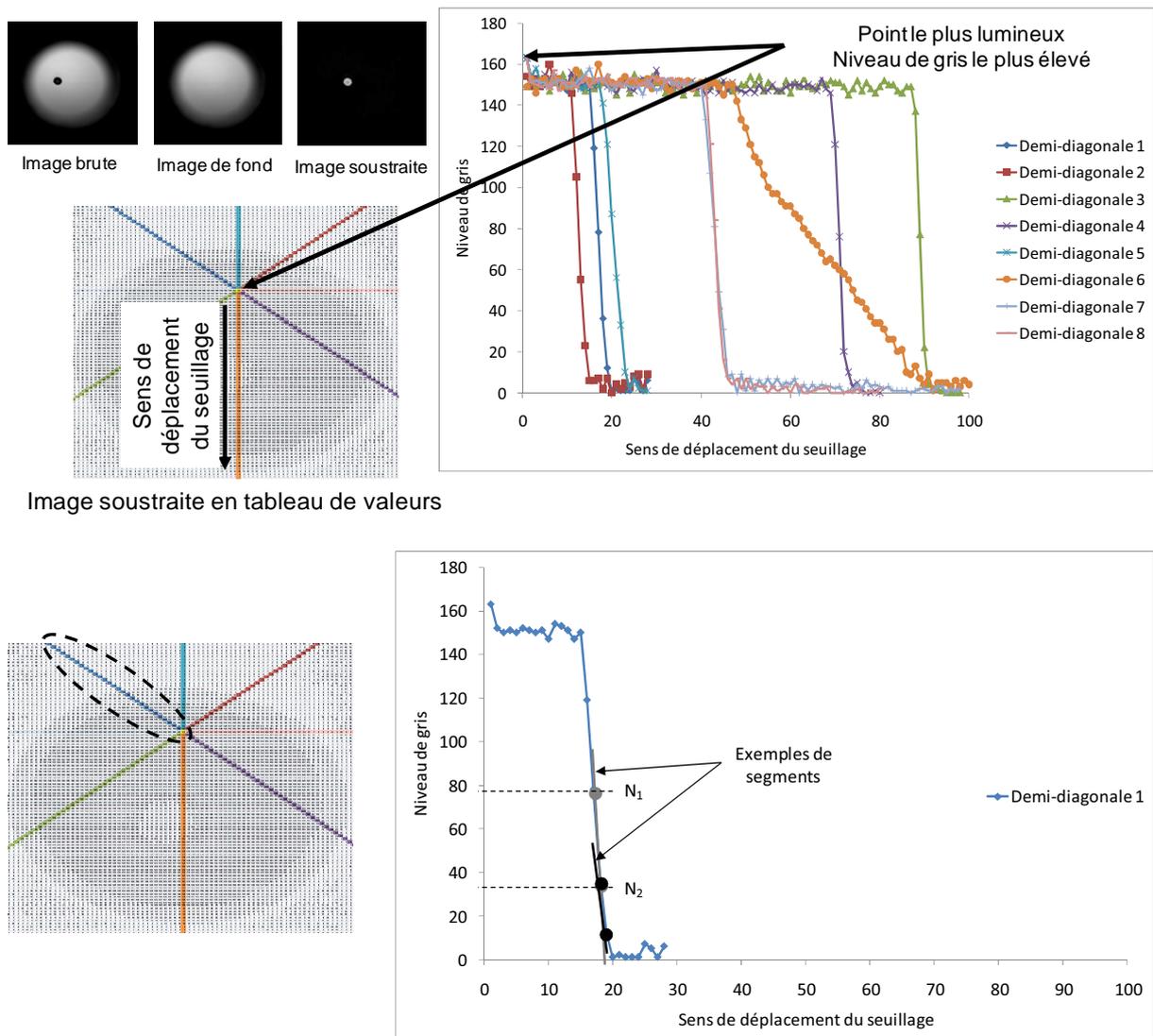


Figure 79 : Détermination du niveau de seuil optimal

Ces huit courbes sont constituées de segments, ou profils de niveaux de gris, relevés le long de chaque demi-diagonale représentée sur l'image soustraite en tableau de valeurs. Chaque segment forme un angle avec l'axe des abscisses. Cet angle est donné par l'Équation 53 :

$$\theta = \frac{180}{\pi} \operatorname{acos} \left(\frac{1}{\operatorname{abs}(N_1 - N_2)} \right)$$

Équation 53

où N_1 et N_2 représentent deux niveaux de gris de deux points successifs sur chaque demi-diagonale.

Tous les angles entre chaque segment de la courbe de l'évolution des niveaux de gris et l'axe des abscisses sont ainsi calculés. La moyenne des deux niveaux de gris (N_1, N_2) est calculée pour l'angle maximal (θ_{max}) de chaque courbe. Comme l'algorithme détermine ces courbes d'évolution du niveau de gris pour 8 demi-diagonales, le niveau de seuil sélectionné pour le traitement d'images est une moyenne de ces huit seuils ainsi déterminés. Ainsi, pour définir le critère de seuillage, on part du pixel le plus clair, supposé faire partie de la goutte la plus contrastée de l'image. Le niveau de seuil optimal déterminé est alors adapté à cette goutte et appliqué à l'ensemble des gouttes de l'image. Les gouttes constituées de niveaux de gris inférieurs à ce seuil optimal ne seront alors pas mesurées. Ce critère de seuillage peut alors permettre de sélectionner les gouttes de l'image selon leur niveau de mise au point.

La meilleure précision est obtenue pour une particule de 400 μm et de 60 μm entre le diamètre de référence et le diamètre calculé à partir des niveaux de seuil déterminés par l'algorithme. Le Tableau 12 compare le seuil optimal déterminé par dichotomie et le seuil optimal déterminé par l'algorithme pour quelques exemples.

Type de particule	Bille de verre	Bille de verre	Goutte d'eau	Bille de verre
Diamètre de référence (μm)	432	984	2972	6637
Facteur d'échelle ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)	85.5	85.5	51.6	85.5
Image	79	65	202	65
Niveau de seuil optimal déterminé par dichotomie manuelle	40 – 55	20	50	40
Diamètre mesuré avec le niveau de seuil déterminé par dichotomie manuelle (μm)	427.53	983.32	3043.90	6626.77
Ecart (Référence / dichotomie manuelle) (%)	0.97	0.09	2.41	0.15
Niveau de seuil optimal déterminé par l'algorithme	84	100	50	111
Diamètre mesuré avec le niveau de seuil déterminé par l'algorithme (μm)	373.68	852.12	3043.90	5514.80
Ecart (Référence / algorithme) (%)	13.44	13.42	2.41	16.90

Tableau 12 : Comparaison entre le seuil optimal déterminé par dichotomie manuelle et le seuil optimal déterminé à partir de l'algorithme

Ce tableau montre que l'écart maximal entre les deux méthodes est inférieur à 7%.

La Figure 80 représente la précision de la mesure en fonction du diamètre de la particule pour une résolution du pixel de 85.5 μm . Cette figure a été obtenue pour 212 mesures et montre que la précision de la mesure augmente avec la diminution de la taille de la particule.

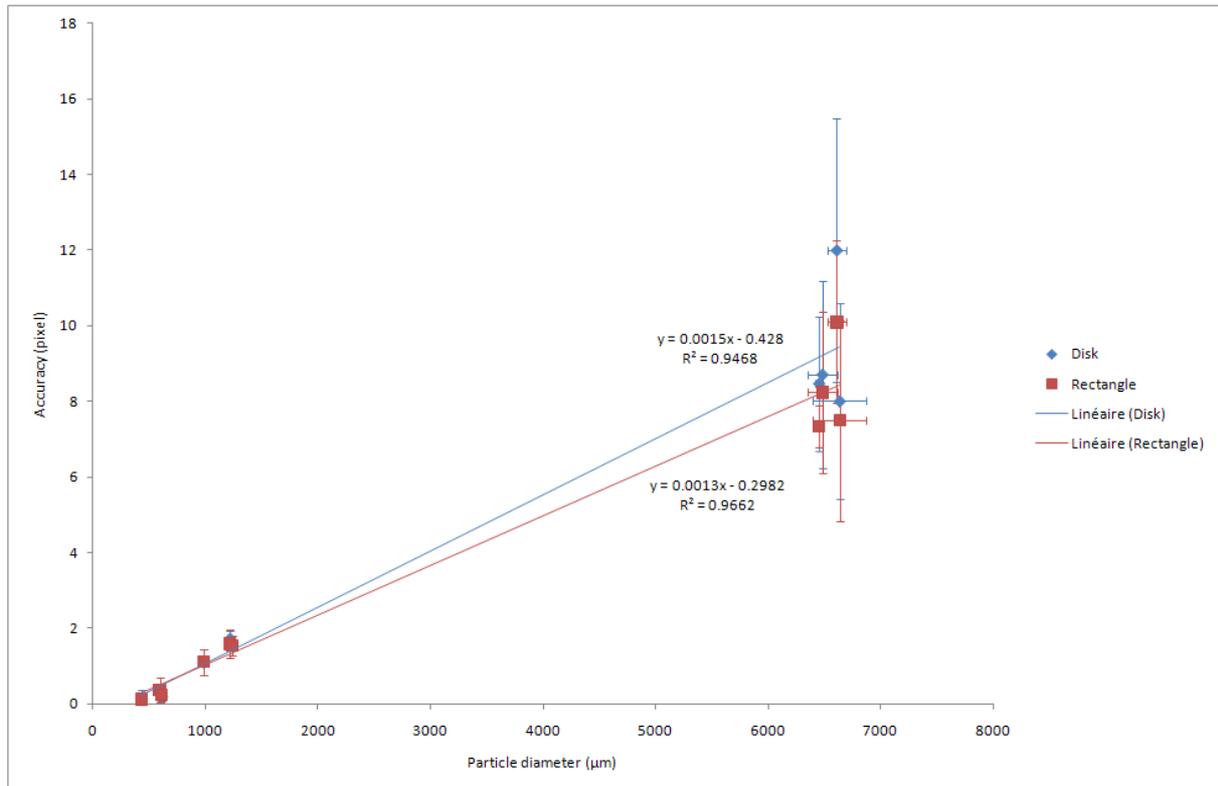


Figure 80 : Précision de la mesure en fonction du diamètre de la particule mesuré pour une résolution du pixel de 85.5 μm et une distance de travail de 51.5 cm

Application de la méthodologie à l'étude d'un spray

Il s'agit à présent d'appliquer cette méthodologie de seuillage à une image de spray. Comme pour le cas des particules étalons, ou encore des gouttes, à partir d'une image brute et d'une image de fond une image soustraite peut être obtenue. La pulvérisation a été faite dans l'enceinte pressurisée avec une buse à cône plein.

Utilisation de la technique de défaut de mise au point

La technique de défaut de mise au point a été utilisée pour obtenir les images : étude d'un jet en 3 dimensions, étude d'un plan dans le jet : les gouttes présentes dans ce plan sont nettes alors que celles prises hors de ce plan sont floues. Lors du traitement d'images, il s'agit d'éliminer les gouttes floues.

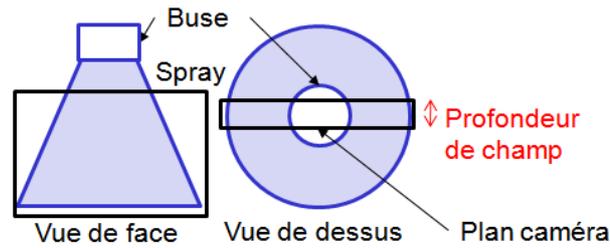


Figure 81 : Illustration de la technique de défaut de mise au point

La Figure 81 présente deux vues de la buse et du spray : une de face et une de dessus. La profondeur de champ est définie comme l'épaisseur du plan de netteté.

Echantillonnage des images

Chaque essai comporte 1000 images environ. Ce nombre étant important, il est alors nécessaire d'échantillonner ces données. Pour qu'une goutte sorte du champ de l'image, 10 images s'écoulent. Par conséquent, 1 image sur 10 est choisie pour obtenir des événements indépendants les uns des autres. Ainsi, un échantillon de 100 images sera analysé pour chaque essai qui compte 1000 images.

Sélection de la zone d'intérêt

La zone de mesure dans le spray est un paramètre essentiel pour valider les mesures. Le choix a été fait de travailler hors champ ligamentaire afin de se concentrer uniquement sur les gouttes. Pour travailler hors champ ligamentaire, on choisit une zone de 4 cm^2 dont le milieu est situé à 6 cm sous le nez de la buse. La profondeur de champ étant d' 1 cm , le volume de mesure est de 4 cm^3 . Afin d'analyser la symétrie du jet, l'ensemble des mesures a été réalisé sur trois zones d'intérêt : le cœur du spray, sa périphérie droite et sa périphérie gauche (Figure 82).

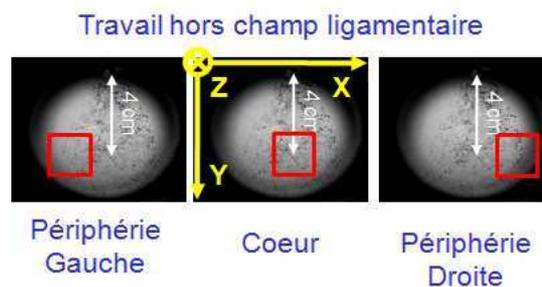


Figure 82 : Détermination des trois zones d'intérêt

Analyse du spray par traitement d'images

Une fois la zone d'intérêt de l'image à traiter choisie, cette zone est convertie en tableau de valeurs. L'algorithme de détermination de seuil est appliqué à cette zone exactement comme dans le cas des gouttes. L'évolution des niveaux de gris est tracée à partir du niveau de gris le plus clair de cette

zone. Un niveau de seuil est alors déterminé. L'ensemble de la zone est alors analysée avec ce niveau de seuil. Ensuite une analyse statistique est faite sur l'échantillon de 100 images.

A partir du graphique donnant l'évolution des niveaux de gris et à partir du pixel le plus clair de la zone d'intérêt, il est possible de voir les pixels de la goutte contenant les niveaux de gris les plus faibles (pixels clairs). En déterminant le niveau de seuil et en le comparant aux niveaux de gris de la goutte contenant le pixel le plus clair, on peut déterminer les niveaux de gris de la goutte qui ne seront pas sélectionnés lors du traitement d'images.

3.3.3 Influence du niveau de seuil

La méthode pour déterminer le niveau de seuil doit être validée avant de présenter les résultats. La Figure 83 présente l'influence du niveau de seuil utilisé lors du traitement d'images sur la distribution granulométrique obtenue dans le cas d'une pulvérisation d'eau dans une enceinte pressurisée à 200 KPa avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa. Les mesures ont été faites au cœur du jet.

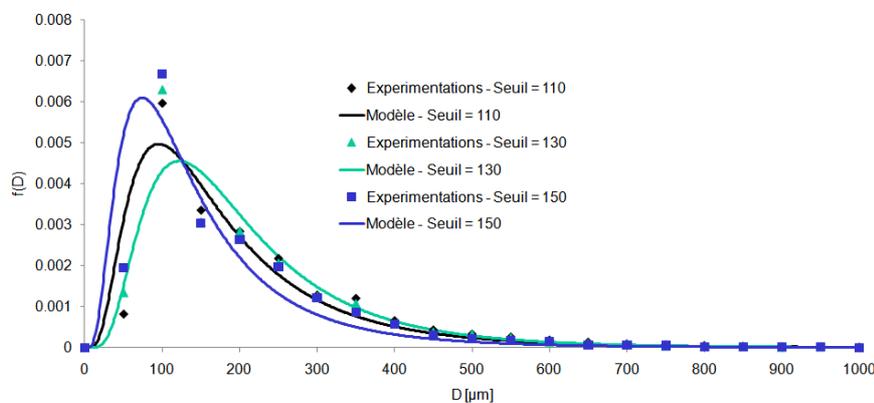


Figure 83 : Influence du niveau de seuil sur la distribution granulométrique du spray - Pression dans le pilote de 200 KPa - Pression d'alimentation de la buse de 400 KPa Centre du jet - Largeur de classe de 50 µm – Modèle log-normal

Cette figure ne représente pas les écart-types pour être plus lisible. Si on regarde uniquement les expérimentations, le niveau de seuil choisi a une légère influence sur la granulométrie du spray : Pour la classe de gouttes la plus représentée, le seuillage des images avec un niveau de seuil de 130, au lieu d'un niveau de seuil de 110, augmente de 8% la quantité de goutte de cette classe de diamètre. Dans le cas du contexte de notre étude, plus le niveau de seuil est bas, plus la population de petites gouttes est sous-estimée et plus la population de grosses gouttes est surdimensionnée. A contrario, plus le niveau de seuil est élevé, plus la population de petites gouttes est surdimensionnée et plus la population de grosses gouttes est sous-dimensionnée.

Au regard des modèles, qui tiennent compte de la répétabilité des essais, La différence entre les distributions granulométriques est notable, le pic de la distribution peut diminuer de 30%. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser un niveau de seuil adapté pour déterminer la distribution granulométrique la plus représentative/précise et ainsi éviter au maximum les erreurs sur le calcul du débit d'évaporation.

3.3.4 Influence de la largeur de classe

L'influence de la largeur de classe sur la distribution granulométrique a également été étudiée. La Figure 84 représente l'influence de ce paramètre lors de la modélisation d'une distribution granulométrique au centre d'un jet obtenu avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa. Les largeurs de classe testées et présentées sur la Figure 84 ne sont pas choisies arbitrairement : la largeur de classe de 75 μm correspond à la résolution du pixel, la largeur de classe de 151 μm correspond à deux fois cette résolution du pixel et la largeur de classe de 226 μm à trois fois la résolution du pixel.

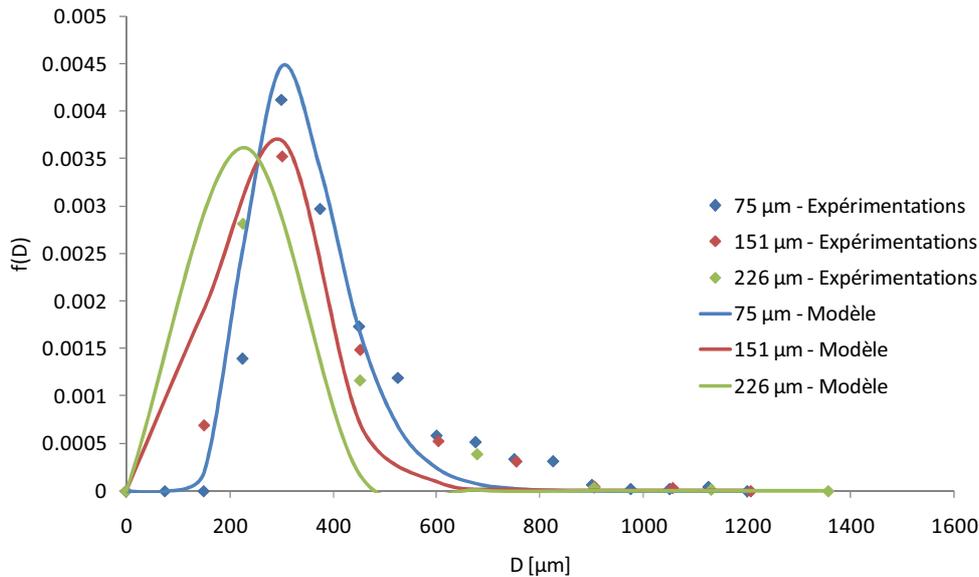


Figure 84 : Influence de la largeur de classe sur la distribution granulométrique sur une distribution granulométrique au centre d'un jet obtenu avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa – Modèle log-normal

La Figure 84 montre que le choix de la largeur de classe utilisée pour modéliser les distributions granulométrique est important. Si on fait varier la largeur de classe, la modélisation n'est pas du tout la même. La variation sur le pic de la distribution est proche de 40% lorsque la largeur de classe varie de 75 à 226 μm . Ce pic ne correspond plus à la même classe de diamètre selon la largeur de classe obtenue. Par ailleurs, plus la largeur de classe est élevée, moins la distribution granulométrique est précise, car les classes de diamètres de gouttes deviennent trop importantes.

Cette figure montre clairement que la modélisation de la distribution granulométrique avec une largeur de classe correspondant à la résolution du pixel est satisfaisante. Pour étayer ce point de vue, la somme de la différence des intégrales au carré a été appliquée entre la distribution expérimentale et sa modélisation. Les résultats sont disponibles dans le Tableau 13.

Largeur de classe (μm)	Somme de la différence des intégrales au carré
75	0.0135
151	0.0565
226	0.0916

Tableau 13 : Influence du choix de la largeur de classe sur la modélisation des distributions granulométriques

Ce tableau confirme le résultat selon lequel la classe de $75\mu\text{m}$ est la plus adaptée pour minimiser la différence entre le modèle et les expérimentations.

3.3.5 Protocoles expérimentaux

Lors de ce travail de recherche, deux protocoles expérimentaux ont été mis au point : un pour l'étude des gouttes et un pour l'étude des sprays.

Protocole expérimental pour les gouttes

Le dispositif expérimental utilisé pour caractériser les gouttes est présenté à la Figure 85. Le dispositif expérimental utilisé pour étudier des gouttes en chute libre est identique à celui présenté à la Figure 64 et à la Figure 65. L'acquisition rapide d'images en éclairage par transmission est assurée par 2 caméras Photron. Ces 2 caméras, complétées de 2 objectifs Tamron mesurent 2 champs distants d'une hauteur d'environ 85 cm. La distance de travail est de 1 m pour chacune de ces deux caméras. Deux projecteurs situés de l'autre côté du pilote permettent l'éclairage en transmission. Deux fonds diffusants permettent d'uniformiser la lumière des projecteurs pour ne pas saturer les capteurs des caméras.

Le premier champ visualisé se situe entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse et le second entre 88 et 91 cm, comme le montre la Figure 86. Ce champ de 9 cm^3 est représenté par 1024 pixels en hauteur et en largeur, soit une résolution de $30\mu\text{m}/\text{pixel}$ environ.



Figure 85 : Dispositif expérimental d'étude de gouttes en chute libre

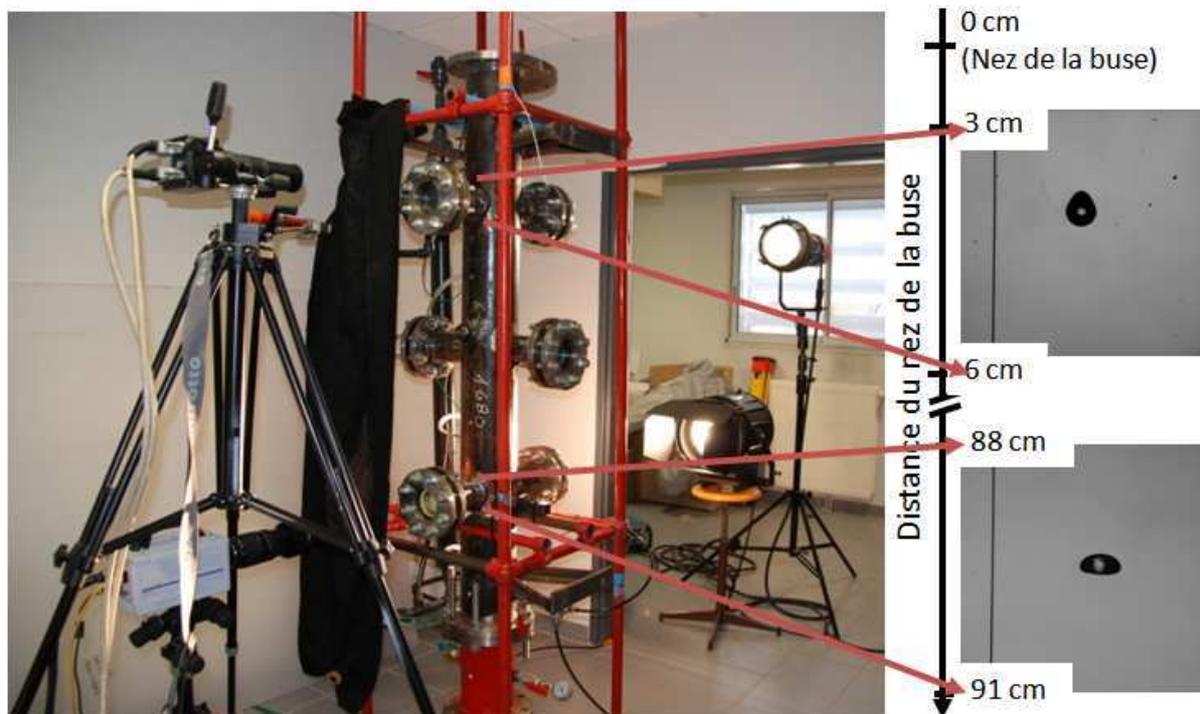


Figure 86 : Visualisation des deux champs pour l'étude de gouttes en chute libre

Des essais ont été réalisés avec 3 solutions différentes : l'eau, l'éthanol et l'acétone. Ils ont été réalisés à 6 pressions différentes : 100, 200, 300, 400, 500 et 600 KPa. Chaque essai a été répété 5 fois de suite. Ainsi, 90 essais ont été réalisés et l'influence de différents paramètres a été étudiée sur la granulométrie et l'évaporation d'un train de gouttes : l'influence de la nature du liquide, l'influence de la pression dans la veine d'essai et l'influence de la taille initiale de la goutte.

Le protocole expérimental est le suivant :

- Remplissage du réservoir de liquide avec la solution à étudier (1 L),
- Pressurisation du réservoir de liquide et de la veine d'essai à la pression ambiante souhaitée,
- Fermeture de la vanne reliant le réservoir de liquide à la veine d'essai,
- Pressurisation du réservoir de liquide jusqu'à atteindre la pression d'alimentation souhaitée (100 KPa de plus que la pression ambiante dans le cas de l'étude des gouttes).

Une fois les films enregistrés, chaque image est soustraite à une image de fond du film correspondant, son niveau de seuil est déterminé avec l'algorithme de détermination de seuil. Les mesures de tailles de gouttes sont ensuite multipliées par la résolution spatiale, une fois la méthode de calcul du diamètre déterminée. Ainsi, on obtient l'évolution du diamètre de chaque goutte d'une image à l'autre.

Protocole expérimental pour les sprays

Pour caractériser les sprays, le dispositif expérimental est très proche de celui utilisé pour caractériser les gouttes (Figure 64 et Figure 65) mais avec une seule caméra (Figure 86) munie d'un objectif Nikon 105 mm ouvert à 2.8 mm mais pas en position macro. En effet, il a été choisi d'étudier le spray en pleine résolution pour caractériser le temps d'établissement du régime permanent, d'une part, et la zone du spray à étudier, d'autre part. De plus, l'angle de pulvérisation de la buse étant de 45°, la pulvérisation de liquide frappe les parois du pilote au-delà de 18 cm sous le nez de la buse, rendant inexploitable des mesures effectuées à 1 m sous le nez de la buse. Le champ visualisé est situé entre 2 et 7 cm sous le nez de la buse. Lors de ces essais, comme lors des essais réalisés avec les gouttes, il a été rencontré une limite du système d'éclairage : l'intensité lumineuse des spots a généré un chauffage de l'air ambiant du pilote, de 20°C en début de journée d'essai à 40°C en fin de journée d'essai. Nous conseillons, en cas d'étude de longue durée d'utiliser des sources froides type LED si ces systèmes peuvent générer des flux lumineux équivalents.

Le point de mesure est proche de l'injection (entre 2 et 7 cm sous le nez de la buse). Le champ visualisé mesure 7 cm de longueur et 7 cm de largeur (Figure 87) et est représenté par une matrice de 1024 pixels de hauteur et de côté, soit une résolution de 70 μm par pixel. Pour des raisons de sécurité seules les solutions d'eau et d'eau et de PEG 400 à 10% ont été testées dans ces conditions.

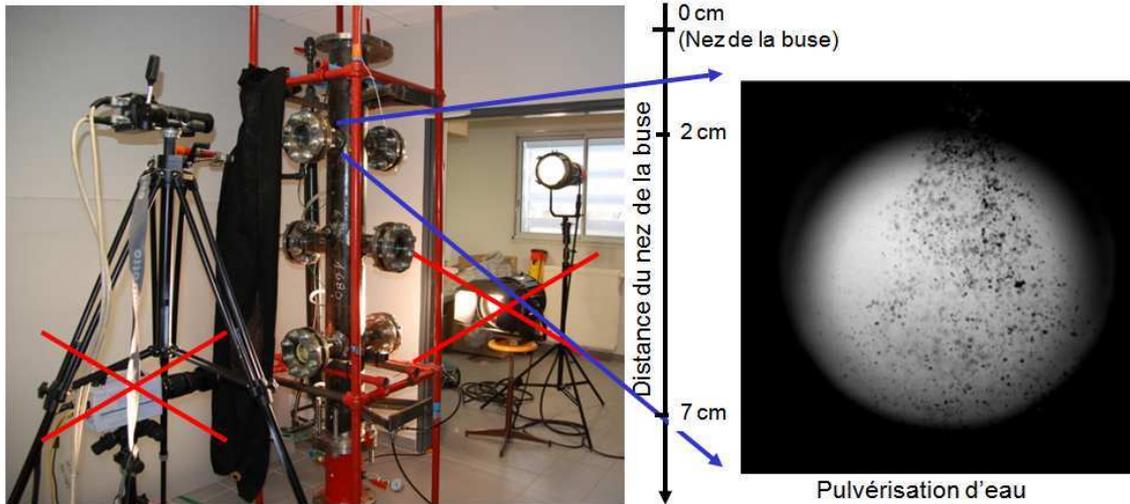


Figure 87 : Représentation du champ visualisé pour les essais de sprays

Les essais ont été réalisés aux mêmes pressions que pour la caractérisation des gouttes, sauf pour la pression de 600 KPa. En effet, contrairement à la caractérisation des gouttes où la pression d'alimentation de la buse était réglée pour faire du goutte à goutte, diverses pressions d'alimentation de la buse ont été testées. Par conséquent une pression relative a du être ajoutée à ces pressions ambiantes, tout en respectant la règle de sécurité suivante : la somme de ces 2 pressions ne devait pas dépasser 600 KPa. Chaque essai a été répété 3 fois de suite : 120 essais ont été réalisés.

Plusieurs paramètres ont été testés pour mesurer la granulométrie et l'évaporation d'un spray : l'influence de la nature du liquide, l'influence de la pression dans la veine d'essai et l'influence de la pression d'alimentation de la buse.

La caractérisation des gouttes dans le spray se fait grâce au protocole expérimental suivant :

- Remplissage du réservoir de liquide avec la solution à étudier (5 L),
- Pressurisation du réservoir de liquide et de la veine d'essai à la pression ambiante souhaitée,
- Fermeture de la vanne reliant le réservoir de liquide à la veine d'essai,
- Pressurisation du réservoir de liquide jusqu'à atteindre la pression d'alimentation souhaitée.

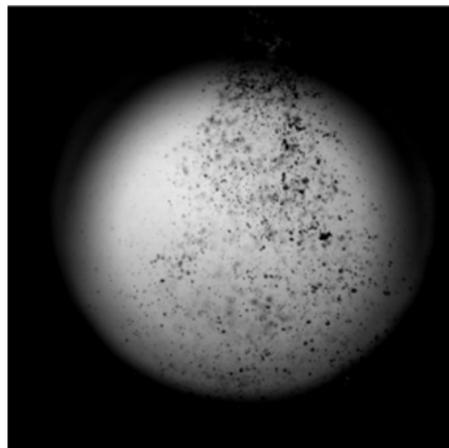


Figure 88 : Image de pulvérisation de spray obtenue

La Figure 88 est un exemple d'images de pulvérisation de spray obtenue. Différentes zones sont distinctes sur cette image, une zone ligamentaire, située sur la partie supérieure de l'image, correspondant à l'atomisation primaire. La zone située dans la partie inférieure du jet correspond à l'atomisation secondaire. On distingue également des gouttes floues et des gouttes nettes. Ces images sont traitées comme expliqué au paragraphe 3.3.2 *Calibration de la technique de mesure*.

3.4 Etude de l'effet du confinement sur la granulométrie du spray

Les locaux de stockage industriel sont de dimension variable et la surpression générée à l'intérieur suite à une explosion dépend de l'intensité de l'accident initial. Pour la réalisation d'expérimentations représentatives à l'échelle de laboratoire, une veine d'essai de faible diamètre intérieur (15 cm) a été utilisée pour tester différentes pressions ambiantes. Cependant, il est légitime de se demander si le fait d'étudier le spray dans une veine d'essai d'une telle section a une influence sur la granulométrie du spray.

Des essais ont alors été réalisés pour caractériser l'effet du confinement du spray dans la veine d'essai sur la granulométrie du spray. Ces essais ont été réalisés à l'air libre, dans les mêmes conditions que celles utilisées dans le pilote, avec de l'eau, pour 3 pressions d'alimentation de la buse différentes : 200, 500 et 600 KPa (en pression absolue) et ont été répétés 3 fois chacun.

La Figure 89 compare les distributions granulométriques obtenues en champ libre et en champ confiné dans le cas d'un spray d'eau pulvérisé.

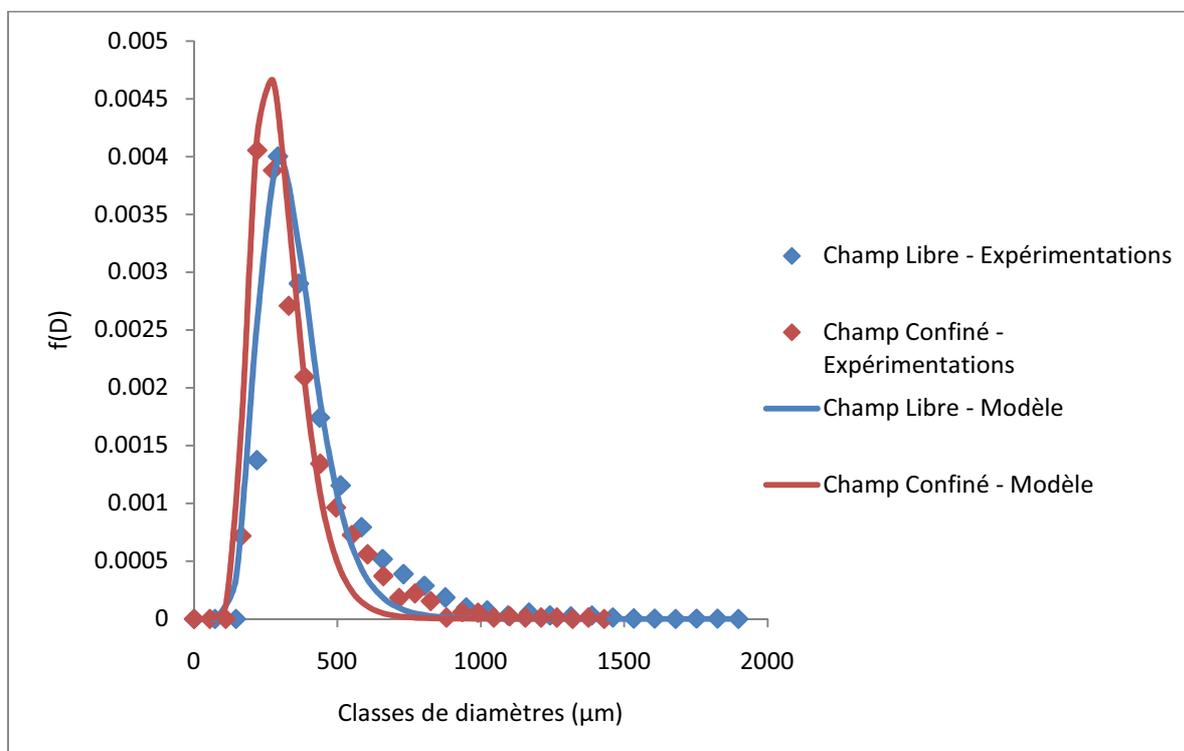


Figure 89 : Comparaison des distributions granulométriques obtenues en champ libre et en champ confiné dans le cas d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression relative de 500 KPa dans un environnement à pression atmosphérique

La Figure 89 montre que les points expérimentaux de la distribution granulométrique du spray réalisée en champ confiné sont très proches de ceux de la distribution granulométrique du spray réalisée en champ libre. L'écart est un peu plus important si on compare les modélisations. Il faut tout de même garder à l'esprit que les modèles présentent des incertitudes qui peuvent entraîner des erreurs. Cependant, l'écart expérimental n'est pas significatif et on peut considérer qu'il est justifié de travailler dans cette veine d'essai.

3.5 Conclusion

Pour conclure, ce chapitre décrit les deux dispositifs expérimentaux utilisés pour réaliser ces travaux de thèse : un dispositif a permis la visualisation et la granulométrie d'une goutte unique dans un train de goutte et l'autre, celles d'un spray. Ces deux dispositifs sont constitués d'une veine d'essai représentant une atmosphère close et pressurisée équipée de thermocouples et de capteurs de pression et/ou de manomètres. Ces capteurs contrôlent les conditions thermodynamiques initiales des expérimentations et mesurent leur évolution durant les essais. Différents liquides sont étudiés pour représenter une large gamme de produits stockés dans l'industrie : de l'eau, de l'éthanol, de l'acétone pour l'étude des gouttes ; de l'eau et une solution d'eau et de PolyEthylène Glycol 400 pour l'étude des sprays. Ces liquides sont injectés avec une buse de pulvérisation. Cette buse est représentative de la dispersion de liquides observée à grande échelle lors de la perte de confinement. Son utilisation et l'étude des sprays générés à l'échelle du laboratoire sont nécessaires pour préparer de futurs essais à grande échelle en conditions réelles.

Ce chapitre a également présenté la technique de mesure développée durant ces travaux de thèse. Il s'agit d'une technique de mesure optique nécessitant une caméra rapide associée à un objectif photographique adapté. Un logiciel de traitement d'images développé au laboratoire. Le seuillage est la partie essentielle, car il nécessite l'enregistrement, par l'utilisateur, d'une valeur seuil pour chaque image à traiter. Une procédure de calibration a été développée et mise au point pour déterminer automatiquement la valeur seuil à renseigner pour chaque image. Des billes de verre et des gouttes ont été utilisées pour réaliser cette procédure de calibration. De plus, différents objectifs sont utilisés pour visualiser des particules étalons avec différentes résolutions de pixels et déterminer la granulométrie de gouttes et de sprays à différentes distances de travail (entre 37cm à 8m selon l'objectif et la distance de travail). Cette étape est nécessaire pour déterminer l'objectif à utiliser durant les expérimentations selon la taille des particules à observer et la visualisation souhaitée sur l'évolution de leur taille et estimer l'erreur de mesure réalisée. L'erreur commise sur la mesure dépend de la taille de la particule à mesurer et de la résolution spatiale, elle est faible pour des petites particules visualisées avec une petite résolution du pixel et plus élevée pour des grosses particules et une plus grande résolution spatiale. In fine, cette étape est primordiale pour préparer des essais à grande échelle dans des conditions réelles.

De nombreuses expérimentations ont été réalisées avec des gouttes et avec des sprays. L'étude des gouttes a nécessité la réalisation d'expérimentations à 6 pressions ambiantes différentes (100, 200, 300, 400, 500 et 600 KPa) avec des liquides différents (eau, éthanol et acétone) et pour des tailles de gouttes différentes. Chaque essai a été répété 5 fois. L'étude des sprays a, quant à elle, nécessité la réalisation d'expérimentations à différentes pressions ambiantes comprises entre 100 et 500 KPa et à

différentes pressions relatives de liquides. Les résultats de ces expérimentations alimentent une base de données conséquente.

Enfin, ce chapitre a montré que la granulométrie du spray déterminée en champ confiné dans la veine d'essai est très proche de celle déterminée en champ libre dans les mêmes conditions. Par conséquent, le choix de l'utilisation d'une veine d'essai d'une telle section est justifié pour travailler à des pressions ambiantes plus élevées.

Ce dispositif expérimental a été développé pour déterminer, parmi deux techniques d'éclairage proposées, la meilleure pour visualiser des particules de 50 μm et mesurer des tailles de particules plus grandes que 400 μm . Ce chapitre a aussi présenté une méthode pour calibrer différentes techniques de mesure optiques : une caméra rapide Pike F-032B et une Photron FASTCAM APX-120 K, couplée avec un objectif Nikon 105 mm ou un télescope Questar. La chute libre de particules comme des billes de verre ou des gouttes d'eau a été enregistrée avec le dispositif d'éclairage en transmission. Les images ont été analysées par le logiciel METROM pour différents niveaux de seuil. Les résultats ont montré que le diamètre de la particule est intimement lié au niveau de seuil. Ainsi, le niveau de seuil optimal a été déterminé par dichotomie pour chaque image de chaque test. Cette précision est supérieure à 6% pour toutes les expérimentations, quelle que soit la résolution du pixel et les dispositifs expérimentaux. Le choix de la méthode de calcul du diamètre (« disque » ou « rectangle ») n'influence pas de façon significative l'erreur de mesure.

Le niveau de seuil optimal peut changer pour un même ensemble d'images en fonction de l'intensité lumineuse de l'image de fond. Un algorithme a été développé pour calculer ce niveau de seuil optimal à partir du gradient de lumière entre la particule et l'image de fond.

La précision de la méthode est de 60 μm pour déterminer les tailles de particules de 400 μm comparé aux systèmes de mesure reconnus (loupe binoculaire, balance de haute précision) à une distance de travail de 51.5 cm. De plus, des corrélations ont été développées pour déterminer la précision du diamètre de la particule mesurée pour cette distance et la résolution du pixel associé. De plus petites particules peuvent être mesurées à une distance de travail plus proche que 37 cm ou pour une résolution du pixel inférieure à 25 μm . Par exemple, le supertélescope Questar FRI MKIII permet d'avoir une résolution du pixel de 11.72 μm à une distance de travail de 91.5 cm. Par conséquent, cette méthode peut être utilisée à de plus grandes distances de travail pour caractériser un jet après une perte de confinement catastrophique ou à de plus petites distances de travail avec des particules plus petites plus représentatives d'un spray.

4 Chapitre 4 : Analyse des résultats

Ce chapitre, divisé en deux parties, présente l'analyse des résultats, obtenus lors de ces travaux. La première partie concerne l'analyse de l'influence de la pression ambiante (comprise entre 100 et 600 KPa) sur l'évaporation d'une goutte en chute libre dans une atmosphère close. La seconde partie décrit l'influence de la pression ambiante sur l'évaporation de sprays dans des conditions de fonctionnement similaires.

4.1 Influence de la pression ambiante sur l'évaporation de gouttes en chute libre dans une atmosphère close

L'influence de la pression ambiante sur l'évaporation d'une goutte en chute libre dans un milieu fermé est caractérisée par l'évolution de la forme de la goutte, de son diamètre, de sa vitesse, du nombre de Weber associé et de son débit d'évaporation. Le nombre de Weber est un paramètre adimensionnel important qui, utilisé dans la corrélation du coefficient de traînée, permet de prendre en compte la déformation de la goutte au cours de sa chute. Les paragraphes suivants présentent l'analyse de ces différents paramètres.

4.1.1 Répétabilité des essais

Cinq essais par série ont été réalisés dans le cadre de ces travaux de recherche pour caractériser le comportement de gouttes dans une atmosphère close et pressurisée. Ces essais ont été réalisés pour 6 pressions ambiantes (100, 200, 300, 400, 500 et 600 KPa), 3 liquides (eau, éthanol, acétone) et 2 voire 3 diamètres initiaux de gouttes initiales selon les produits utilisés. Afin de contrôler la répétabilité des résultats, chaque essai a été réalisé 5 fois de suite dans des conditions expérimentales similaires.

Les gouttes ont été générées avec la buse de pulvérisation de liquide, présentée au paragraphe 3.2.4, alimenté avec une pression relative de 100 KPa et dont la vanne d'alimentation est réglée pour obtenir un train de gouttes. Le Tableau 14 représente les diamètres initiaux de gouttes, ainsi que les écart-types associés, obtenus avec cette buse de pulvérisation pour les trois liquides testés.

Liquide	Diamètre initial n°1	Diamètre initial n°2	Diamètre initial n°3
Eau	6.500 ± 0.045 mm	2.030 ± 0.093 mm	0.500 ± 0.105 mm
Ethanol	4.626 ± 0.034 mm	2.099 ± 0.046 mm	
Acétone	4.661 ± 0.058 mm	2.344 ± 0.303 mm	

Tableau 14 : Classes de tailles de gouttes obtenues avec la buse de pulvérisation pour les trois liquides testés

Les diamètres obtenus avec l'eau sont de 6.5mm, 2mm et 0.5mm ; alors que pour l'éthanol et l'acétone, seules deux diamètres initiaux de gouttes ont été obtenues : 4.7mm et 2.3mm. Les mesures de tailles de gouttes présentées dans le Tableau 14 ont été réalisées par traitement

d'images au moyen de la méthode présentée dans le paragraphe 3.3. La Figure 90 illustre les différents diamètres de gouttes obtenues entre les gouttes pour chaque liquide étudié.

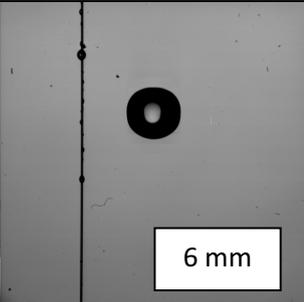
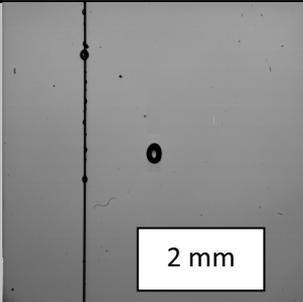
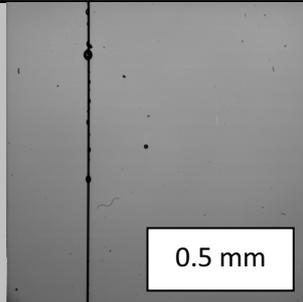
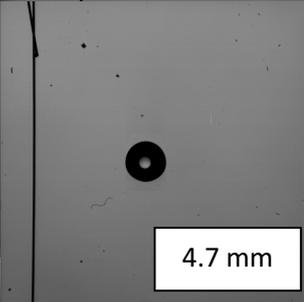
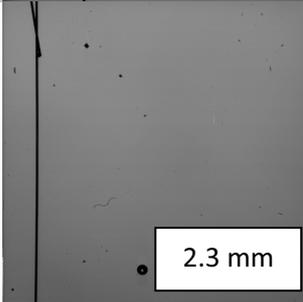
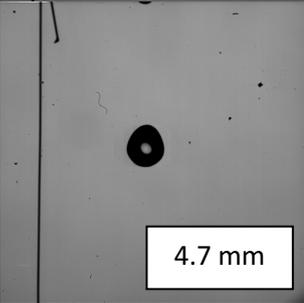
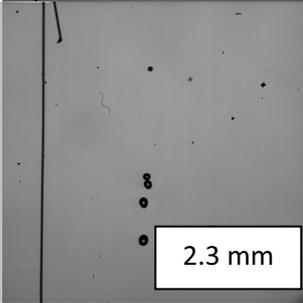
Liquide	Diamètre de gouttes 1	Diamètre de gouttes 2	Diamètre de gouttes 3
Eau	 6 mm	 2 mm	 0.5 mm
Ethanol	 4.7 mm	 2.3 mm	
Acétone	 4.7 mm	 2.3 mm	

Figure 90 : Illustration des diamètres de gouttes obtenues pour chaque liquide testé

Compte tenu des écarts-types obtenus sur les mesures expérimentales des diamètres de gouttes, la répétabilité des essais est de l'ordre de 2% pour les plus grosses gouttes et de l'ordre de 12% pour les plus petites gouttes. La faible valeur de ces écarts types assure une certaine répétabilité des essais et confirme que les essais ont eu lieu dans des conditions initiales similaires. Pour la suite de l'analyse, tous les résultats présentés ont été obtenus en moyennant entre 3 et 5 tests réalisés dans les mêmes conditions initiales.

4.1.2 Evolution de la forme de la goutte

L'objectif de cette partie est de caractériser la déformation de la goutte lors de sa chute. Ce phénomène est important pour déterminer l'influence de la pression sur l'évaporation d'une goutte dans les conditions de pression retenues durant ce travail de thèse (*Chapitre 1: Etude bibliographique*).

Rappelons que l'évolution de la forme des gouttes a été observée entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse (*Zone 1*) et entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse (*Zone 2*). L'analyse des séquences vidéo

montre que l'évolution de la forme des gouttes est très différente entre le début et la fin de leur chute.

La Figure 91 représente l'évolution de la forme d'une goutte d'eau de 6.5 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute.

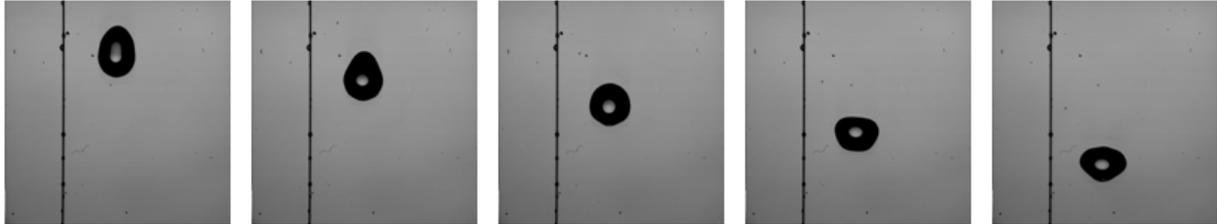


Figure 91 : Evolution de la forme d'une goutte d'eau de 6.5 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute

Cette figure montre que la goutte oscille, car elle vient de se détacher de la buse, puis ces oscillations se stabilisent et la goutte tend à devenir sphérique. Ces oscillations ont été observées pour les plus grosses tailles de gouttes (6.5 mm pour l'eau et 4.7 mm pour l'acétone et l'éthanol) quelque soit le liquide et la pression ambiante. En revanche, plus la goutte est petite, moins ces oscillations sont visibles, comme le montre la Figure 92 qui représente une goutte d'eau de 2 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute. Ce phénomène a également été observé pour les petites gouttes d'éthanol et d'acétone à chacune des six pressions ambiantes testées.

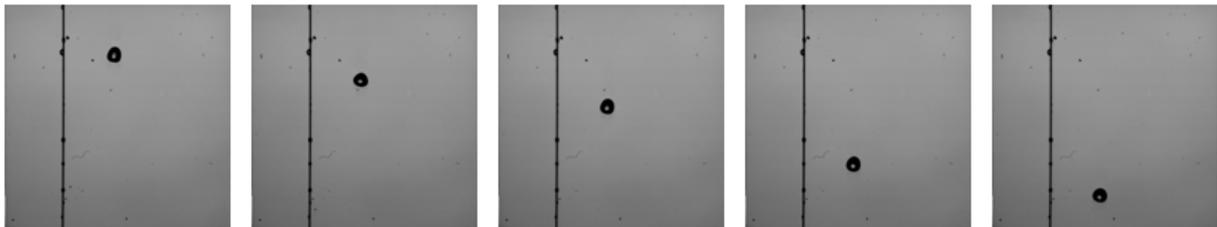


Figure 92 : Evolution de la forme d'une goutte d'eau de 2 mm de diamètre initial à une pression ambiante de 500 KPa au début de sa chute

En revanche, à la fin de sa chute, le comportement de la goutte varie avec la pression ambiante. La Figure 93 illustre cette influence de la pression sur la forme des plus grosses gouttes d'eau et d'acétone à 100 et 600 KPa. Ces cas ont été choisis pour représentés quatre cas extrêmes de l'étude. La goutte d'eau a un diamètre initial de 6.5 mm et celle d'acétone a un diamètre initial de 4.7 mm. Les illustrations du haut représentent le champ observé proche de l'injection (*Zone 1*) et celles du bas celui observé dans la *Zone 2*.

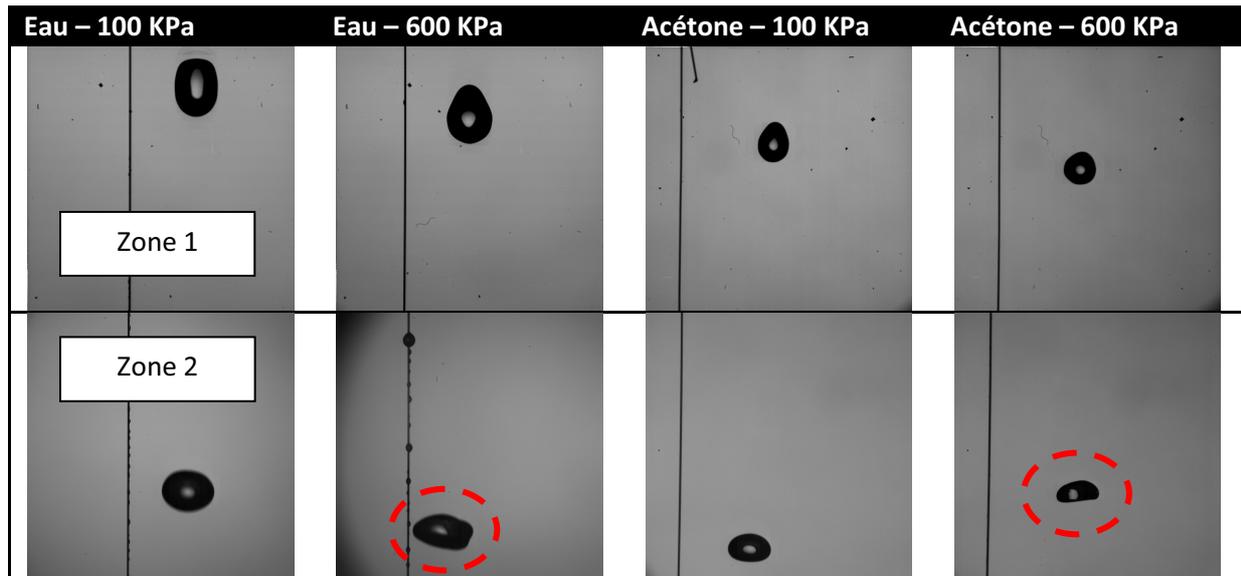


Figure 93 : Influence de la pression ambiante sur la forme des plus grosses classes de tailles de gouttes d'eau (6.5 mm) et d'acétone (4.7 mm) – Illustrations du haut : entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse – Illustrations du bas : entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse

La Figure 93 semble montrer que la pression a une influence sur la forme des gouttes d'eau et d'acétone. En effet, on observe qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne un aplatissement de la goutte (cercles rouges en pointillés sur les images). Or une augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la masse volumique de l'air ambiant, et par conséquent une augmentation des forces aérodynamiques. En revanche, les forces de tension superficielles ne sont pas influencées par l'augmentation de la pression ambiante. Par conséquent, les forces de tension superficielles ne sont pas suffisantes pour compenser les forces aérodynamiques, ce qui expliquerait la déformation de la goutte. Ce phénomène d'aplatissement de la goutte avec l'augmentation de la pression ambiante a également été remarqué pour les plus grosses gouttes d'éthanol.

Pour les plus petites classes de tailles de gouttes, cet aplatissement est moins visible, comme le montre la Figure 94 qui représente l'influence de la pression ambiante sur la forme de gouttes d'eau de 2 mm. Il semble qu'à partir d'un certain diamètre, cet effet d'aplatissement de la goutte avec l'augmentation de la pression disparaît. Cet effet a inévitablement une influence sur la vitesse des gouttes et doit être approximé par une corrélation adaptée pour le coefficient de traînée. Il est envisageable d'utiliser dans cette corrélation le nombre de Weber pour tenir compte de la déformation de la goutte et prendre en compte les effets liés aux forces d'inertie et de tension superficielle ainsi que le nombre de Reynolds pour tenir compte de l'influence des forces visqueuses.

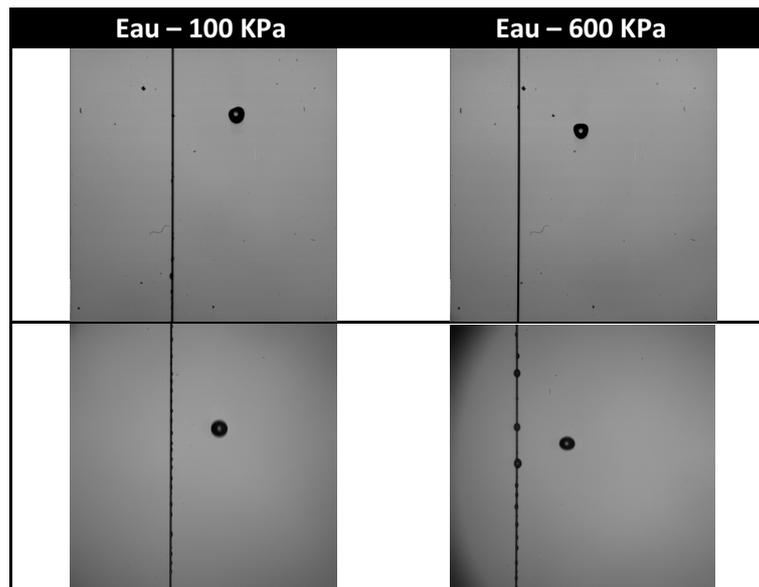


Figure 94 : Influence de la pression ambiante sur la forme de gouttes d'eau de 2 mm – Illustrations du haut : entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse – Illustrations du bas : entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse

Tous les résultats présentés par la suite concernent une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre, ceci afin de se concentrer sur un cas spécifique parmi tous les résultats obtenus au cours de ce travail de recherche. En effet, ce cas est le plus intéressant, car l'acétone est le liquide le plus évaporant des trois liquides testés, et parce que la déformation de la goutte due à l'augmentation de pression est la plus significative.

La Figure 95 représente les déformations subies par une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour une pression ambiante de 100 KPa dans la zone 1.

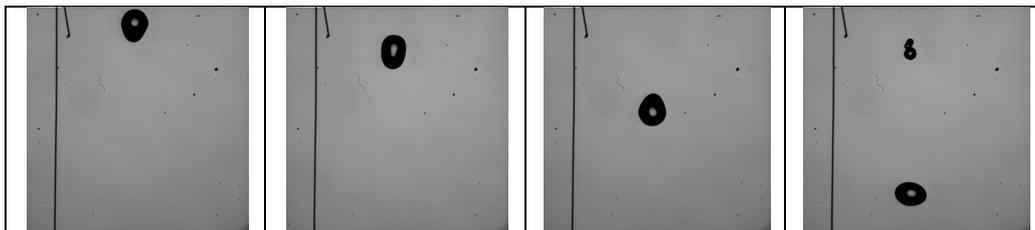


Figure 95 : Déformations subies par une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour une pression ambiante de 100 KPa entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse

Ces images semblent montrer que la goutte d'acétone est dans un régime de déformation oscillante pour une pression ambiante de 100 KPa. Un comportement similaire a été observé pour les autres pressions ambiantes testées. Ce résultat peut être confirmé par les analyses du facteur de circularité d'Heywood qui est déterminé automatiquement grâce au logiciel de traitement d'images METROM (3.3 *Technique de mesure*).

La Figure 96 montre que le facteur de circularité d'Heywood oscille entre 1.004 et 1.026 dans l'ensemble de la zone de mesure n°1, ce qui peut confirmer que la goutte est dans un régime de déformation oscillante près de la buse. Ces observations sont présentées ici pour une pression ambiante de 100 KPa, mais des résultats similaires ont été obtenus pour les autres pressions considérées.

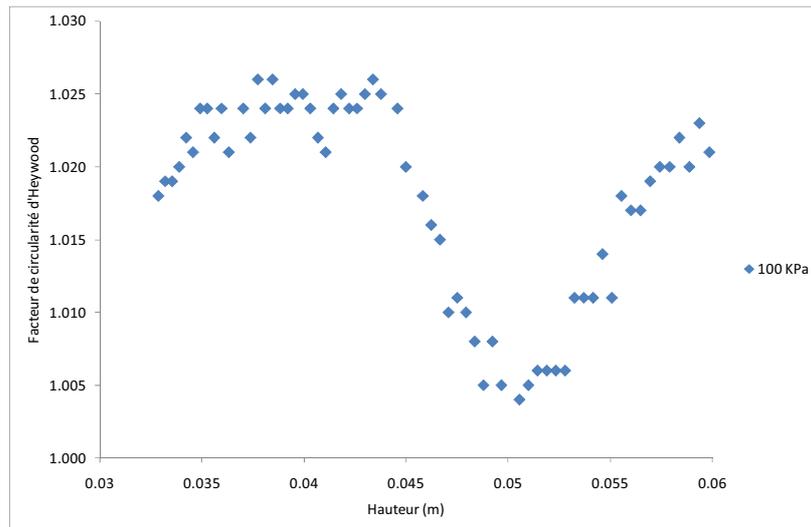


Figure 96 : Evolution du facteur de circularité d'Heywood d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de sa hauteur de chute entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse pour une pression ambiante de 100 KPa

La Figure 97 représente les différentes déformations subies par une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial pour différentes pressions ambiantes après 90 cm de chute libre. Cette figure montre que la forme de la goutte évolue avec la pression et avec la hauteur de chute. Pour une pression de 100 KPa, la forme de la goutte semble similaire sur l'ensemble du champ de la caméra. Pour une pression de 300 KPa, la goutte a une forme moins sphérique que pour une goutte à 100 KPa et s'aplatit davantage avec la hauteur de chute. A 400 KPa, la goutte apparaît tout de suite plate dans le champ de la caméra puis semble s'allonger. En effet, une augmentation de la pression entraîne une augmentation de la masse volumique de l'air ambiant et donc une augmentation des forces aérodynamiques par rapport aux forces de tension superficielles, ce qui expliquerait ces résultats.

Pression ambiante	Déformation de la goutte	
100 KPa		
300 KPa		
400 KPa		

Figure 97 : Déformation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour des pressions ambiantes de 100, 300 et 400 KPa entre 88 et 91 cm de chute libre

L'analyse de l'évolution du facteur de circularité d'Heywood permet de confirmer ces tendances (Figure 98).

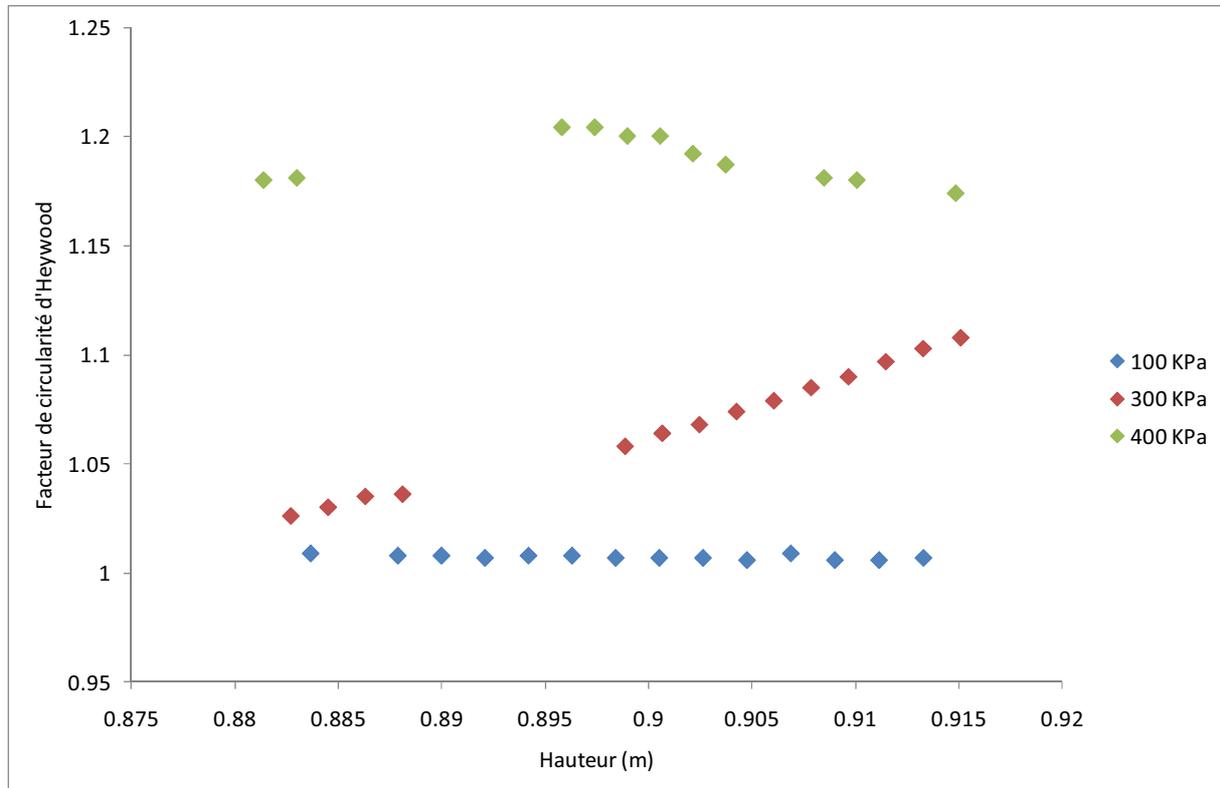


Figure 98 : Evolution du facteur de circularité d'Heywood d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en chute libre pour des pressions ambiantes de 100, 300 et 400 KPa

La Figure 98 montre que pour une pression de 100 KPa, le facteur de circularité d'Heywood est quasiment constant et égal à 1, ce qui signifie que la goutte semble avoir atteint une forme sphérique d'équilibre après 1 m de chute. Pour une pression de 300 KPa, le facteur de circularité d'Heywood augmente de 1.02 à 1.1, c'est-à-dire que la forme de la goutte s'éloigne de la forme sphérique pour devenir plus plate que la forme obtenue à 100 KPa. A 400 KPa, le facteur de circularité d'Heywood est presque constant et égal à 1.2, ce qui traduit une forme de la goutte stable et plus allongée que la forme observée à 300 KPa. L'analyse du facteur de circularité d'Heywood permet alors d'obtenir des informations quantitatives sur l'aplatissement de la goutte avec l'augmentation de la pression ambiante.

La comparaison entre la Figure 96 et la Figure 98 met en évidence un changement d'échelle entre les valeurs du facteur de circularité d'Heywood obtenues entre 3 et 6 cm de chute (entre 1 et 1.030) et celles obtenues entre 88 et 91 cm de chute (entre 0.95 et 1.25). Ceci semble signifier que la goutte est davantage déformée entre 88 et 91 cm sous le nez de la buse qu'entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse.

4.1.3 Diamètre des gouttes

L'objectif de cette partie est de déterminer l'influence de la pression ambiante sur le diamètre d'une goutte d'acétone.

La Figure 99 représente l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute pour des pressions ambiantes de 100, 300 et 400 KPa. Ce graphique compare les résultats expérimentaux avec les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes développé au cours de cette thèse et tenant compte de la corrélation de Loth (2008) (2.2 *Modèle d'évaporation de gouttes*).

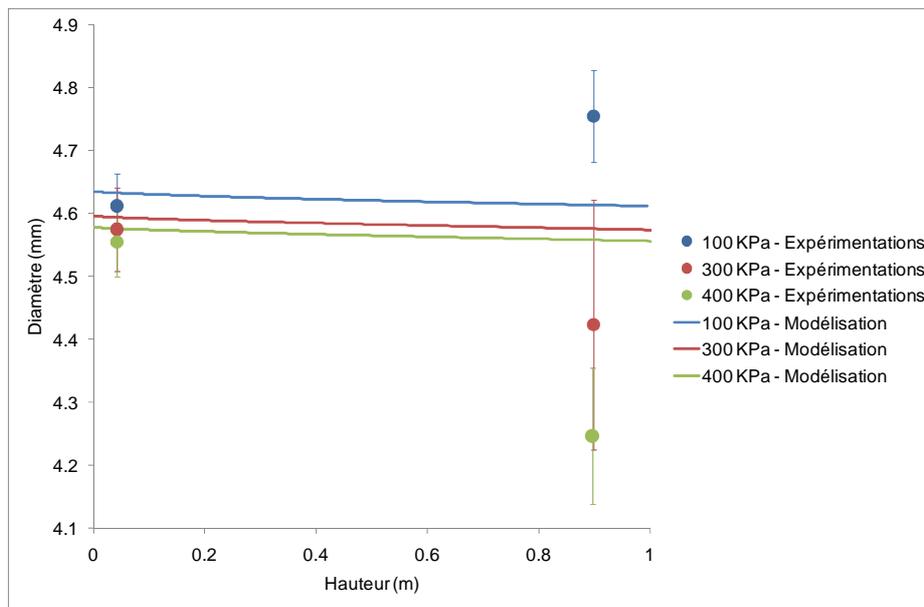


Figure 99 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du diamètre d'une goutte d'acétone de 4.7mm en fonction de la hauteur de chute – Comparaison des résultats expérimentaux et des prédictions du modèle

Rappelons que la diminution théorique du diamètre pour une goutte d'acétone de 4.7 mm est de l'ordre de 20 μm pour chacune des trois pressions considérées. Or la résolution de la caméra étant de 30 μm / pixel, la précision de la mesure est alors insuffisante par rapport à la diminution de diamètre attendue. Toutefois, la quantification de l'erreur sur la mesure du diamètre de la goutte d'acétone permet de comparer ces résultats avec les prédictions du modèle.

Les mesures expérimentales du diamètre ont été obtenues en utilisant la méthode « disque ». En effet, il est justifié d'utiliser cette méthode car le modèle d'évaporation de gouttes utilise un modèle de gouttes sphériques pour déterminer son diamètre. Les écart-types représentés sur ces résultats expérimentaux ont été obtenus pour les 5 tests réalisés. La Figure 99 montre que l'écart-type obtenu sur les expérimentations est de 4% maximum après 90 cm de chute, pour les trois pressions considérées (100, 300 et 400 KPa). Cet écart-type peut s'expliquer par la déformation de la goutte. En effet, il a été montré précédemment qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne un allongement de la forme de la goutte après 90 cm de chute (Cf. 4.1.2 *Evolution de la forme de la goutte*) alors que les mesures expérimentales du diamètre sont déterminées en assimilant la goutte à un disque.

Malgré les écarts-types obtenus sur les mesures expérimentales, cette figure suggère qu'il y a une correspondance des tendances entre le modèle et les expérimentations et que l'écart maximal entre les mesures et les prédictions du modèle est de 7.3% après 90 cm de chute. Compte-tenu de cet écart, l'erreur de mesure est acceptable et cela permet de proposer une méthodologie de validation du modèle d'évaporation à travers l'évolution du diamètre de la goutte.

Pour approfondir cette méthodologie de validation, deux propositions sont à envisager : une amélioration de la mesure expérimentale du diamètre et une amélioration au niveau du modèle d'évaporation de gouttes. L'amélioration des mesures expérimentales nécessite l'amélioration de la méthode de détermination du diamètre en tenant compte de l'aplatissement de la goutte avec l'augmentation de la pression. Au niveau de la modélisation, il est nécessaire de travailler avec un modèle de goutte plate plutôt qu'avec un modèle de goutte sphérique.

Remarque : Ces résultats sont à pondérer, car nous rappelons que la précision de la technique de mesure est de 15%, ce qui signifie qu'un diamètre de la goutte d'acétone mesuré à 4.7 mm peut être compris entre 4 et 5.4 mm.

4.1.4 Vitesses des gouttes

Ce paragraphe présente les résultats obtenus sur l'influence de la pression ambiante sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial. La Figure 100 représente l'influence de la pression sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm en fonction de la hauteur de chute et compare les mesures expérimentales de vitesses avec les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes. Rappelons que ce modèle d'évaporation de gouttes tient compte de la déformation de la goutte au travers du coefficient de traînée, modélisé par la corrélation de Loth (2008). Cette dernière introduit le nombre de Weber (Cf. 2.2 Modèle d'évaporation de gouttes) pour modéliser le changement de forme de la goutte.

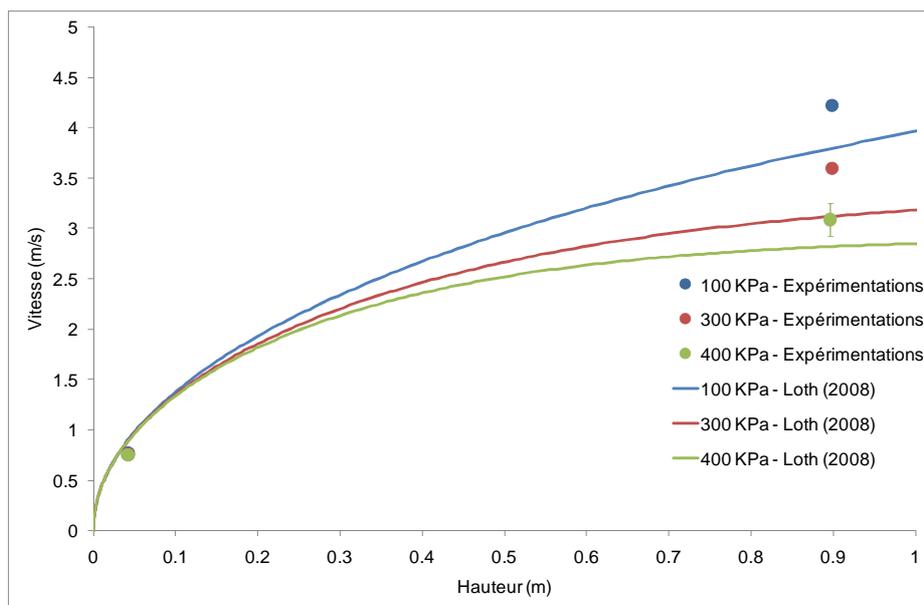


Figure 100 : Influence de la pression sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone de 4.7 mm en fonction de la hauteur de chute – Comparaison entre les résultats expérimentaux et les prédictions du modèle

La Figure 100 montre tout d'abord une bonne répétabilité des mesures expérimentales de la vitesse de la goutte, car l'écart-type sur les mesures expérimentales est compris entre 1 et 5%. Cette figure permet de remarquer qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution de la vitesse de la goutte. En effet, une augmentation de pression ambiante entraîne une augmentation de la masse volumique et ainsi une augmentation de la poussée d'Archimède et de la force de traînée, ce qui traduit un ralentissement de la goutte. Cette figure permet également de remarquer une correspondance des tendances entre les prédictions du modèle et les mesures expérimentales de la vitesse. L'écart entre le modèle d'évaporation de gouttes et les expérimentations est de 10% pour les trois pressions considérées (100, 300 et 400 KPa). En revanche, la vitesse des gouttes semble sous-estimée de 10% par le modèle. Diverses raisons peuvent expliquer cet écart. Rappelons que les mesures expérimentales de la vitesse de la goutte sont déterminées à partir du barycentre de la goutte et de la fréquence d'acquisition de la caméra. Quant aux prédictions du modèle d'évaporation pour la vitesse de la goutte, bien qu'elles tiennent compte de la déformation de la goutte au travers du coefficient de traînée, le modèle utilise un modèle de goutte sphérique pour déterminer le diamètre. Ainsi, il faudrait approfondir ces résultats en utilisant, par exemple, un modèle de goutte plate ou axisymétrique dans le modèle d'évaporation de gouttes.

4.1.5 Evolution du nombre de Weber

L'objectif de ce paragraphe est de montrer l'évolution du nombre de Weber gazeux d'une goutte en chute libre et en évaporation. Rappelons que le nombre de Weber gazeux d'une goutte est défini par l'Équation 6. Nous rappelons également que ρ_g est la masse volumique du gaz environnant est déterminé avec la loi des gaz parfaits, valable pour une pression ambiante inférieure à 1 MPa. La vitesse de la goutte u correspond aux mesures expérimentales (4.1.4 Vitesses des gouttes). Le diamètre de la goutte d a été déterminé expérimentalement (3.3.1 Présentation de la technique de mesure optique). Enfin, σ_l représente la tension de surface du liquide.

La Figure 101 représente l'influence de la pression ambiante sur l'évolution du nombre de Weber d'une goutte de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute.

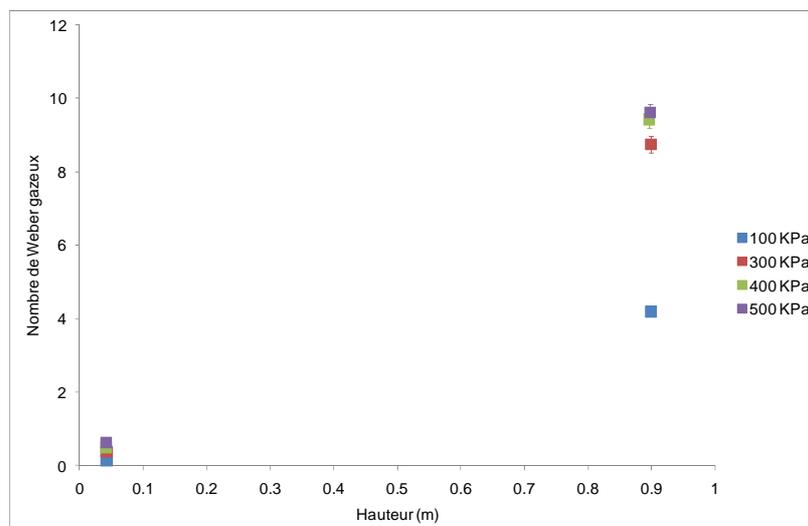


Figure 101 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du nombre de Weber d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute

La Figure 101 montre que, pour chaque pression considérée, le nombre de Weber augmente avec la hauteur de chute, ce qui est attendu étant donné que la vitesse de la goutte en chute libre augmente également avec la hauteur de chute. La pression ambiante influence moins le nombre de Weber à 3 cm sous le nez de la buse qu'à 90 cm, car le nombre de Weber augmente de 0.13 à 0.62 entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse alors qu'il augmente de 4 à 10 à 90 cm sous le nez de la buse. Ceci se traduit par une déformation moins importante de la goutte à 3 cm sous le nez de la buse qu'à 90 cm sous le nez de la buse, comme le montre la Figure 93. Par conséquent, pour la suite de la présentation des résultats sur l'évolution du nombre de Weber, nous nous intéresserons uniquement aux résultats obtenus après 90 cm de chute. La Figure 102 représente l'évolution du nombre de Weber d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la pression ambiante après une distance de chute de 90 cm.

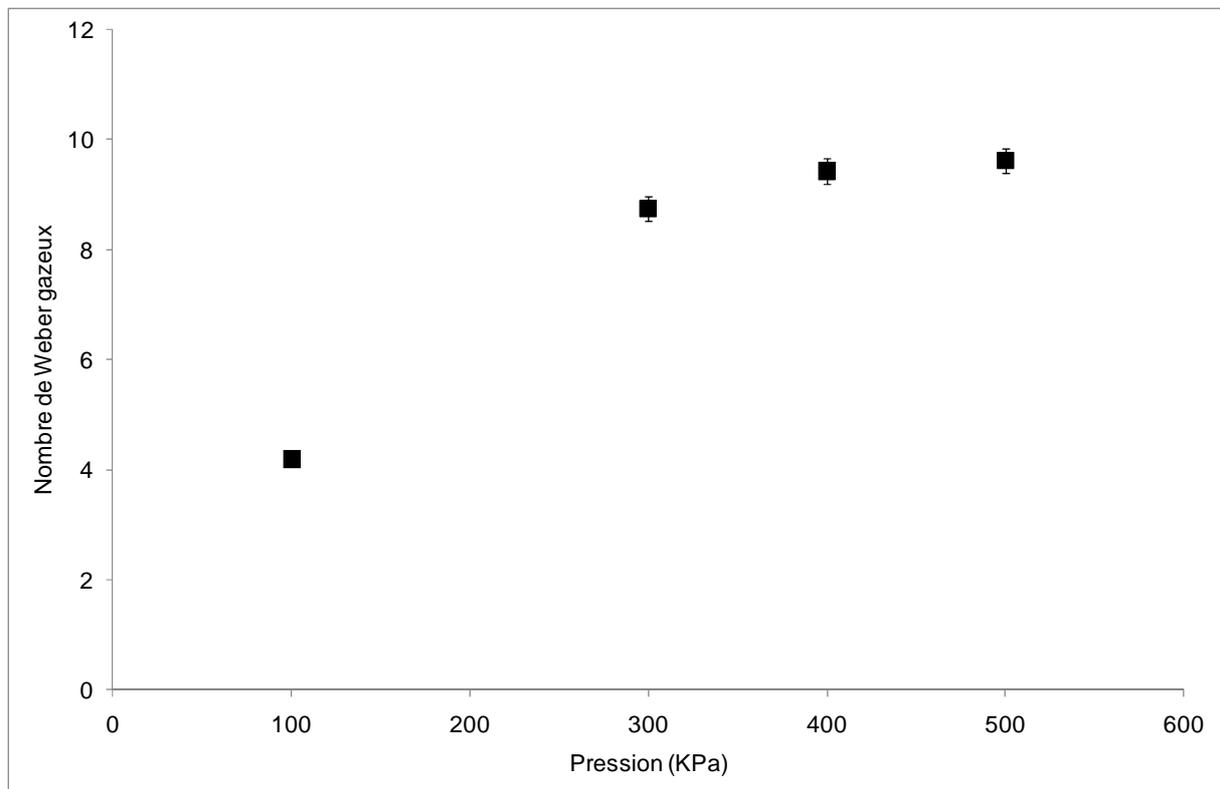


Figure 102 : Evolution du nombre de Weber d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la pression ambiante après une distance de chute de 90 cm.

La Figure 102 montre que le nombre de Weber augmente de 4 à 10 lorsque la pression ambiante passe de 100 et 500 KPa après 90 cm de chute. En effet, une augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la masse volumique de l'air autour la goutte et par conséquent une augmentation du nombre de Weber. L'écart-type obtenu sur les mesures expérimentales est inférieur à 2.6%. Cependant, cet écart peut s'expliquer par la méthode de détermination du diamètre qui ne tient pas compte de la déformation de la goutte.

Le nombre de Weber reste inférieur à 12, mais se rapproche de plus en plus de cette valeur avec l'augmentation de la pression. Cela signifie que la déformation de la goutte est de plus en plus accentuée mais que la goutte reste stable et qu'elle n'est pas soumise à la rupture secondaire. En effet, la déformation des gouttes observée sur les images de la Figure 93 ou de la Figure 97, n'a pas encore atteint le régime d'atomisation de type « parachute » (Figure 8).

La connaissance des valeurs expérimentales du nombre de Weber permet de déterminer les valeurs expérimentales du coefficient de traînée dans le cas d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial. Les valeurs expérimentales du coefficient de traînée sont alors déterminées à partir de la corrélation de Loth (2008) (Équation 8). Les valeurs expérimentales du nombre de Weber sont celles présentées sur les Figure 101 et Figure 102. La Figure 103 représente l'influence de la pression ambiante sur le coefficient de traînée en fonction de la hauteur de chute dans le cas d'une goutte d'acétone de 4.7 mm. Cette figure compare les mesures expérimentales avec les prédictions du modèle.

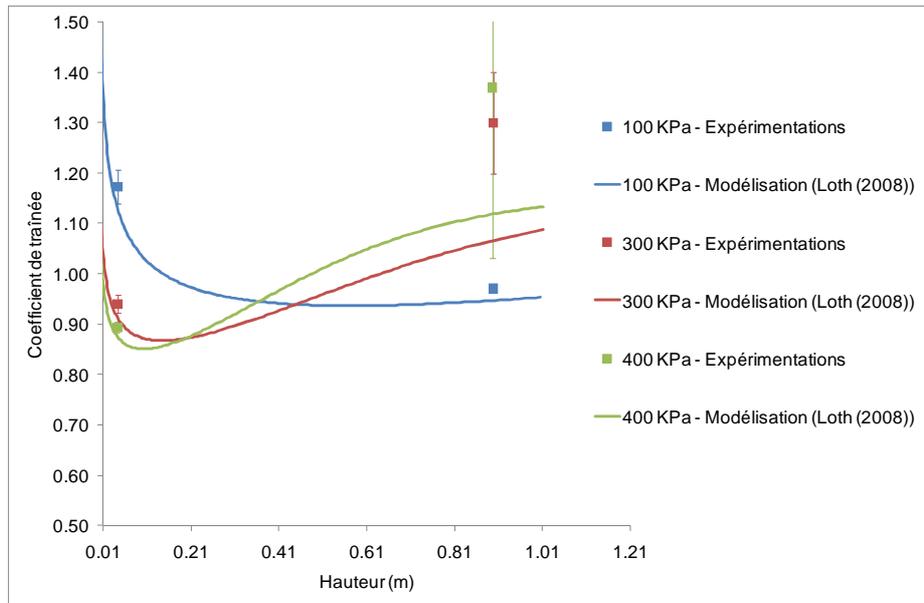


Figure 103 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du coefficient de traînée en fonction de la hauteur de chute dans le cas d'une goutte d'acétone de 4.7 mm – Comparaison des mesures expérimentales avec les prédictions du modèle d'évaporation de gouttes

Cette figure montre que proche de l'injection, une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du coefficient de traînée. Or le coefficient de traînée varie inversement proportionnellement au nombre de Reynolds, ce qui explique la diminution du coefficient de traînée. Proche de l'injection, l'écart entre le coefficient de traînée calculé à partir des mesures expérimentales (du diamètre et de la vitesse de la goutte) et celui prédit par le modèle d'évaporation de gouttes faisant intervenir la corrélation de Loth (2008) est inférieur à 4%. Le diamètre initial de la goutte utilisé dans le modèle d'évaporation de gouttes correspondant au diamètre moyen mesuré entre 3 et 6 cm sous le nez de la buse, cette différence peut essentiellement s'expliquer par l'écart entre les mesures expérimentales de vitesse et les vitesses de goutte prédites par le modèle d'évaporation de gouttes (4.1.4 Vitesses des gouttes). La tendance dégagée montre que l'influence de la pression sur le coefficient de traînée proche de l'injection est respectée entre le coefficient de traînée calculé à partir des mesures expérimentales et le coefficient de traînée prédit avec le modèle d'évaporation de gouttes.

Après 90 cm de chute, un changement de tendance est observé : plus la pression ambiante augmente, plus l'écart augmente entre le coefficient de traînée calculé à partir des mesures expérimentales et le coefficient de traînée prédit par le modèle d'évaporation de gouttes : à 100 KPa, cet écart est de l'ordre de 2% alors qu'à 400 KPa, cet écart augmente à 18%. Rappelons que les

mesures de diamètre ne tiennent pas compte de la déformation de la goutte, alors que le modèle d'évaporation de gouttes en tient compte au travers de la corrélation de Loth (2008). Cela permettrait d'expliquer l'écart systématique de 10% observé entre les mesures expérimentales de vitesse et le modèle sur l'évolution de la vitesse d'une goutte d'acétone (Figure 100). Toutefois, les tendances de l'influence de la pression ambiante sont respectées entre le coefficient de traînée calculé à partir des mesures expérimentales et le coefficient de traînée prédit par le modèle d'évaporation de gouttes.

4.1.6 Evolution du débit d'évaporation

Le paragraphe 4.1.3 *Diamètre des gouttes* a montré que l'écart entre les mesures expérimentales de diamètre et les valeurs obtenues par le modèle d'évaporation de gouttes est de 4% compte-tenu de la résolution du pixel disponible (30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$). Cependant, il semble intéressant de quantifier l'erreur commise sur la mesure du débit massique d'évaporation d'une goutte à partir de la mesure de son diamètre. L'objectif de ce paragraphe consiste à comparer les débits massiques d'évaporation obtenus à partir des mesures expérimentales avec les prédictions du modèle d'évaporation.

La Figure 104 représente l'influence de la pression ambiante sur l'évolution du débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur. Les débits massiques d'évaporation présentés correspondent aux prédictions du modèle d'évaporation de gouttes. Cette figure montre que le débit massique d'évaporation d'une goutte d'acétone en chute libre dans une atmosphère à 300 KPa est plus élevé qu'à 400 KPa. En effet, une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du coefficient de diffusion, et par conséquent une diminution du débit massique d'évaporation. Pour ces deux pressions ambiantes, la diminution de diamètre attendue après 90 cm de chute est de l'ordre de 20 μm , soit une diminution inférieure à la variation du pixel.

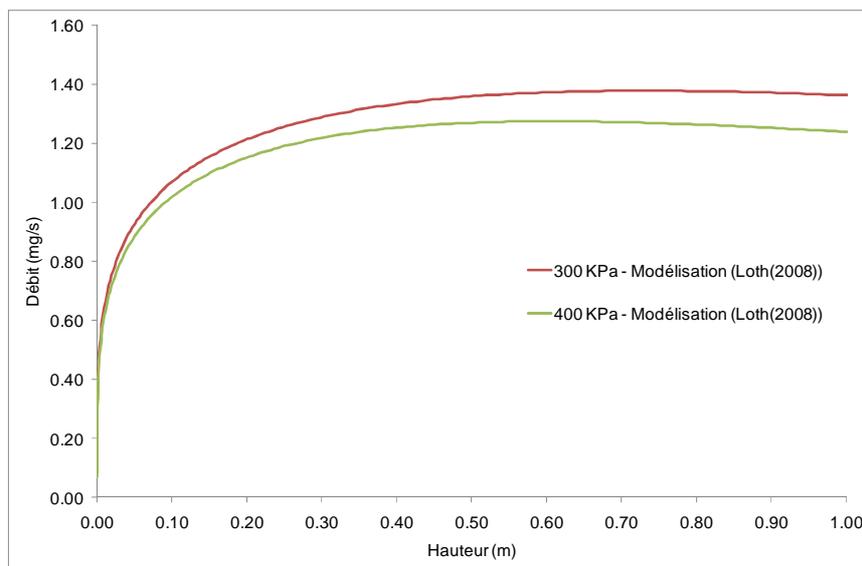


Figure 104 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du débit d'évaporation pour une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute – Prédictions du modèle

La Figure 105 représente l'influence de la pression ambiante sur le débit d'évaporation pour une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial.

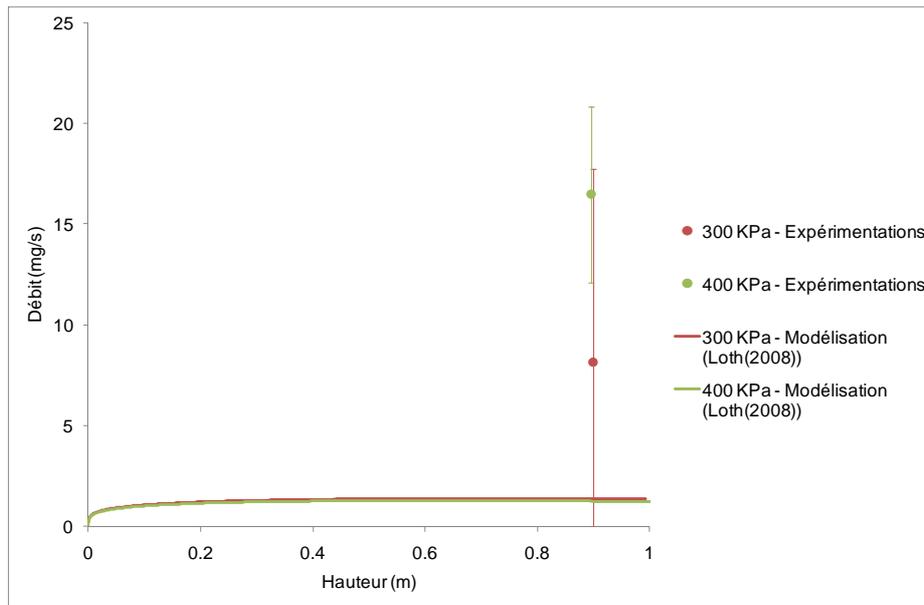


Figure 105 : Influence de la pression ambiante sur l'évolution du débit d'évaporation pour une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial en fonction de la hauteur de chute – Comparaison des données expérimentales avec les prédictions du modèle

Les débits expérimentaux ont été obtenus en utilisant l'Équation 54 :

$$\dot{m} = \frac{\rho_l \Delta V_l}{\Delta t}$$

Équation 54

Où \dot{m} est le débit massique évaporé, ρ_l la masse volumique du liquide de la goutte, ΔV_l la différence de volume de la goutte durant un temps Δt . Lors des expérimentations, il a été observé que la goutte mettait environ 900 images pour atteindre une hauteur de chute de 90 cm. Rappelons que la fréquence d'acquisition de la caméra était de 2000 images/s. Par conséquent, la valeur choisie pour Δt est 0.45 s. Le volume de la goutte est calculé à chacune des deux positions test à partir du diamètre mesuré expérimentalement en supposant la goutte sphérique.

La Figure 105 montre que la tendance mise en évidence sur la Figure 104 n'est pas comparable avec les résultats expérimentaux. Pour une pression ambiante de 300 KPa, l'écart-type obtenu sur la mesure du débit massique d'évaporation est de 117% ; et de 26% pour une pression ambiante de 400 KPa. Ces différences peuvent s'expliquer par la non prise en compte de la déformation de la goutte lors de la mesure du diamètre qui se cumule avec le calcul du volume de la goutte supposée sphérique. L'écart-type obtenu sur le débit massique d'évaporation à 300 KPa est supérieur à celui obtenu à 400 KPa parce que l'écart-type sur le diamètre mesuré à 300 KPa est supérieur à celui obtenu à 400 KPa (celui-ci est élevé au cube lors du calcul du volume de la goutte).

Pour une pression de 300 KPa, les prédictions du modèle sont comprises dans l'écart-type obtenu avec les expérimentations. En revanche, à 400 KPa, l'écart entre le modèle et les expérimentations atteint 92%. En effet, sur la Figure 99, si l'on regarde uniquement les diamètres expérimentaux, la diminution de diamètre à 400 KPa est deux fois plus importante (300 μ m) que la diminution de diamètre à 300 KPa (150 μ m) : la perte de volume est donc plus élevée à 400 KPa, ce qui traduit un débit d'évaporation expérimental plus élevé pour les pressions élevées.

Ainsi, cette figure montre que la méthode de détermination du diamètre actuellement disponible permet d'estimer le débit d'évaporation d'une goutte avec une précision d'un facteur 2, même s'il est difficile d'obtenir des mesures expérimentales de débit et de les comparer avec les prédictions du modèle.

En conclusion, il est nécessaire de se baser sur les prédictions du modèle, car les mesures expérimentales ne permettent pas d'envisager une validation de ces prédictions. Ainsi, d'après les modélisations, il semblerait que dans le cas de la situation accidentelle étudiée, une augmentation de la pression ambiante entraînerait une diminution du débit massique évaporé, à l'échelle de la goutte. Ceci pourrait traduire une favorisation de la phase liquide par rapport à la phase vapeur avec l'augmentation de la pression ambiante, ce qui signifierait que les produits chimiques liquides auraient alors plutôt tendance à se disperser sous forme de flaque (rain-out) que sous forme de nuage de vapeur. Cependant, ces résultats sont à pondérer parce que les résultats obtenus à 300 KPa et à 400 KPa sont très proches, d'après le modèle.

La validation de ces résultats nécessite d'améliorer la méthode de détermination du diamètre pour tenir compte de l'évolution de la forme de la goutte. De plus, afin d'avoir une meilleure précision sur les résultats, il faudrait utiliser un objectif optique permettant une résolution spatiale plus élevée. En parallèle, le développement d'un modèle de goutte plate ou axisymétrique permettrait de diminuer les écarts entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle. A ce stade, seul l'effet de la pression sur l'évaporation d'une goutte unique a été quantifié. Or il reste à analyser l'effet de la pression sur la fragmentation et l'effet de la pression sur le couple évaporation / fragmentation d'un spray.

4.2 Influence de la pression ambiante sur le comportement d'un spray dans une atmosphère close

L'objectif de cette partie est de caractériser l'influence de la pression sur la granulométrie et l'évaporation d'un spray. Dans un premier temps, les résultats obtenus sur la granulométrie d'un spray seront présentés ainsi que l'influence de différents paramètres sur celle-ci. Après avoir présenté la répétabilité des essais, les résultats sont présentés suivant 6 axes : l'influence de la zone d'intérêt étudiée, l'influence de la pression dans la veine d'essai, l'influence de la pression d'alimentation de la buse et l'influence de la nature du liquide sur la granulométrie du spray. Ensuite, l'évolution du diamètre moyen de Sauter est présenté en fonction des différentes conditions expérimentales. Ces résultats représentent une approche préliminaire de l'étude de l'évaporation. Dans un deuxième temps, le code ASTRRE modifié lors de ce travail de recherche a été utilisé pour estimer le débit d'évaporation de sprays dans différentes conditions expérimentales, car le dispositif expérimental actuel ne permet pas de visualiser l'évaporation car la durée d'observation est trop courte par rapport à l'évaporation des liquides étudiés.

4.2.1 Répétabilité des essais

La Figure 106 montre la répétabilité obtenue sur la distribution granulométrique au centre d'un spray d'eau pulvérisé dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa.

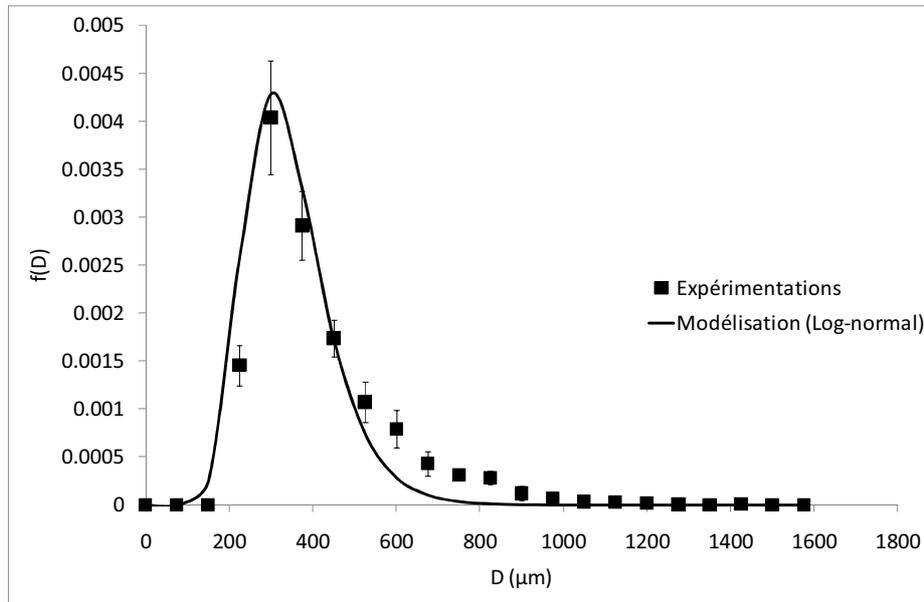


Figure 106 : Répétabilité des essais – Distribution granulométrique d'un spray d'eau pulvérisé dans l'enceinte pressurisée à 200 KPa avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa

La Figure 106 montre une faible dispersion des résultats expérimentaux sur la distribution granulométrique du spray entre 3 essais réalisés successivement. Sur l'ensemble des essais réalisés pour l'étude de la granulométrie du spray, l'écart moyen entre 3 essais est de 17% sur la fréquence des classes de gouttes comprises entre 0 et 500 μm. De plus, la Figure 106 semble montrer qu'il est possible de modéliser ces distributions par une loi log-normale (Équation 15). La distribution statistique présentée sur cette figure a été déduite de 36 ± 3 gouttes sur une surface de 4 cm² (surface de la zone d'intérêt (définie au paragraphe 3.3.2 *Calibration de la technique de mesure*)). Néanmoins, ce nombre de gouttes est insuffisant pour parler de statistique. Pour la modélisation de la distribution granulométrique par la loi log-normale, il a été imposé que le nombre de gouttes de classe de taille de [0, 50 μm] soit nulle, ce qui explique le manque d'adéquation entre la modélisation et les points expérimentaux pour des tailles de gouttes de diamètre supérieures ou égales à 400 μm. De plus, on peut remarquer à partir de cette figure qu'aucune goutte de classe de taille inférieure à 150 μm n'a été détectée compte-tenu de la résolution du pixel choisie pour le protocole expérimental d'étude des sprays.

4.2.2 Influence de la zone d'intérêt

Comme expliqué précédemment, l'analyse du jet a été faite selon trois zones (gauche, centre, droite) La Figure 107 représente l'influence de la zone d'intérêt sur la distribution granulométrique d'un jet pulvérisé avec une pression d'alimentation de 600 KPa dans une atmosphère pressurisée à 400 KPa.

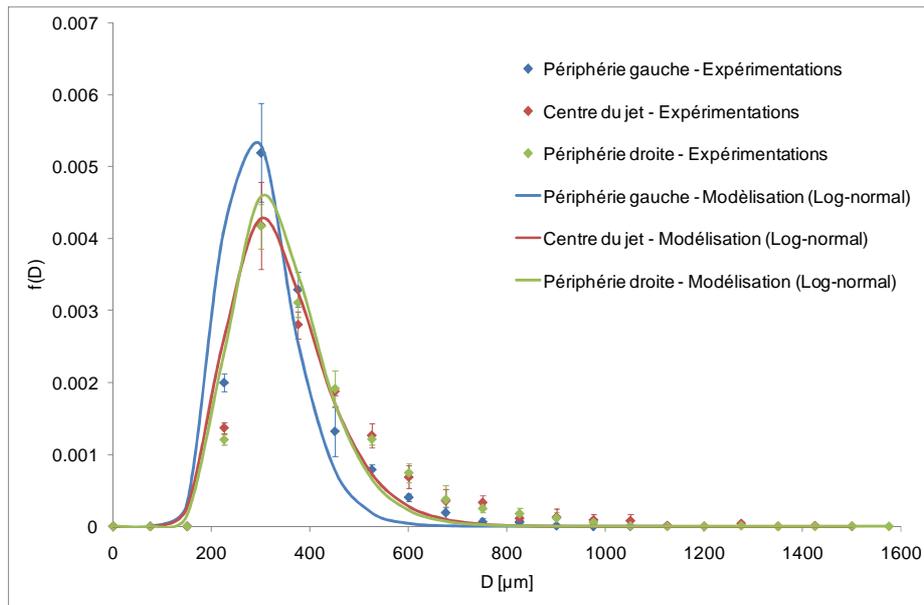


Figure 107 : Influence de la zone d'intérêt sur la distribution granulométrique d'un jet pulvérisé avec une pression d'alimentation de 600 KPa dans une atmosphère pressurisée à 400 KPa

La Figure 107 semble montrer que plus on s'éloigne du centre du jet pour aller à la périphérie, plus la distribution granulométrique se déplace vers les petits diamètres. Il semble également qu'une différence de luminosité entraîne une différence sur les diamètres mesurés. En effet, en périphérie gauche, la luminosité est plus claire qu'à droite ce qui entraîne une différence du nombre de petites gouttes détectées entre ces deux zones. Bien que le niveau de seuil soit adapté à chaque zone d'intérêt, les mesures sont plus précises quand les gouttes sont bien contrastées.

4.2.3 Influence de la pression dans la veine d'essai

La Figure 108 représente l'influence de la pression dans la veine d'essai sur la distribution granulométrique au centre d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (relatif).

Compte-tenu des écart-types obtenus sur les mesures expérimentales, il semble qu'une augmentation de la pression ambiante n'entraîne pas d'augmentation significative du nombre de petites gouttes. Par ailleurs, dans le cas d'une pression ambiante de 200 KPa, 36 ± 3 gouttes ont été observées (dans la zone d'intérêt étudiée de 4 cm^2) dont 22 ont un diamètre inférieur à $450 \text{ }\mu\text{m}$; alors que dans le cas d'une pression ambiante de 400 KPa, 51 ± 4 gouttes ont été observées dont 32 ont un diamètre inférieur à $450 \text{ }\mu\text{m}$. La comparaison des nombres de gouttes observées peut alors laisser penser qu'une augmentation de la pression ambiante pourrait favoriser l'atomisation du spray, dans le cas de notre étude. Cette remarque permettrait alors de vérifier les résultats de la littérature (Kim et Sung (2003)). Pour une pression d'alimentation de la buse relative constante, une augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la masse volumique du gaz, et par conséquent une augmentation du nombre de Weber, ce qui signifierait une augmentation de l'atomisation des sprays.

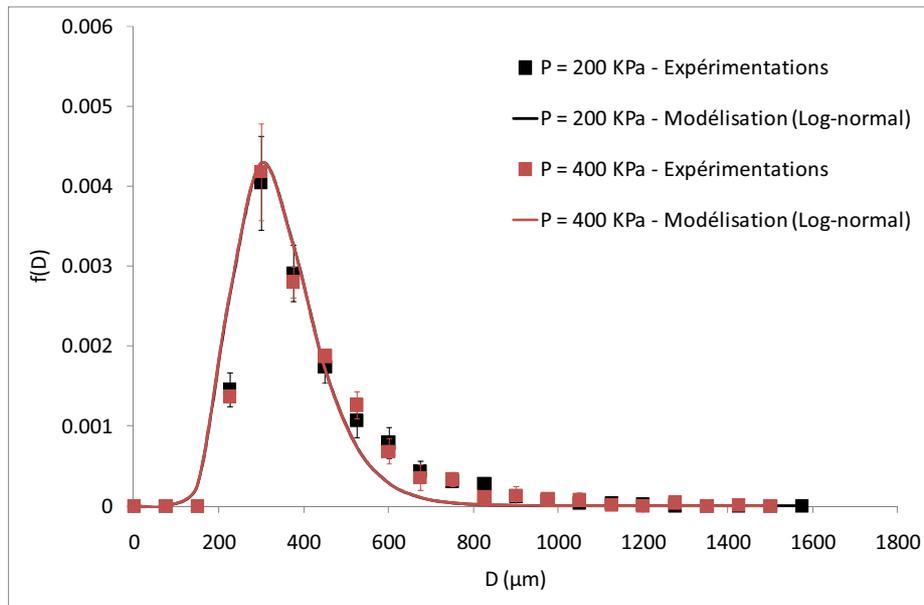


Figure 108 : Influence de la pression dans la veine d'essai sur la distribution granulométrique au centre d'un spray pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (en relatif)

Ainsi, lors d'une perte de confinement en milieu pressurisé, une augmentation de la pression ambiante pourrait favoriser l'atomisation des produits pulvérisés. Cependant, ces résultats sont à pondérer, car le point de mesure est proche de l'injection (entre 2 et 7 cm sous le nez de la buse) et la différence de pression est modérée.

4.2.4 Influence de la pression d'alimentation de la buse

La Figure 109 représente l'influence de la pression d'alimentation de la buse sur la distribution granulométrique obtenue au centre d'un spray d'eau pulvérisé dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa.

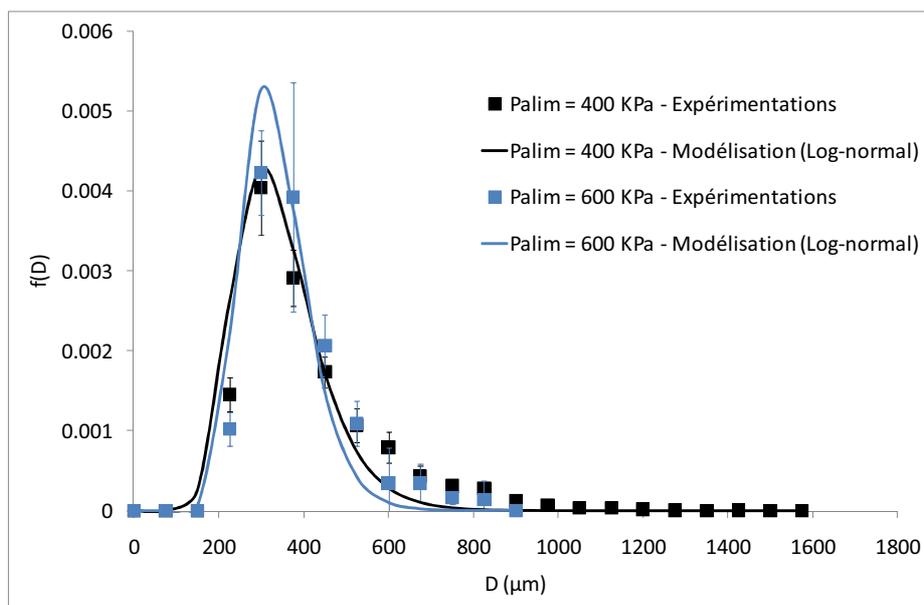


Figure 109 : Influence de la pression d'alimentation de la buse sur la distribution granulométrique obtenue au centre d'un spray d'eau pulvérisé dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa

La Figure 109 semble montrer (au regard des expérimentations et de la modélisation) qu'une augmentation de la pression d'alimentation de la buse entraîne une augmentation du nombre de petites gouttes de diamètre inférieur à $500\mu\text{m}$. La fréquence des gouttes dont la classe de diamètre est inférieure à $500\mu\text{m}$ est plus élevée avec une pression d'alimentation de la buse de 600 KPa qu'avec une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa (sauf pour les classes des gouttes inférieures à $225\mu\text{m}$). Cependant, ces résultats sont à pondérer car les différences entre les mesures sont très faibles et les écart-types sur les mesures sont assez importants. Un nombre de gouttes équivalent a été observé pour chacune des deux pressions étudiées : 36 ± 3 gouttes pour une pression d'alimentation de la buse de 400 KPa et 32 ± 8 gouttes pour une pression d'alimentation de la buse de 600 KPa. Par conséquent, cette figure suggère qu'une augmentation de la pression d'alimentation de la buse peut favoriser l'atomisation de la pulvérisation, même au centre du jet, où les collisions sont plus fréquentes.

Si on se réfère au contexte de l'étude, c'est-à-dire suite à une perte de confinement catastrophique, il est envisageable qu'une augmentation du débit à la brèche entraînera une pulvérisation constituée de petites gouttes.

4.2.5 Influence de la nature du liquide

La Figure 110 représente l'influence du liquide sur la distribution granulométrique au centre d'un spray pulvérisé avec une pression d'alimentation de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa.

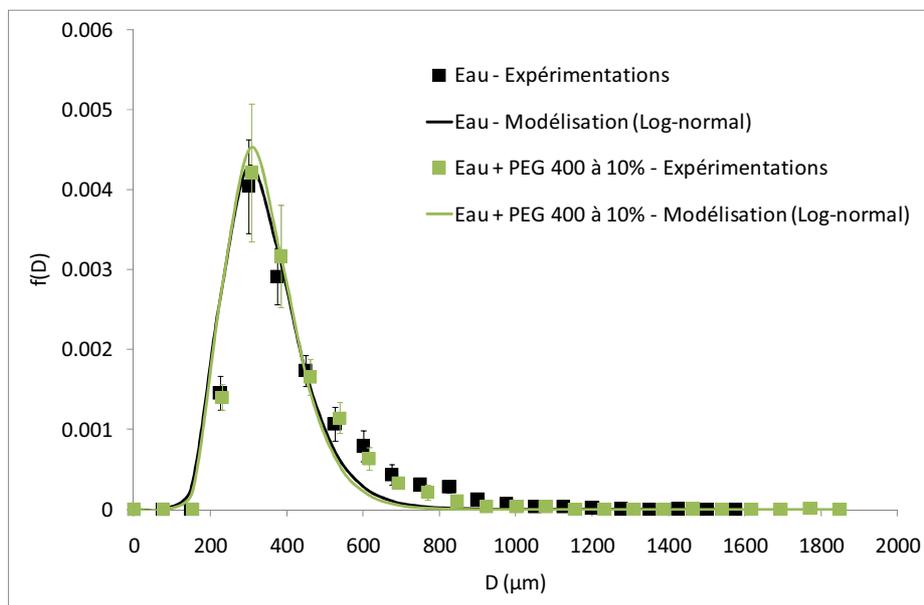


Figure 110 : Influence du liquide sur la distribution granulométrique au centre d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression d'alimentation de 400 KPa dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa.

Les tensions de surface de l'eau et du mélange eau + PEG 400 à 10% sont détaillées au Tableau 9 : la tension de surface de l'eau est de 73 mN/m et celle du mélange eau + PEG 400 à 10% est de 32.8 mN/m. La Figure 110 semble alors montrer qu'une diminution de la tension de surface du liquide entraîne une légère augmentation du nombre de gouttes de petits diamètres (jusqu'à $500\mu\text{m}$). En effet, une diminution de la tension de surface entraîne une diminution de la taille des gouttes. Le

nombre de Weber étant une conséquence de ce mécanisme on observe une augmentation de ce nombre de Weber, ce qui traduit une atomisation favorisée.

Toutefois, ces observations sont à pondérer compte-tenu des écart-types obtenus sur les mesures expérimentales. Une autre interprétation possible est de dire que, dans le cas de cette étude, une diminution de la tension de surface d'un facteur 2 ne semble pas être significative pour observer l'influence de la nature du liquide compte-tenu du protocole expérimental mis en œuvre (70 μm /pixel).

4.2.6 Evolution du diamètre de Sauter

Pour conclure sur la caractérisation de la granulométrie des sprays, nous avons représenté l'influence de la pression de la veine d'essai sur l'évolution du diamètre de Sauter (Figure 111). Cette figure synthétise les résultats présentés précédemment.

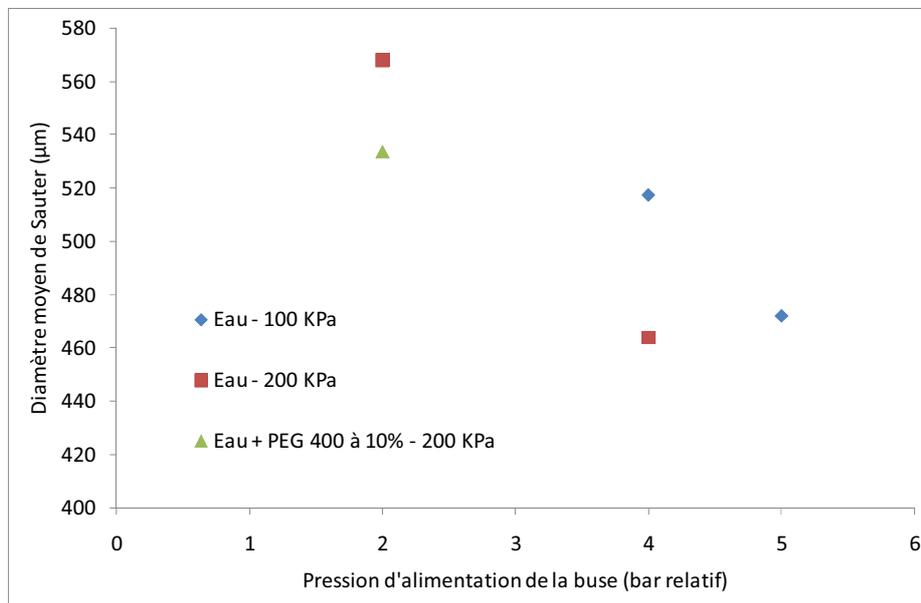


Figure 111 : Evolution du diamètre de Sauter en fonction de la pression d'alimentation de la buse relative à la pression ambiante dans la veine d'essai pour différentes conditions expérimentales

Rappelons que le diamètre moyen de Sauter (d_{32}) représente le rapport entre le volume des gouttes (représentatif de la quantité de liquide) et la surface des gouttes (permettant de caractériser l'évaporation à partir de la surface d'échange). Par conséquent, il est déterminant dans la plupart des phénomènes (1.3.2 *Evaporation* d'un spray).

La Figure 111 semble montrer dans le cas des sprays d'eau, qu'une augmentation de la pression ambiante entraîne une diminution du diamètre moyen de Sauter. En effet, une augmentation de la pression ambiante entraîne une augmentation de la masse volumique du gaz, ce qui favoriserait les frottements et donc la fragmentation. Par conséquent, cela se traduirait par une augmentation du nombre de Weber et une atomisation favorisée, ce qui pourrait entraîner une diminution du diamètre moyen de Sauter.

Cette figure permet aussi de déterminer l'influence de la pression d'alimentation de la buse sur l'évolution du diamètre moyen de Sauter. Dans les cas d'une pulvérisation d'eau dans une enceinte à

pression atmosphérique et celui d'une pulvérisation d'eau dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa, une augmentation de la pression d'alimentation de la buse semble entraîner une diminution du diamètre moyen de Sauter, ce qui pourrait également traduire une favorisation de l'atomisation.

Enfin, cette figure montre, en comparant les mesures réalisées pour une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa en relatif dans une atmosphère pressurisée à 200 KPa, dans le cas de l'eau et celui d'un mélange d'eau et de PEG 400 à 10%, qu'une diminution de la tension de surface entraîne une diminution du diamètre moyen de Sauter. En effet, une diminution de la tension de surface se traduirait par une augmentation du nombre de Weber, donc une atomisation favorisée et une diminution du diamètre moyen de Sauter.

Ainsi, au regard des résultats présentés précédemment et dans le cas de la situation accidentelle étudiée, on pourrait penser que trois facteurs privilégieraient l'atomisation du liquide pulvérisé à l'issue d'une perte de confinement catastrophique : une pression ambiante élevée, un fort débit à la brèche et un liquide avec une faible tension de surface. A présent, il reste à déterminer si la réunion de ces trois facteurs entrainerait également une augmentation du débit d'évaporation du jet.

4.2.7 Estimation du débit d'évaporation du spray

L'objectif de cette partie est d'estimer le débit d'évaporation du spray à partir des mesures granulométriques obtenues expérimentalement et proposées comme entrée du modèle d'évaporation de sprays modifié détaillé au paragraphe 2.3 *Modèle d'évaporation de spray*. Il s'agit de proposer une méthode permettant de caractériser l'influence de la pression ambiante sur le débit d'évaporation du spray à partir des distributions granulométriques obtenues expérimentalement. Ce modèle nécessite de déterminer les paramètres de la loi de Rosin-Rammler permettant de modéliser la distribution granulométrique obtenue expérimentalement. La Figure 112 représente l'influence de la pression ambiante sur le débit d'évaporation du spray en fonction de la hauteur par rapport au nez de la buse. Ce débit d'évaporation est obtenu à partir de distributions granulométriques au centre d'un spray d'eau pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (relatif).

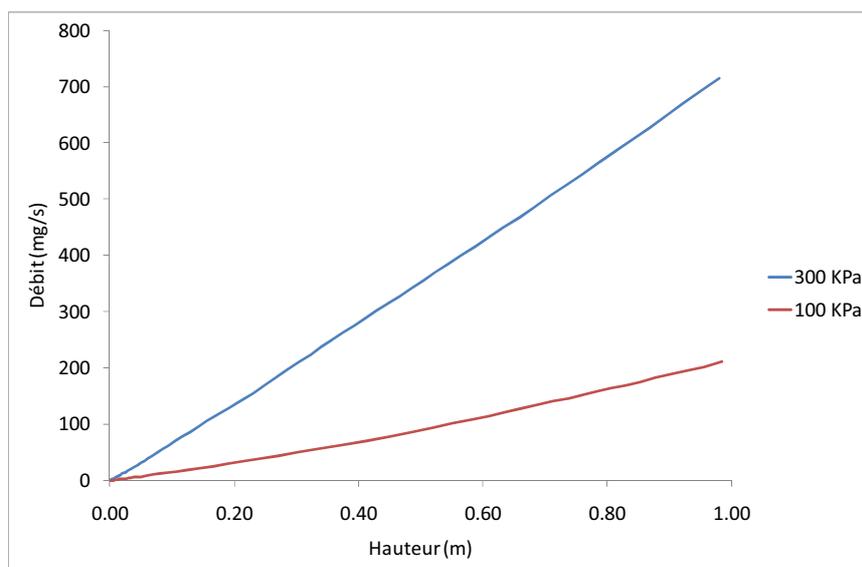


Figure 112 : Influence de la pression de la veine d'essai sur le débit d'évaporation d'un spray liquide pulvérisé avec une pression d'alimentation de la buse de 200 KPa (relatif) en fonction de la hauteur

La Figure 112 montre qu'une augmentation de la pression ambiante de 100 à 300 KPa entraîne une augmentation du débit d'évaporation du spray. En effet, il a été mis en évidence précédemment qu'une augmentation de la pression ambiante favorise l'atomisation. Cette figure suggère que les petites gouttes, celles qui ont été atomisées, gouvernent l'évaporation du spray. Ainsi, contrairement à l'évaporation d'une goutte, plus la pression ambiante est élevée, plus le spray s'évapore, parce que l'atomisation est favorisée avec l'augmentation de la pression ambiante. Cependant, ces résultats sont à pondérer car, compte-tenu de la résolution du pixel choisie pour l'étude du spray, les plus petites gouttes ne sont pas visibles et il est alors difficile de déterminer leur influence.

4.3 Conclusion

Ce dernier chapitre a présenté l'analyse des résultats obtenus, au cours de ces travaux de recherche, sur l'influence de la pression ambiante sur le comportement d'une goutte en chute libre et sur le comportement d'un spray.

Les mesures de diamètres initiaux de gouttes à partir de la technique de mesure optique développée au cours de ce travail de recherche ont mis en évidence une répétabilité de l'ordre de 2% pour les plus grosses gouttes (6.5 mm pour l'eau, 4.7 mm pour l'acétone et l'éthanol) et de l'ordre de 12% pour les plus petites gouttes de l'ordre de 2 mm. Il a été montré que les gouttes oscillent au début de la chute à cause de leur décrochage de la buse de pulvérisation jusqu'à atteindre une forme sphérique. Après 90 cm de chute, il semble qu'une augmentation de la pression ambiante entraînerait une déformation des plus grosses gouttes (4000 – 6000 μm): elles s'aplatissent. L'analyse du facteur de circularité d'Heywood a été réalisée et confirme ce résultat. Les mesures du diamètre des gouttes effectuées avec la technique de mesure optique mise au point présentent un écart de 4%, qui pourrait être diminué en tenant compte de la déformation des gouttes. Le modèle d'évaporation de gouttes en chute libre en milieu pressurisé développé permet de déterminer le diamètre des gouttes avec un écart maximal de 7.3% par rapport aux résultats expérimentaux. Les vitesses des gouttes ont aussi été mesurées par une technique optique et présentent un écart compris entre 1 et 5%. Ces mesures ont été comparées avec le modèle d'évaporation de gouttes tenant compte de la corrélation du coefficient de traînée de Loth (2008) introduisant le nombre de Weber pour tenir compte de la déformation de la goutte. Cette comparaison a mis en évidence un écart systématique de 10% entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle. Les mesures expérimentales ont permis de déterminer des valeurs du coefficient de traînée et de les comparer au modèle théorique. L'évolution du nombre de Weber a été caractérisée en fonction de la pression ambiante. Il a été mis en évidence que la goutte est de plus en plus déformée avec l'augmentation de la pression après 90 cm de chute et que la goutte reste stable au sens du critère de Taylor (1949). Enfin, il a été proposé une méthode d'estimation du débit évaporé à partir des mesures de diamètre qui montre l'existence d'une erreur d'un facteur 2 entre les résultats expérimentaux et les prédictions du débit massique d'évaporation de gouttes.

L'influence de la pression ambiante sur la granulométrie et l'évaporation de sprays a également été caractérisée. Il a été montré qu'il est nécessaire de bien caractériser la zone d'intérêt étudiée et l'éclairage car ces paramètres influencent fortement les distributions granulométriques. La répétabilité des distributions granulométriques a été présentée et modélisée par une loi log-normale. Enfin, trois paramètres opératoires principaux ont été testés et ont permis de dégager les

tendances suivantes : l'atomisation du spray semble être favorisée par une forte pression d'alimentation de la buse, une forte pression ambiante et un liquide avec une faible tension de surface. L'influence de la pression ambiante a été étudiée sur le débit d'évaporation du spray estimé à partir des distributions granulométriques expérimentales. Le modèle d'évaporation de sprays modifié et montre qu'une augmentation de la pression ambiante augmente le débit d'évaporation du spray. Ainsi, si une explosion conduit à une perte de confinement catastrophique dans un local de stockage industriel, l'évaporation des produits pulvérisés pourrait être favorisée par un fort débit à la brèche, une pression ambiante élevée et un liquide avec une faible tension de surface.

Conclusions et perspectives

Pour conclure, l'étude de la granulométrie d'un spray dans une enceinte close et pressurisée a été réalisée à l'aide d'une technique de mesure optique. Cette technique est composée d'une caméra rapide et d'un objectif, associé à un logiciel de traitement d'images. Les images sont acquises avec la caméra rapide complétée de l'objectif, puis traitées par le logiciel de traitement d'images, qui soustrait une image de fond aux images brutes, binarise les images soustraites et détecte les particules présentes dans les images traitées. Une procédure de calibration de la technique de mesure optique a été développée pour déterminer précisément la valeur seuil nécessaire à la binarisation. Un algorithme de détermination automatique du niveau de seuil a été développé et permet la mesure de particules de 400 μm à 6500 μm en chute libre avec une erreur maximale de 15% sur leur diamètre par rapport à des techniques de mesures reconnues. Cette détermination automatique du niveau de seuil est réalisée à partir du gradient maximal de luminosité entre la particule et le fond de l'image. Le protocole expérimental mis au point permet la réalisation d'essais répétables avec un écart moyen de 10% entre 3 essais consécutifs. Etant donné la quantité importante d'images disponibles, la séquence initiale d'images a été échantillonnée.

Grâce à cette technique de mesure calibrée, la caractérisation de la granulométrie et de l'évaporation d'un train de gouttes et de sprays a été réalisée.

Cinq tendances ont été mises en évidence pour caractériser le comportement de gouttes en milieu pressurisé. Il a été montré qu'une augmentation de pression entraînait une diminution de la vitesse des gouttes et un aplatissement des gouttes. La détermination du nombre de Weber dans le cas d'une goutte d'acétone de 4.7 mm laisse penser qu'une augmentation de pression entraîne une augmentation du nombre de Weber, ce qui traduit un aplatissement plus marqué de la goutte avec l'augmentation de la pression. Toutefois, il a été observé que la goutte se déforme, mais reste stable par rapport au critère de stabilité proposé par Taylor (1949). L'estimation du débit d'évaporation d'une goutte d'acétone de 4.7 mm de diamètre initial à partir de méthodes de diagnostic optique a mis en évidence un écart d'un facteur 2 entre les mesures expérimentales et les prédictions du modèle. Enfin, une augmentation de la pression ambiante sur une goutte en milieu pressurisé semblerait favoriser davantage la phase liquide que la phase vapeur, au regard des prédictions du modèle.

En ce qui concerne la caractérisation des sprays, nous avons vu qu'il est nécessaire d'utiliser un seuil et une largeur de classe adaptés. Les distributions granulométriques des sprays ont été modélisées par une loi log-normale et montrent que les gouttes sont plus petites à la périphérie qu'au cœur. Enfin, une augmentation de la pression dans la veine d'essai favorise l'atomisation du spray. Enfin, trois paramètres principaux favorisent l'atomisation : une forte pression d'alimentation de la buse, une forte pression ambiante et un liquide avec la plus forte tension de surface. L'influence de la pression ambiante a été étudiée sur le débit d'évaporation du spray estimé à partir du module ASTRRE et il en ressort qu'une augmentation de la pression ambiante augmente le débit d'évaporation du spray. Il reste à présent à vérifier ces résultats expérimentalement. Ainsi, si une explosion conduit à une perte de confinement catastrophique dans un local de stockage,

l'évaporation des produits pulvérisés sera favorisée pour un fort débit à la brèche, une pression ambiante élevée et un liquide avec une tension de surface importante.

Si on compare les résultats obtenus sur la caractérisation des gouttes et ceux sur la caractérisation des sprays, on remarque une compétition entre l'atomisation favorisée par l'augmentation de pression à l'échelle du spray et une diminution de la vaporisation due au coefficient de diffusion à l'échelle de la goutte.

Les perspectives à apporter à ce travail sont de deux types : les perspectives au niveau de la méthodologie et celles au niveau des résultats.

Pour compléter ce travail, il est nécessaire d'améliorer l'algorithme de détermination du niveau de seuil. L'erreur commise en utilisant cet algorithme pour mesurer le diamètre des particules doit être diminuée. De plus, il serait intéressant de valider cet algorithme pour des particules de tailles inférieures à 400 μm , ou encore de modéliser l'erreur en fonction de la taille des particules mesurées et de l'extrapoler à des tailles de gouttes plus petites.

Au niveau de la détermination des mesures expérimentales, une attention particulière devra être apportée à la détermination du diamètre des gouttes, notamment en tenant compte de la déformation de la goutte. Une autre possibilité consisterait à tenir compte de cette déformation dans le modèle d'évaporation de gouttes proposé : il s'agirait de travailler avec un modèle de goutte plate ou axisymétrique plutôt qu'à partir d'un modèle de goutte sphérique. L'application de ces méthodes permettrait d'améliorer l'estimation du débit d'évaporation des gouttes.

Une des perspectives de ce travail de thèse est de valider les mesures de tailles de gouttes des jets par imagerie par des méthodes basées sur l'Interférométrie à Phase Doppler, pour voir les très petites gouttes ou la granulométrie par diffraction laser, pour compléter l'interférométrie à Phase Doppler pas très adaptée à la mesure des grosses gouttes pouvant être rencontrées dans ce type de spray. Pour compléter les travaux de caractérisation du spray, il serait nécessaire de travailler avec des produits évaporatifs comme de l'éthanol et/ou de l'acétone et avec différentes buses.

Au niveau du développement du modèle de gouttes, les équations de la trajectoire de la goutte devraient être intégrées au modèle d'évaporation de gouttes. Le modèle d'évaporation de goutte développé devrait être extrapolé pour permettre la simulation d'un spray. La méthodologie de traitement d'images pourrait in fine être utilisée sur des essais à grande échelle, à plus haute pression et à plus haute température, à un jet complexe.

Références bibliographiques

- Allocca, L., Corcione, F. E., Fusco A., Papettl, F. and Succi, S., (1994) SAE Paper No. 941895.
- Amara, S., Lévy, N., Champoussin, J.-C. and Guerrassi, N., (1997) Effet de la température sur la taille des gouttelettes d'un jet Diesel, *Rev Gén Therm*, 36, pp. 51-58.
- Amsden, A.A., (1989) KIVA-2 : A computer Program for Chemically Reactive Flows with Sprays, Los Alamos National Laboratory report, LA-11560-MS.
- Amsden, A.A., (1997) KIVA-3V: A Block-Structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves, Los Alamos National Laboratory report, LA-13313-MS.
- Beard, K.V. et Pruppacher, H.R., (1971) A wind tunnel investigation of the rate of evaporation of small water drops falling at terminal velocity in air, *J. Atmos. Sci.*, 28, pp. 1455-1464.
- Boëdec, T., (1999) Caractérisation d'un spray dense à haute vitesse par diagnostic optique. Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon.
- Brauer, H., (1979) Fortschritte der Verfahrenstechnik, 17, 61.
- Buchlin, J.-M., (1988) Liquid sprays. Course Note 131/EA, von Karman Institute for Fluid Dynamics, Belgium.
- Cheremisinoff, N., (1986) Encyclopedia of Fluid Mechanics, vol. 3: Gas-liquid flows, Gulf Publishing Co., Houston, TX.
- Clift, R., Grace, J.R. et Weber, M.E., (1978) *Bubbles, Drops and Particles*, New York Academic Press.
- Crowe, C., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., (1998) Multiphase flow with droplet and particles, CRC Press Co., Boca Raton, FL.
- Curtis, E. W. and Farrell, P., (1988) Droplet vaporization in a supercritical microgravity environment, *Acta Astronautica*, 17, pp. 1189-1193.
- Curtis, E. W. and Farrell, P., (1992) A numerical study of high-pressure droplet vaporization, *Combust. Flame*, 90(2), pp. 85-102.
- Deprédurand, V. (2009) Approche expérimentale de l'évaporation de sprays de combustible multicomposant
- De Vriendt, A.B., (1982) *La Transmission de la Chaleur*. Gaétan Morin, Chicoutimi, Québec.
- Faeth, G.M., (1977) Current status of droplet and liquid combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 3(4), pp. 191-224.
- Faeth, G.M., (1983) Evaporation and Combustion of Sprays, *Prog. Energy Combust. Sci.* 9, pp. 1-76

- Fdida, N., Blaisot, J.-B., Floch, A. and Dechaume, D., (2008) Drop size measurement techniques applied to gasoline sprays, *ILASS 2008*, Sep. 8-10, Como Lake, Italy.
- Fuller, E. N., Schettler, P. D. and Giddings, J. C., (1966) *Ind. Eng. Chem.*, 58(5), 19.
- Giffen, E., and Lamb, T. A. J., (1953) The effect of Air Density on Spray Atomization.
- Givler, S. D. and Abraham, J., (1996) Supercritical droplet vaporization and combustion studies, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 22, pp. 1-28.
- Godsave, G.A.E., (1953) Studies of the combustion of drops in a fuel spray: the burning of single drops of fuel. In *4th Int. Symp. On Combustion*, pp. 818-830. The combustion Institute.
- Guella, S., Alexandrova, S. and Saboni, A., (2008) Evaporation d'une gouttelette en chute libre dans l'air, *International Journal of Thermal Sciences*, 47, pp. 886-898.
- Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., (1981) *Fundamentals of Heat Transfer*. John Wiley & Sons, New York.
- Jia, H. and Gogos, G., (1993) High pressure droplet vaporization; effects of liquid-phase gas solubility, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(18), pp. 4419-4431.
- Jia, H. and Gogos, G., (1992) Investigation of liquid droplet evaporation in subcritical and supercritical gaseous environments, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 6, pp. 738-745.
- Kadota, T. and Hiroyasu, H., (1976) Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures: 2nd Report, Theoretical study, *Bulletin of JSME*, 19, pp. 1515-1521.
- Kakaç, S., Shah, R.K. and Aung, W., (1987) *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. John Wiley & Sons, New York
- Kim, J.Y., (2000) Study of internal flow characteristics and atomization performance of effervescent atomizers, Kaist, Korea.
- Kim, H.S. et Sung, N.S., (2001a) *KSME J. (B)*, 25(6), p. 811.
- Kim, H.S. et Sung, N.S., (2001b) *KSME Int. J.* 15(8), pp. 1196.
- Kim, H. and Sung, N. (2003) The effect of ambient pressure on the evaporation of a single droplet and a spray, *Combustion and Flame*, 135(3), pp. 261-270.
- Koh, K.U., Kim, J.Y. and Lee, S.Y., (2001) Determination of in-focus criteria and depth of field in image processing of spray particles, *Atomization and sprays*, 11, pp. 317-333.
- Lebrun, D., Touil, C.E. and Özkul, C. (1996) Methods for the deconvolution of defocused-image pairs recorded separately on two CCD cameras: application to particle sizing, *Applied Optics*, 35, pp. 6375-6381.
- Lecysyn, N. (2008) Etude et modélisation des effets d'un impact balistique sur un réservoir, Thèse de l'université d'Aix-Marseille.

- Lee, S.Y. and Kim, Y.D., (2003) Sizing of spray particles using image processing technique, 9^{ème} ICLASS *proceeding*, Lecture plénière, Sorrento, Italie.
- Lee, S.Y., Park, B.S. and Kim, I.G., (1991) Gray level factors used in image processing of two-dimensional drop images, *Atomization and sprays*, 1, pp. 389-400
- Lin, S. P. and Ibrahim, E. A., (1990) Instability of a viscous liquid jet surrounded by a viscous gas in a vertical pipe, *Journal of Fluid Mechanics*, 218, pp. 641-658.
- Liu, B.A., Mather, D., Reitz, R.D., (1993) SAE Paper No. 930072.
- Liu, S and Reitz, R.D., (1997) An analysis of the distortion and breakup mechanisms of high speed liquid drops, *International Journal of Multiphase Flow*, 23 (4), pp. 631-650.
- Loth, E., (2008) Quasi-steady shape and drag o deformable bubbles and drops, *International Journal of Multiphase Flow*, 34 (6), pp. 523-546.
- Malot, H. and Blaisot, J.-B., (2001) Droplet size distribution and sphericity measurements of low-density sprays through image analysis, *Particle & Particle Systems Characterization*, 17, pp. 146-158.
- Manrique, A. and Borman, G., (1969) Calculations of steady state droplet vaporization at high ambient pressures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12, pp. 1081-1095.
- Matlosz, R., Leipziger, S. and Torda, T., (1972) Investigation of liquid drop evaporation in a high temperature and high pressure environment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15, pp. 831-852.
- McQuaid, J., (1975) Air entrainment into bounded axisymmetric sprays, *The Institution of Mechanical Engineers*, 189.
- Michel, L. (2010) Inventaire 2010 des accidents technologiques, Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer.
- Nomura, H., Ujiiie, Y., Rath, H. J., Sato, J. and Kono, J., (1996) Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions, *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The combustion Institute, Pittsburgh, 26, pp. 1267-1273.
- Ochs, M., (1990) Verdunstung monodisperser frei beweglicher Brennstoff-Tropfen in einer turbulenten Heissluftströmung, Abhandlung, Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich.
- O'Rourke, P.J., Amsden, A.A., (1987) SAE Paper No. 872089.
- Pretrel, H., (1997) *Etude du comportement thermohydraulique de pulvérisations liquides sous l'effet d'un rayonnement infrarouge. Application à la protection incendie par rideau d'eau*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- ProSim SA, Bâtiment A – BP 2738 F-31312 Labège, France, <http://www.prosim.net>
- Pruppacher, H.R. et Rasmussen, R., (1979) A wind tunnel investigation of the rate of evaporation of large drops falling at terminal velocity in air, *J. Atmos. Sci.*, 36, pp. 1255-1260.

- Putnam, A., (1961) Integratable Form of Droplet Drag Coefficient, *ARS J.*, 31, pp. 1467-68
- Ranz, W. E. and Marshall, W. R., (1952) Evaporation from drops, *Jr. Chem Engineering / Chem. Engr. Prog.*, 48, pp. 14-146 – 173-180.
- Sacadura, J.-F. (1985) *Initiation aux Transferts Thermiques*. Technique et Documentation, Paris.
- Sartor, J.D. and Abbott, C.E., (1975) Prediction and measurement of the accelerated motion of water drops in air, *J. Appl. Meteor.*, 14, pp. 232-239.
- Sazhin, S.S., (2006) Advanced models of fuel droplet heating and evaporation, *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(2), pp. 162-214.
- Schiller, L., and Naumann, A.Z., (1933) Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung, *Ver. Deut. Ing.*, 77, pp. 318-320.
- Sirignano, W.A., (1999) *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Spalding, D.B. (1953) The combustion of liquid fuels, *Symposium (International) on Combustion*, 4, pp. 847-864.
- St-Georges, M., (1993) *Etude hydrodynamique des pulvérisations liquides pour application aux rideaux d'eau*, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard – Lyon 1.
- Stengele, J., Prommersberger, K., Willmann, M. and Wittig, S., (1999) Experimental and theoretical study of one- and two-component droplet vaporization in a high pressure environment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, pp. 2683-2694.
- Takahashi, S., (1974) Correlations for prediction of molecular diffusivities in liquids, *J. Chem. Eng. Japan*, 7, pp. 417-420.
- Taylor, G.I., (1949) The shape and acceleration of a drop in a high-speed air stream. Advisory Council on Scientific Research and Technical Development, Ministry of Supply, AC 10647/Phys. C69.
- Tsakamoto, T. and Niioka, T., (1993) Numerical simulation of fuel droplet evaporation and ignition under high temperature and high pressure, *Prog. Astro.Aero.*, 152, pp. 263-279.
- Vargaftik, N.B., (1983) *Handbook of physical properties of liquids and gases*, Hemisphere Publishing. Corp., Washington, DC.
- Yildiz, D., Rambaud, P., Van Beek, J. and Buchlin, J., (2006) *Congrès francophone de techniques Laser*, Toulouse.
- Yon, J., (2003) *Jet diesel haute pression en champ proche et lointain : Etude par imagerie*, Faculté des sciences de l'université de Rouen
- Zhu, G. S. and Aggarwal, S. K., (2000) Transient supercritical droplet evaporation with emphasis on the effects of equation of state, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, pp. 1157-1171.

Annexes

Annexe 1 : Descriptif technique de la caméra Pike-F032B

Annexe 2 : Descriptif technique de la caméra Photron SA3

Annexe 3 : Descriptif technique du supertelescope Questar FRI MKIII

Annexe 1 :

Descriptif technique de la caméra Pike-F032B

AVT PIKE F-032B / F-032C

AVT PIKE F-032B / F-032C fiber



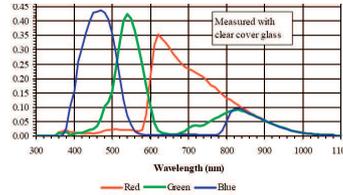
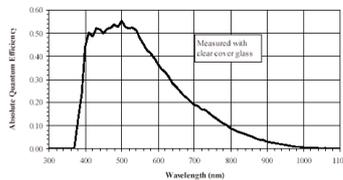
Fast – smart – perfect: 1394b goes PIKE

The AVT PIKE camera family is equipped with an IEEE1394b-S800 interface, as well as high-quality CCD sensors and comes in a surprising variety of different versions for the most demanding applications. The PIKE offers a selection of five different high-quality sensors (b/w and color) with high sensitivity and true-to-life color reproduction. To meet the highest requirements in the industry, the PIKE comes optionally in a version with a copper daisy chain connection or 1xcopper combined with 1x GOF (850nm MMF, LC connector). This not only saves costs in multi-camera operations but also makes it possible to use up to 500 meters of cable. The direct fiber technology of the PIKE in the GOF version also provides for equalization of potential and EMC-independence. The high data rates of the PIKE (max 62.5 MByte/s) and a huge number of smart features ensure an extraordinary performance in PC-based image processing. The integrated image pre-processing of the PIKE not only reduces demands on PC computer power, but also cuts system costs by eliminating the now unnecessary frame grabbers.

Highlights

- VGA (640 x 480)
- Up to 205 fps (full resolution)
- Progressive Scan CCD, monochrome and color
- True Partical Scan (higher frame rates by smaller AOI)
- flexible AOI, flexible Speed (full Format 7 support)
- Opto-Coupled asynchronous image trigger
- Image Preprocessing Features:
 - Auto controlled Gain, Exposure, White Balance (Separate Reference AOI)
 - Color Correction, Hue, Saturation
 - Real Time Shading Correction
 - Programmable LUT
 - and lots more ...
- Smart Frame Grabber Features:
 - Image FIFO Memory (105 full frames)
 - Safe Data Transfer Mode
 - Single Shot, Multi Shot, Free Run
 - 2 prog. Inputs / 4 prog. Outputs
 - On boards RS-232 Port
 - and lots more ...
- Industry proven and robust housing
- C-Mount, CS-Mount
- Angled Head and Customized Housings

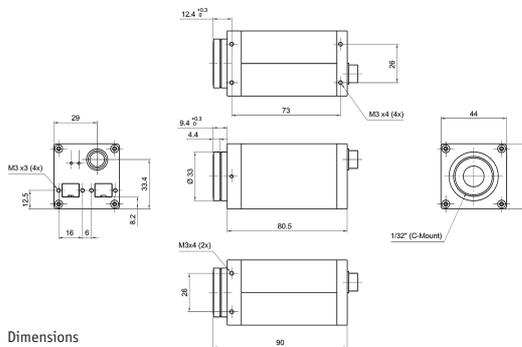
AVT PIKE F-032B / F-032C
AVT PIKE F-032B / F-032C fiber



Aoi_HEIGHT	fps
480	205
240	380
120	650
60	1000
30	1000
10	1000

Sensor Specifications b/w; color
(extracted from the data sheet of the sensor - excluding lens and filter)

Copper / Daisy Chain
Copper / GOF connections



Dimensions



Pin	Signal
1	External GND
2	External Power (8...36V DC)
3	GP Output 4
4	GP Input 1 (Default: Trigger)
5	GP Output 3 (Default: Busy)
6	GP Output 1 (Default: IntEna)
7	GP Input GND
8	RxD (RS-232)
9	TxD (RS-232)
10	GP Output Power
11	GP Input 2 (TTL)
12	GP Output 2

Camera Specifications

	PIKE F-032 B/C	PIKE F-032 B/C fiber
Image Device	1/3" (Diag. 5.92mm) progressive scan, KODAK IT CCD	
Effective Picture Elements	648 (H) x 488 (V)	
Picture Size	640 (H) x 480 (V) (all modes and color formats)	
Cell Size	7.4µm x 7.4µm	
Resolution Depth	8 Bit / 10 Bit / 12 Bit / 14 Bit / 16 Bit (High SNR Mode)	
Lens Mount	C-Mount, CS-Mount	
Digital Interface	1394b, 2 x Bilingual (Daisy Chain)	1394b, 1xBilingual, 1xLC Fiber MMF (850nm), (Daisy Chain)
Transfer Rate	100, 200, 400, 800 Mbit/s	
Frame Rates	205fps (b/w and raw), 142fps (YUV 4:1:1), 106fps (YUV4:2:2), 71fps (RGB)	
Gain Control	mono: Manual 0 - 24dB, Auto Gain; color: Manual 0 - 20dB, Auto Gain	
Shutter Speed	20µs ... 67s, Auto Shutter, Level Mode	
External Trigger Shutter	Programmable, Trigger-Level-Controlled Single Trigger, Bulk Trigger, Programmable Trigger Delay	
Smart Features	AGC, AEC, AWB, Color Correction, Hue, Saturation, Real Time Shading Correction, LUT, 64MB Image Memory, Safe Data Transfer Mode, Storable User Sets, 2 progr. Inputs / 4 progr. Outputs, RS-232 Port, etc.	
Power Requirements	DC 8 - 36V (via IEEE1394 port or HIROSE)	
Power Consumption	Typ. 5 Watt (@ 12V DC)	Typ. 5.5 Watt (@ 12V DC)
Dimensions	44 mm x 44 mm x 95 mm (incl. connectors, without lens)	
Mass	< 250 g (without lens)	
Operating Temperature	+5°C ... +45°C (non condensing)	
Storage Temperature	-10°C ... +60°C (non condensing)	
Regulations	EN 55022, EN61000, EN55024, FCC Class A, DIN ISO 9022 (ROHS in preparation)	
Options	Removable optical filters, Angled Head, Power Out (Hirose), APIs, DirectX, Linux, etc.	

Annexe 2 :

Descriptif technique de la caméra Photron SA3

FASTCAM SA3

A rugged, megapixel High-Speed imaging system for General Application and Automotive Safety Test recording

2,000fps operation at 1024 x 1024 pixels

Designed to provide ruggedness and reliability, the Photron FASTCAM SA3 offers high performance recording for a broad range of applications in research and development and automotive safety testing.

Like the award winning FASTCAM MH4 multi-head camera system the FASTCAM SA3 ensures system stability under HiG conditions and long term system reliability.

FASTCAM SA3 system design features built-in battery for backup of images stored in memory in case of power loss, optional keypad with integrated viewfinder and Gigabit Ethernet communication.

Utilizing the same CMOS imaging sensor as FASTCAM APX-RS, FASTCAM SA3 provides exceptional light sensitivity, image quality and colour fidelity.

Two FASTCAM SA3 models are available:

Model 60K: 1024 x 1024 pixel resolution at frame rates up to 1,000fps

Model 120K: 1024 x 1024 pixel resolution at frame rates up to 2,000fps

Both systems offer higher frame rates at reduced image resolution and two microsecond global shutter.



FEATURES

- ❑ Performance examples:
 - FASTCAM SA3 Model 60K**
1024 X 1024 pixels @ 1,000fps
768 x 768 pixels @ 1,500fps
512 x 512 pixels @ 3,000fps
256 x 256 pixels @ 7,500fps
and at reduced resolution up to 60,000fps
 - FASTCAM SA3 Model 120K**
1024 X 1024 pixels @ 2,000fps
768 x 768 pixels @ 3,000fps
512 x 512 pixels @ 6,000fps
256 x 256 pixels @ 15,000fps
and at reduced resolution up to 120,000fps
- ❑ Recording in 12-bit or 8-bit data formats to extend record time.
- ❑ Suitable for operation in HiG environments. Operation tested to 100G, 10m sec, 6 axis.
- ❑ 17µm pixel size to ensure high light sensitivity for demanding frame rate or low light applications
- ❑ 2µs global shutter selectable independent of frame rate.
- ❑ Composite video output for real time monitoring during set up, recording and playback
- ❑ Optional remote keypad control with integrated viewfinder
- ❑ 2GB or 4GB recording memory options
- ❑ Internal battery for memory back up in case of power loss.
- ❑ High performance Gigabit Ethernet interface.

Photron

Frame Rate v Image Resolution:

Frame Rate (fps)	FASTCAM SA3 Model 60K Maximum Resolution (pixels)	FASTCAM SA3 Model 120K Maximum Resolution (pixels)
1,000 fps	1024 x 1024	1024 x 1024
1,500fps	768 x 768	1024 x 1024
2,000fps	512 x 512	1024 x 1024
3,000fps	512 x 512	768 x 768
5,000fps	512 x 256	512 x 512
6,000fps		512 x 512
7,500fps	256 x 256	512 x 256
10,000fps	512x128	512 x 256
15,000fps	128 x 128	256 x 256
20,000fps	256 x 64	512 x 128
25,000fps	256 x 64	256 x 128
30,000fps	512 x 32	128 x 128
50,000fps	256 x 16	256 x 64
60,000fps	128 x 16	512 x 32
75,000fps	/	256 x 32
100,000fps	/	256 x 16
120,000fps	/	128 x 16

Recording duration at 1,000fps with 1024 x 1024 pixel image resolution:

	Standard 2GB memory capacity Seconds / (Frames)	Optional 4GB memory capacity Seconds / (Frames)
8-BIT recording mode	2 seconds / 2,000 frames	4 seconds / 4,000 frames
12-BIT recoding mode	1.36 seconds / 1,360 frames	2.72 seconds / 2,720 frames

- Sensor** 12-bit CMOS (Bayer system color, single sensor) with 17µm pixel size
- Shutter** Global electronic shutter from 16.7ms to 2µs independent of frame rate
- Lens Mount** Interchangeable F-mount and C-mount using supplied adapters
- Memory** 2GB (standard), 4GB (optional)
- Internal battery** Internal battery for 30 minutes back up of data stored in memory
- Video Output** NTSC/ PAL composite VBS (BNC). Ability to zoom, pan and tilt within image via keypad (option). Live video during recording.
- Camera Control** Through optional keypad with integrated viewfinder and Gigabit Ethernet or RS-422A
- Low light mode** Low light mode selection for simple camera adjustment when working in low ambient light, high frame rate or short exposure modes.
- Triggering** Selectable positive or negative TTL 5Vp-p or switch closure
- Trigger delay** Programmable delay on selected input and output triggers, 100ns resolution
- Phase Lock** Enables cameras to be synchronized precisely together to a master camera or external source
- Event markers** Ten user entered event markers mark specific events within the image sequence in real time. Immediately accessible through software.
- Dual Speed Recording** Enables the recording speed to be changed up or down by a factor of 2,4 or 8 during a recording.
- Recording Modes** Start, End, Center, Manual, Random, Random Reset, Random Center, Random Manual and Dual Speed Recording.
- Saved Image Formats** JPEG, AVI, TIFF, BMP, RAW (compressed or uncompressed) PNG and FTIF (8 bit). Images can be saved with or without image or comment data.
- Data Display** Frame Rate, Shutter Speed, Trigger Mode, Date or Time, Status (Playback/Record), Real Time, Frame Count and Resolution
- Partitioning** Up to 10 memory partitions may be set by the user.
- Operating Temperature** 0-40 degrees C
- Mounting** 1x ¼-20 UNC, 1x 3/8-16 UNC, 6x M6
- Dimensions and Weight** 220mm L x 120mm W x 120mm H, weight 4kg (without lens)
- Power requirements** 100V - 240V AC ~ 1.5A, 50-60Hz optional DC operation 18-36 VDC, 90VA

Specifications subject to change without notice.

PHOTRON (EUROPE) LIMITED
 The Barn, Bottom Road
 West Wycombe
 Bucks, HP14 4BS
 United Kingdom
 tel +44 (0) 1494 481011
 fax +44 (0) 1494 487011
 email: image@photron.com
 www.photron.com

PHOTRON USA, INC.
 9520 Padgett Street, Suite 110
 San Diego
 CA 92126-4446
 USA
 tel 858.684.3555 or 800.585.2129
 fax 858.684. 3558
 email: image@photron.com
 www.photron.com

PHOTRON LIMITED
 Fujimi-Cho 1-1-8
 Chiyoda-Ku
 Tokyo 102-0071
 Japan
 tel +81 (0) 3 3238-2106
 fax +81 (0) 3 3238 2109
 email: image@photron.co.jp
 www.photron.co.jp

Annexe 3 :

Descriptif technique du supertelescope Questar FRI MKIII



Microscopes Longue Distance

SUMMARY

Généralités.....	2
QM 1	10
QM 100	12
FR-1 MKIII.....	14
Power Pack 100.....	16
Caractéristiques Optiques	18

Microscopes

At a working distance greater than a few millimeters, no optic will match the resolving power and magnification of Questar's Long Distance Microscopes. Questar is the pioneer of long distance microscopy and stand-alone, non-contact optical measurement systems. In the past ten years, Questar's microscopes and measurement systems have received two "IR 100" awards and a Photonics "Circle of Excellence" award.

Our microscopes are manufactured with hand-figured, matched optics, using the same care that we put into our space-qualified telescopes.

Although each instrument differs in working distance, magnification, resolution and depth of field, features common to all models include:

- Two selectable ports allow the simultaneous mounting of two detectors, or an eyepiece and camera.
- The close working instruments have an integrated beamsplitter which allows for coaxial illumination.
- No external parts move when focusing.
- Each is equipped with eyepiece and C-mount, and compatible with 35 mm SLR's.
- All are compatible with our mounting accessories.
- All are supplied with supplemental optics which give an 8 to 1 variation in field of view and depth of field at a fixed working distance.
- All are available in a motorized, microprocessor controlled, variable magnification version.

QM 1

The QM 1 was the first of our Long Distance Microscopes. It has a working range of 55 cm to 1,7 meters and remarkable depth of field, linearity and chromatic correction. The QM 1 is an indispensable tool for a wide variety of laboratory and industrial uses. It is provided with either a tripod mount or a heavier full barrel mount.



QM-100

The QM 100 provides the highest magnification and resolution available from any optic in its working range. The contrast in images produced by this instrument is incomparable.

- 15 cm to 35 cm working range.
- 375 to 8 mm field of view (2/3" format).
- Resolves 1,1 micron separation.



FR 1

The FR 1 is a full range instrument with a working range from 1 meter to infinity. At 50 meters the FR 1 will allow the reading of newsprint. In production applications requiring distances of more than a few feet, the FR 1 is a flexible and very high performance supertelephoto lens.

- 1 meter to infinity working range.
- Resolves 12 microns separation at 3 meters.
- Ideal for alignment applications.

- 55 cm to 1,7 meter working distance.
- 0,9 to 15 mm field of view (2/3" format).
- Resolves 2,7 microns separation.
- Distorsion 1 part in 15 000 edge to edge.

Specialized configurations

We offer specialized versions of each instrument. These configurations offer additional unique performance characteristics.

POWER PAK 100

For those applications where the highest magnification and resolution are necessary, Questar offers the PowerPak 100. This aplanat and Barlow combination for your QM 100 provide a 25% increase in resolving power at a distance of 10 centimeters. Now you can safely observe your sample with sub-micron feature resolution.

MARK III

The MARK III is a specialized barrel design with optimized boresight retention over the full focusing range, a capability necessary for critical alignment applications. The MARK III is available with motorized focus, and the spacing of the optical elements may be encoded to provide feedback for measurement along the optical axis.

SZ M

The Step Zoom microscopes incorporate programmable control of five magnifications, four in-line filters, and focus.

A microprocessor refocuses the microscope when required as a result of changes in magnification or filtration, and all functions can be addressed via an RS-422 port.

All motorized functions are stepper driven, and a status report of lens functions is displayed in an LCD window on the hand control. The barrel design is based upon the Mark III and shares the focus characteristics of that instrument.



Step Zoom microscopes SZ M

Ruggedized Construction: Questar's ruggedized design was originally developed for the extreme demands of space flight. It allows our microscope to perform in harsh environment, surviving 10G's of shock and vibration. Complete environmental enclosures for optics, cameras, and mechanical components are provided for high humidity, volatile and corrosive atmospheres.

Extended Ultraviolet and Infrared Imaging: The standard configuration of all of our microscopes provides transmission from 330 nanometers to 2,3 microns. Fused silica is available with any instrument which provides extended range, 200 nanometers to 3,5 microns.

Accessories

At Questar we know that great images begin with great optics, but we also know that the image is no better than the least functional component of the system.

Our approach to protecting the performance of our optics is to offer carefully balanced and integrated components that work together to solve specific problems.

Video

Video imaging in laboratory and production environments often requires specialized techniques. We have had years of experience producing video images through our optics, and have the technical support of some of the best manufacturers in the industry. We can provide you with the most appropriate hardware and guide you in the development of the best technical approach.

Lighting

Lighting is the most critical aspect of any imaging application. We use fiberoptic light guides to keep the source of heat away from the optical path, and to put the desired amount of light only where needed. Three types of fiberoptic illuminators are available: continuous quartz halogen, continuous very high-intensity metal halide, and controllable high-output stroboscopic. The QM 1 and QM 100 are equipped to be used with brightfield or oblique illumination.

Filtering

We believe in doing as much as possible with the light itself. The fastest and least expensive image processing is optical. Optical filters can greatly enhance contrast and help offset the problems introduced by heat or excessive reflectivity. They also may be used to isolate or block a specific wavelength, reduce glare, enhance a specific feature, or control the amount of light that reaches the camera.

QM 1 with CCD camera and analog image processor.



QM 100 with fiberoptic illuminator and bright field adapter.



Three axis linear positioning stage with optical encoders.

Image storage

Image storage and documentation are available in several forms. Both film and video tape can be used to store continuous images, and our optics are used very successfully with high frame-rate cameras. We offer a variety of video printers which provide instant hard-copy output of images. The QRMS II includes the most highly developed storage capability available in a free standing video system, featuring a complete image archival and post-processing section that stores not only images, but all other digital and analog data to be correlated with the images.

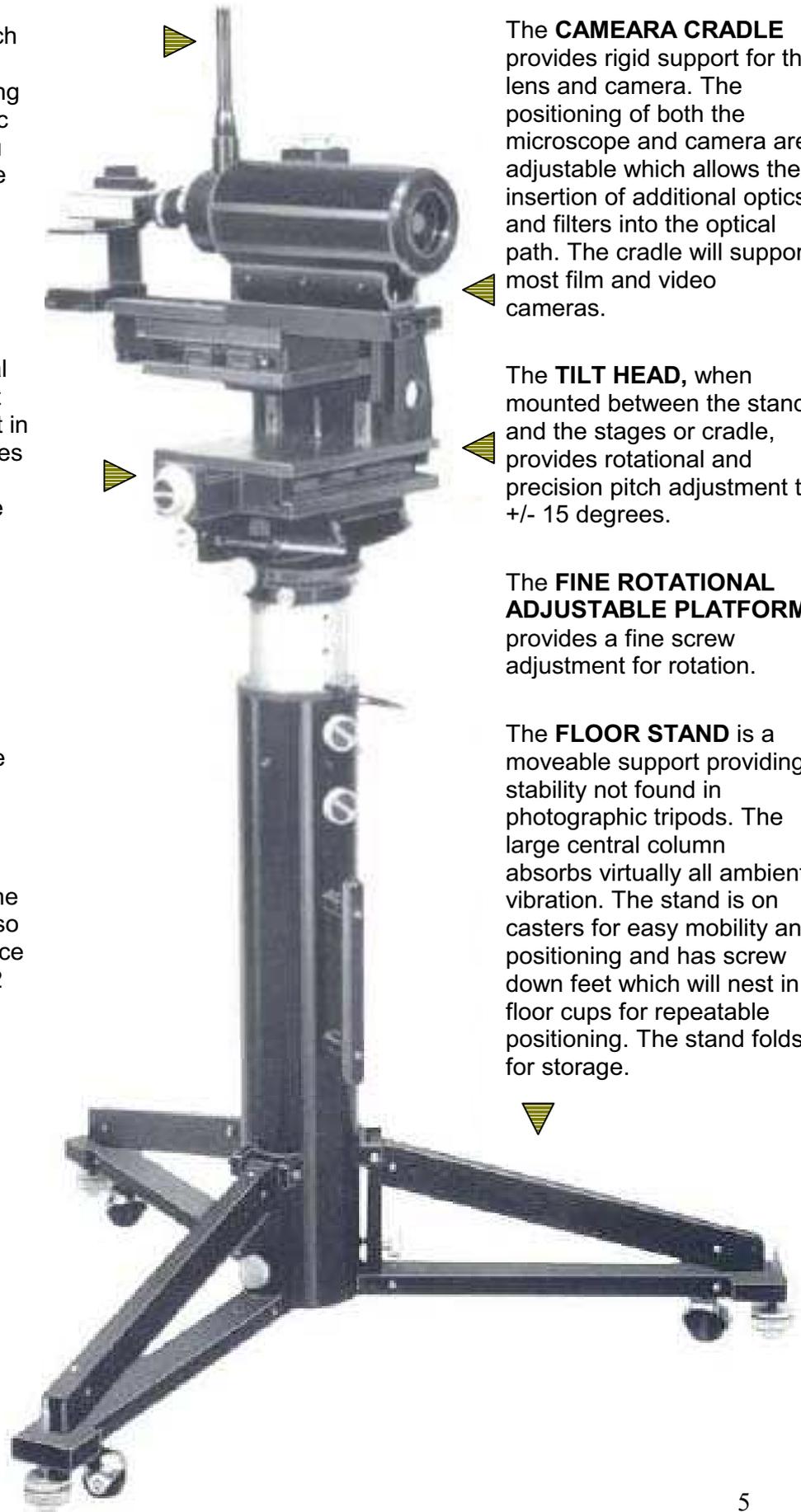
Fixturing

Fixturing is the key to convenient, repeatable, vibration-free use of our optics. Control over positioning is essential when you are moving around a one millimeter field of view from a distance 1000 times greater than the field width. Our Floor Stand is easily moved but has the mass to dampen ambient vibration. The Camera Cradle holds all hardware coupled to the lens firmly on-axis. We manufacture all of our accessories to exacting specifications, resulting in the assurance that components can be added later without fear of incompatibility. For installations in hostile production environments, we package our systems in weatherized enclosures.

We provide a projection **TARGET LIGHT** with each microscope to make focusing easier. By shining this light through the optic and onto the subject, you can quickly determine the area at which the optic is properly focused.

The **POSITIONING STAGES** are an essential part of any measurement system and greatly assist in the use of our microscopes by providing precise and repeatable location of the object plane. Our stages are provided in one, two and three axis combinations.

Horizontal and vertical motion cover 100 mm of travel, and the focus axis stage covers 50 mm. The stages are available in a manual thimble drive configuration, or in a motorized version controlled by joy-stick. The motorized version can also be controlled by any device equipped with an RS-232 interface. Position and displacement are measured with optical encoders integrated into the stages.



The **CAMERA CRADLE** provides rigid support for the lens and camera. The positioning of both the microscope and camera are adjustable which allows the insertion of additional optics and filters into the optical path. The cradle will support most film and video cameras.

The **TILT HEAD**, when mounted between the stand and the stages or cradle, provides rotational and precision pitch adjustment to +/- 15 degrees.

The **FINE ROTATIONAL ADJUSTABLE PLATFORM** provides a fine screw adjustment for rotation.

The **FLOOR STAND** is a moveable support providing stability not found in photographic tripods. The large central column absorbs virtually all ambient vibration. The stand is on casters for easy mobility and positioning and has screw down feet which will nest in floor cups for repeatable positioning. The stand folds for storage.

Applications

Since the introduction in 1983 of the award-winning QM 1 Long Distance Microscope, we have sold hundreds of microscopes and measurement systems for use in a wide variety of applications.

Measurement

The microscopes may be used for measurement within the field of view and over areas many times the field of view. Using Questar positioning stages, we conservatively state measurement accuracy at 2 microns.

Measurements can include linear, angular and area, and the correlation of dimensional change as a function of time or other relevant parameters.

Our systems have been successfully used in measurement applications including real-time measurement of crystal growth, thermal expansion, fatigue crack propagation, roller gap clearance, web thickness, and turbine blade deflection.

Alignment and positioning

Alignment of two objects can be performed within the same plane, or when one object is behind another.

Applications have included the centering of the core of fiberoptics communications cable, machine tool positioning, laser and electron beam spot alignment, scanning tunneling microscope and hyperbaric chamber probe positioning.

Process monitoring

The large working distance of our optics allows for the real-time observation of a process without the need to periodically remove a part to be checked under a microscope. Real-time observation can provide whole new insights into a dynamic process, such as the progressive failure of optical coatings under test conditions, particle behavior in an airflow, or the deposition of contaminants on remote surfaces. Undesirable variations in manufacturing processes can be detected and corrected before expensive errors are made.

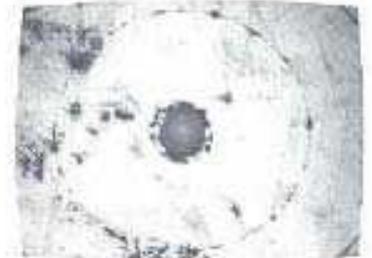
Our microscopes can be used visually, with video and film cameras up to a 35 mm format, and with a variety of other detectors such as line scan and IR cameras.

We provide the tools to make difficult subjects visible-incandescent, high speed, low contrast, highly reflective. We have had extensive experience using high frame rate film and video cameras, and offer several unique high speed capabilities with the QRMS II. Among the applications that we have successfully solved are the analysis of dynamics; high speed machine tool diagnostics, such as surface mounting; and small scale dynamic events such as droplet sizing and flow rate.

*Video Image of metallic composite with fatigue crack
F.O.V. – 430 μ
Working distance :
15 cm*



*Video Image of fiber optical communication cable
F.O.V. – 160 mm
Working distance:
15 cm*



*Video image of optical cable
F.O.V. – 455 μ
Working distance:
15 cm*



*Video Image of hypodermic needle
F.O.V. – 1,87 mm
Working distance:
70 cm*





Materials testing: The monitoring and measuring of materials behavior during dynamic and static testing is our most recurrent application. Our microscopes and measurement systems are ideally suited to the problem of acquiring data during a test. The long working distance of our systems allow easy manipulation of the sample, high temperature viewing, and good depth of field for rougher, unpolished surfaces. Variable magnification coupled with high measurement accuracy are also available to exactly correlate your image data for a more accurate interpretation of your test history.

Space Shuttle heat shield: After the first launch of the Space Shuttle, it was apparent that the tiles used to protect the ship from the intense heat needed to be modified. Before a solution to the problem could be developed, scientists needed to understand the dynamics of the material failure. A Questar microscope, used to monitor a sample tile surface during simulated atmospheric re-entry conditions, led to the development of a solution.

Roller gap clearance: Mechanical methods for measuring the gap between two rollers or a roller and a knife edge are inaccurate, and generally cannot be performed during the rolling process. Questar has developed a linear dimensional monitor which will provide a continuously updating record of the current clearance as well as maximum and minimum values over a selected period of time. The system can provide an output for interface to an external control unit.

Pick and place diagnostics: Questar's combination of long working distance, high magnification, and fast lens speed results in instruments ideally suited for use in high-speed imaging of small-scale machine tool performance. A great deal of empirical trial and error can be reduced with effective high-speed imaging. One application involved the discovery of where in a pick and place procedure a component was being cracked. By identifying the precise instant of crack initiation, our client avoided a possible recall of thousands of these electronic ignition components.

Crystal growth: In the process of drawing a synthetic crystal, the growth rate needs to be monitored. The difficulty faced in this particular application is that the crystal grown at an extremely high temperature, and the monitoring of the crystal must occur near the seed.

Metallic particles in paint: An automobile manufacturer wanted to be able to develop a method for aligning the particles in metallic paint during the painting process to insure even coloration. Our microscope coupled with a high speed video camera allowed the testing of various environmental changes during the process until an appropriate technique was developed.

Inclusions in glass boules: The materials used for optical components, like those used in our own instruments, must be as free as possible from imperfections such as bubbles and flecks of foreign material. Before the material is cut into pieces that are sold to manufacturers, the locations of these imperfections need to be mapped so that the most efficient use of the material can be assured. We delivered a version of one of our measurement systems that allowed for the mapping of large pieces of a ceramic material, opaque to the eye but transparent in the near infrared. Using a two-axis measurement system and one of our Mark III microscopes with encoded optical spacings, we were able to generate a useful map of features otherwise hidden until revealed through cutting.

Injection-plastics molding: A plastics manufacturer developed a technique for molding a part larger than the required dimension, and then reducing it to specification by baking it. The problem he had was determining how long and at what temperature to bake the part. By being able to monitor the shrinkage directly while the part was baking, the customer was able to circumvent the very labor intensive process of repeatedly removing the part from the oven, recording the bake parameters, and measuring the part under a conventional measuring microscope.

Remote Measurement Systems

The QRMS Series of systems is available in 3 different configurations, to fit differing measurement and budget requirements.

Features common to all include:

- Measurement without the need of a calibration reference, which means you aim and shoot, without the errors of miscalibration.
- Measurement at microscopic accuracies over areas many times larger than the video field of view.
- Microscopic accuracies without moving the subject, and the ability to move the system from one application to another.
- Each level of the QRMS Series is directly upgradeable to the next, which means that as you discover new uses requiring more capability, the system grows with you.
- Focusable without effecting image scale for consistent documentation and measurement.
- Analog video enhancement.
- Dual video inputs.
- Cost effective.

QRMS I: Remotely Controlled Measuring Microscope

The QRMS I is a remotely operable system with a desk top rack mount for the displacement readouts, joystick controller analog image processor and controller for the cursors. In addition to performing linear measurements, the system will display reference dimensions and tolerances on a video screen. This device is ideally suited for dimensional monitoring in manufacturing environments.

- *All motion and focusing remotely operated.*
- *RS-232 communications interface.*
- *Analog image processor.*
- *Single or dual cursors allowing displacement measuren*



QRMS M: Portable Measuring Microscope

The QRMS M is a completely portable, manual system. With the exception of the video monitor, all components are integrated into the Floor Stand. It is ideal for general use where it will need to be moved frequently and where space is limited.

- *2 axis linear measurement.*
- *Centered single cross hair for maximum simplicity of use.*
- *Analog image processor.*
- *5 microns displacement values displayed at stage head, upgradeable to 1 micron.*
- *Sets up to be measuring in minutes.*



QRMS II: Programmable Image and Data Acquisition and Analysis System

The QRMS II is a completely integrated, computer-based system with image processor and a graphical control environment. It was cited with an IR 100 Award as one of the 100 most significant new Technical Products for 1992. The QRMS II puts a variety of menu-driven video image and storage modes within easy reach of an end-user who has better things to worry about than how to make good images. The QRMS II allows for the acquisition of any combination of analog, digital and video data. Image acquisition can be synchronized to an external source, and internal graph and reporting functions display and analyze results. Computer hardware includes 80486-based workstation, VGA color monitor, dual buffer 8-bit frame grabber, and proprietary Q-Sync video / strobe synchronization system.

- *Turnkey video image and data acquisition system.*
- *Includes unique strobe synchronization capability.*
- *Performs multiple linear and angular measurement.*
- *Correlates measurement from image to image.*
- *Programmable for unattended operation.*

Features

QRMS Remote Measurement Systems

	QRMS M	QRMS 1	QRMS II		QRMS M	QRMS 1	QRMS II
Video Modes				Cursor Control			
Live / Continuous	*	*	0	Single, fixed, centered	*	*	*
Live / Strobe (30 frames/sec)	0	0	*	Double, adjustable (go/no-go)	N/A	*	*
Snapshot (random)	0	0	*	Black / White	*	*	*
Syncshot (synchronized strobe)	0	0	*	Solid / Dotted	*	*	*
Animation	0	0	*	Double, Calibrated	0	0	*
Scan	N/A	N/A	*	Multiple markers	N/A	N/A	*
Unattended operation	N/A	N/A	*	Frame to frame	N/A	N/A	*
Image Acquisition Analysis				Motion Control Positioning			
Hardware				Manual positioning	*	*	*
B / W CCD camera	*	*	*	Motorized w / Joystick	N/A	*	0
Analog processor for camera	*	*	*	Hand-held control pad	N/A	*	0
12" Video monitor	*	*	*	Encoder feedback, 2-axis	*	*	N/A
Frame grabber	N/A	N/A	*	Encoder feedback, 3-axis	0	0	*
Software				Digital position indicator	0	*	*
Snap single frame	0	0	*	Remote position indicator	0	*	*
A / D data sampled with image	0	0	*	5 micron resolution	*	N/A	N/A
Digital data sampled with image	0	0	*	1 micron resolution	0	*	*
Project	N/A	N/A	*	Lighting			
Image Storage Output				Quartz halogen	*	*	0
VCR	0	0	0	40" light pipe	*	*	*
Frame grabber	0	0	*	Articulated pipe stand	*	*	*
Digital tape storage	N/A	N/A	0	Strobe	0	0	*
Optical disk	N/A	N/A	0	Strobe trigger unit	0	0	N/A
Video printer	0	0	0	Q-Sync synchronization system	0	0	*
Scan / Mosaic (RMS-II)	N/A	N/A	0	Fixturing			
HP Laser Jet printout	N/A	N/A	*	Floor Stand	*	*	*
Measurement				Camera Cradle	*	*	*
Horizontal	*	*	*	Tilt Head	*	*	*
Vertical	*	*	*	Rack mount	N/A	*	0
Area	N/A	N/A	*	Computer cart	N/A	N/A	*
Diagonal (Point – Point)	0	0	*	N/A - Not available			
On-screen within the field of dimension (stored image)	0	0	*	0 - Optional			
Go / No-go crosshair	0	*	*	* - Standard with system			
Frame-frame (between frame)	N/A	N/A	*				
Change of dimension vs. time	N/A	N/A	*				
Included angle	N/A	N/A	*				
Scan	N/A	N/A	*				
Mosaic	N/A	N/A	*				



QM 1 Short Mount
Long-Distance
Microscope
(#30001)

The QM 1, for which Questar Corporation received an IR-100 award in 1983, was the first of a new series of long-distance microscopes. It has a working range of 22 to 66 inches, a 30 to 1 variability in field of view, and remarkable depth of field, linearity and chromatic correction which make it an indispensable tool for a wide variety of laboratory and industrial applications. The QM 1 includes two selectable ports, and is compatible with standard eyepieces, 35 mm, and video formats.

Type:	Maksutov Cassegrain Catadioptric		
Working Range:	560 mm (22 inches) to 1520 mm (66 inches), subject plane to front element.		
Clear Aperture:	89 mm (3.5 inches).		
Entrance Pupil:	Primary Mirror 96 mm (3.8 inches).		
Relative Aperture/ Numerical Aperture:	Working Distance	N.A.	f/no
	1400 mm (55 inches)	.0288	16.8
	1020 mm (40 inches)	.0385	12.9
	700 mm (27.5 inches)	.0511	10
	560 mm (22 inches)	.0580	8.7
Resolution:	Better than 3 microns at 22 inches		
Magnification:	To 125 times visual, to 12 times at image plane.		
Format:	Diffraction limited field 12 mm, 18 mm nearly diffraction limited.		
Back Focal Distance:	70 mm (2.75 inches) minimum measured from back plate.		

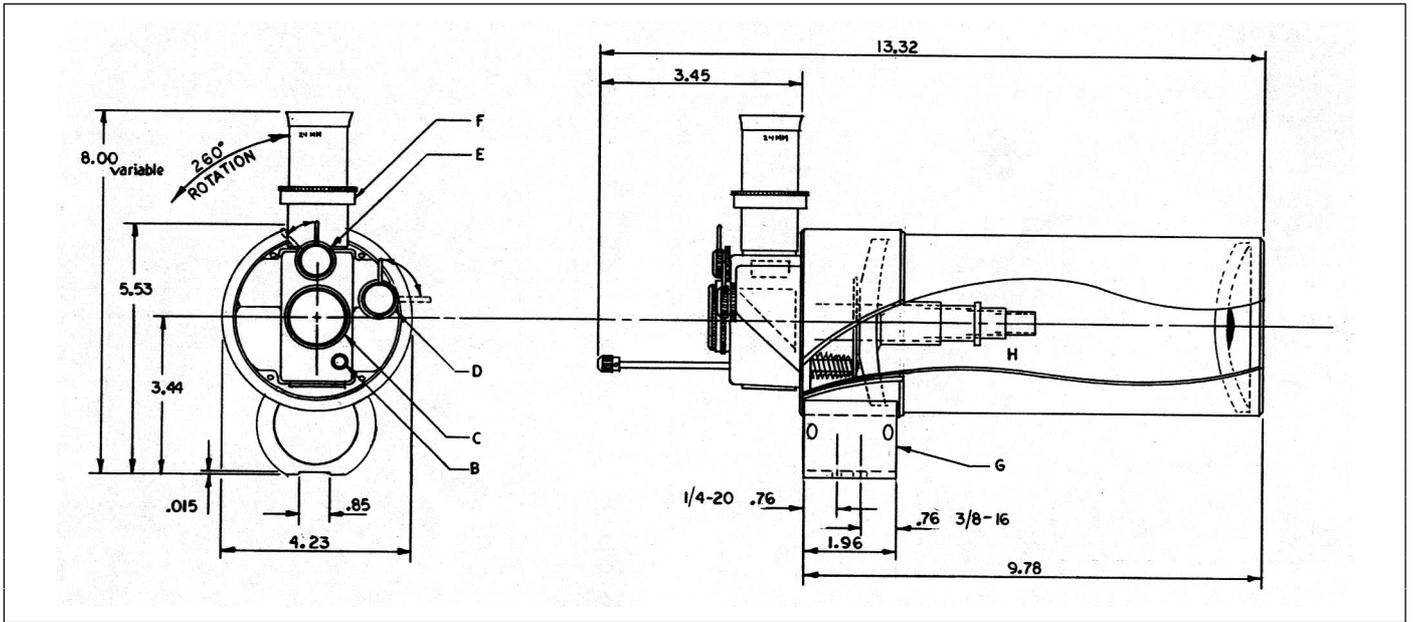
Optics

Corrector:	BK7, Magnesium Fluoride Coated, 89 mm (3.5 inch) diameter.
Primary Mirror:	Pyrex, Aluminum Coated, SiO overcoated, 96 mm (3.8 inch) diameter.
Secondary Mirror:	Aluminum Coated, R1 surface of corrector, 22 mm (.87 inch) diameter.
Baffling:	Helix in central tube, all interior surfaces black anti-reflection coated.

Mechanical

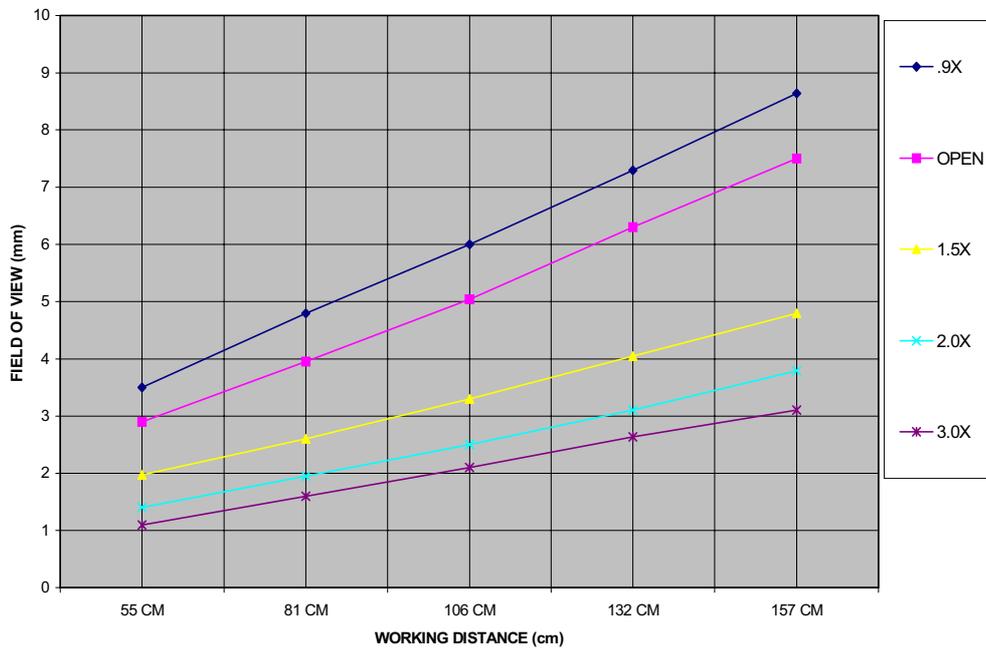
Barrel:	Aluminum Hollow Bar, machined full length, with integrated lens cell, black anodized. Length (with control box) 30.5 cm (12 inches); Outside diameter 10.8 cm (4.25 inches); Weight 3.25 pounds.
Rear Closure Plate:	With stainless steel central tube - precision machining and alignment after assembly.
Focusing Mechanism:	Mirror thimble integral with stainless steel sliding tube. Slides on fixed, stainless steel light baffle tube (centerless ground).
Control Box:	Cast Aluminum, selectable axial or 90° port. Internally mounted 1.5X Barlow selectable for 90° port, flick knob controlled.
Knobs:	Aluminum 24S-T4, corrosion-resistant, hand-turned on turret lathe, stainless steel shafts and levers.

*Specifications subject to change without notice.



- | | | | |
|-----|----------------------------------|-----|---|
| B - | MAIN SYSTEM FOCUS ROD | F - | DIOPTER ADAPTER FINE FOCUS, TOP PORT |
| C - | AXIAL PHOTOGRAPHIC PORT | G - | MOUNT BRACKET - STANDARD ROTATING MOUNT |
| D - | MAIN SYSTEM PRISM ACTUATION KNOB | H - | INTERNAL MAIN SYSTEM OPTICS AND BAFFLE SYSTEM |
| E - | INTERNAL BARLOW ACTUATION KNOB | | |

QM-1 Field of View (2/3" CCD)



QM 100
Long-Distance
Microscope
(#30003)



The QM 100 combines the compactness and ease of use of the QM 1 with the relative aperture and resolution of the larger microscopes. For applications requiring high magnification and resolution, and which allow the user to work from distances of 15 cm. to 35 cm., the QM 100 is uncontested in performance and flexibility.

Specifications

Type:	Maksutov Cassegrain Catadioptric		
Working Range:	15 cm (6 inches) to 35 cm (14 inches), subject plane to front element.		
Numerical Aperture:	Working Distance	N.A.	f/no
	33.5 cm (14 inches)	.083	6.0
	25.4 cm (10 inches)	.115	4.3
	15 cm (6 inches)	.142	3.5
Resolution:	1.1 microns at 15 cm (6 inches).		
Magnification:	To 34 times at image plane.		
Format:	Diffraction Limited Field 12 mm.		

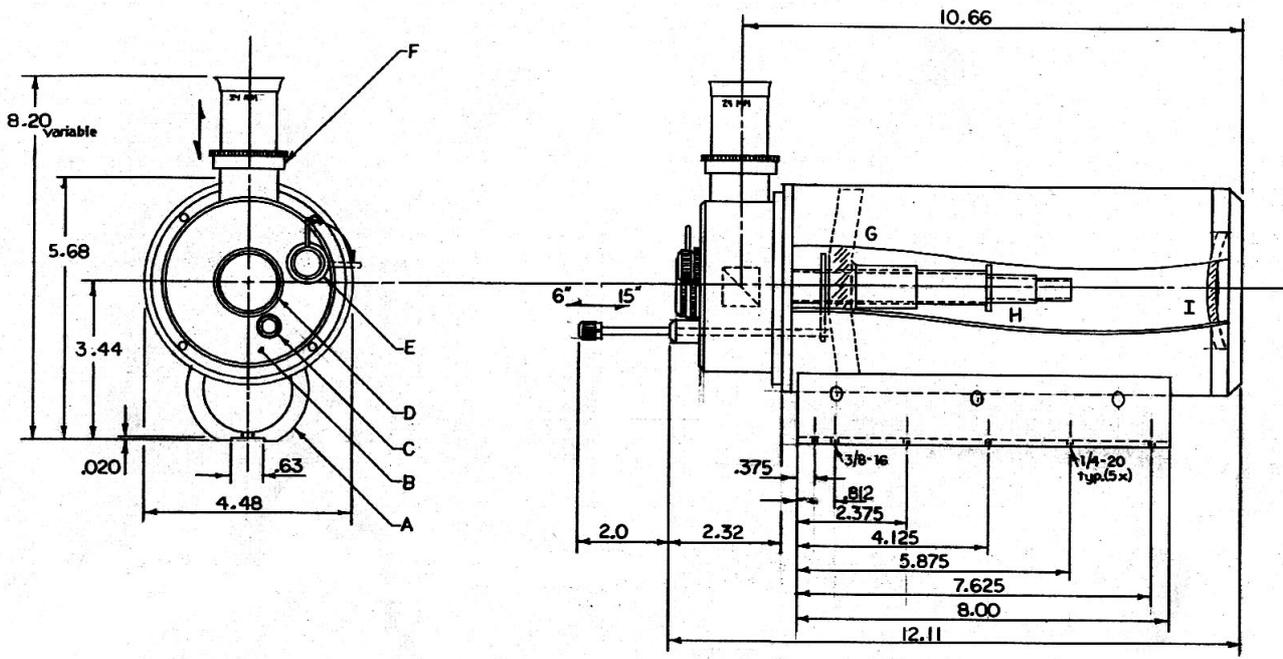
Optics

Corrector Lens:	BK7, Magnesium Fluoride Coated, 63 mm (2.5 inch) diameter.
Primary Mirror:	Pyrex, Aluminum Coated, SiO overcoated 104 mm (4.1 inch) diameter.
Secondary Mirror:	R1 Surface of Corrector, Aluminum Coated, 16 mm (.63 inch) diameter.
Baffling:	Helical in central tube, all interior surfaces anti-reflection coated.

Mechanical

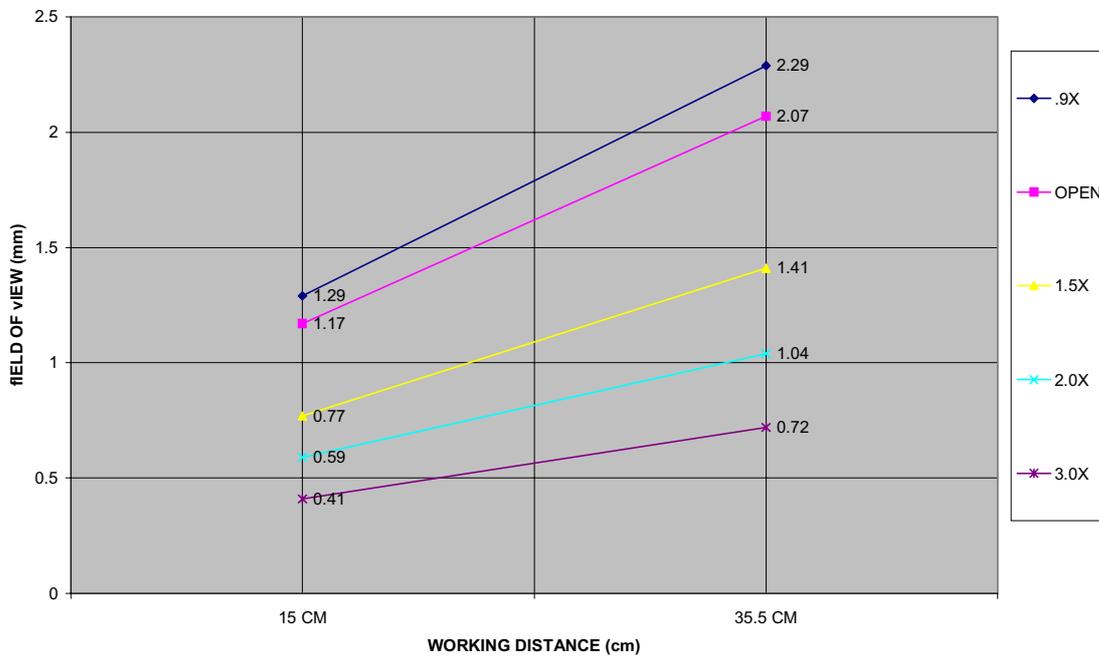
Barrel:	Aluminum, machined from seamless stock, threaded lens cell black anodized. Length 32 cm (12.6 inches), outside diameter 11.4 cm (4.5 inches), weight 2.27 kg (5 lbs).
Rear Closure Plate:	Aluminum with stainless steel main tube holder plate, adjustable centering.
Focusing Mechanism:	Mirror thimble integral with stainless steel sliding tube. Slides on fixed, stainless steel light baffle tube (centerless ground). Conical s.s. spring loaded Focus rod s.s. 303, precision ground, 24 TPI; integrated inside control box.
Control Box:	Machined aluminum, selectable axial or 90° port. Internal beamsplitter standard flickknob controlled.
Knobs:	Aluminum, 24S-T4, corrosion resistant, stainless steel shafts and levers.
Mount:	Full barrel length, 1/4" - 20 and 3/8" -16 mounting holes.

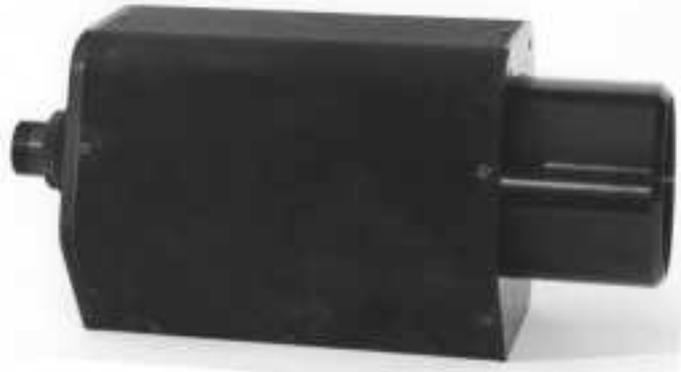
* Specifications subject to change without notice.



- | | |
|----------------------------------|---|
| A – TRIPOD MOUNT | F – DIOPTER ADAPTER AND EYEPIECE (REMOVE TO INSTALL TARGET LIGHT) |
| B – CONTROL BOX | G – PRIMARY MIRROR AND FOCUS ASSEMBLY |
| C – FOCUS KNOB & BUSHING | H – MAIN TUBE AND BAFFLE ASSEMBLY |
| D – AXIAL PHOTOGRAPHIC PORT | I – CORRECTOR AND LENS CELL |
| E – BEAM SPLITTER ACTUATION KNOB | |

QM100 Field of View (2/3" CCD)





FR-1 MKIII

(#33004)

The FR-1 provides superb close-focus performance from 3ft (91cm) to Infinity. It delivers the telescopic performance for which Questar is famed. The FR-1 is designed for accuracy and performance. It utilizes the Questar MKIII precision tube assembly design. There are no spacers, extenders, or diopters required. The FR-1 tube design allows for extended internal focus travel to accommodate this wide focus range. Focus is smooth and stable. The MKIII barrel design allows for integration of additional options such as motorized focus and future upgrade to SZ 83000 series. The improved boresight accuracy of this instrument provides greater accuracy in alignment applications. Equipped with a C-mount adapter and camera coupling set, this unit is ready to attach to any CCD camera with a standard C-thread, and flexibility to be useful in virtually any situation.

SPECIFICATIONS

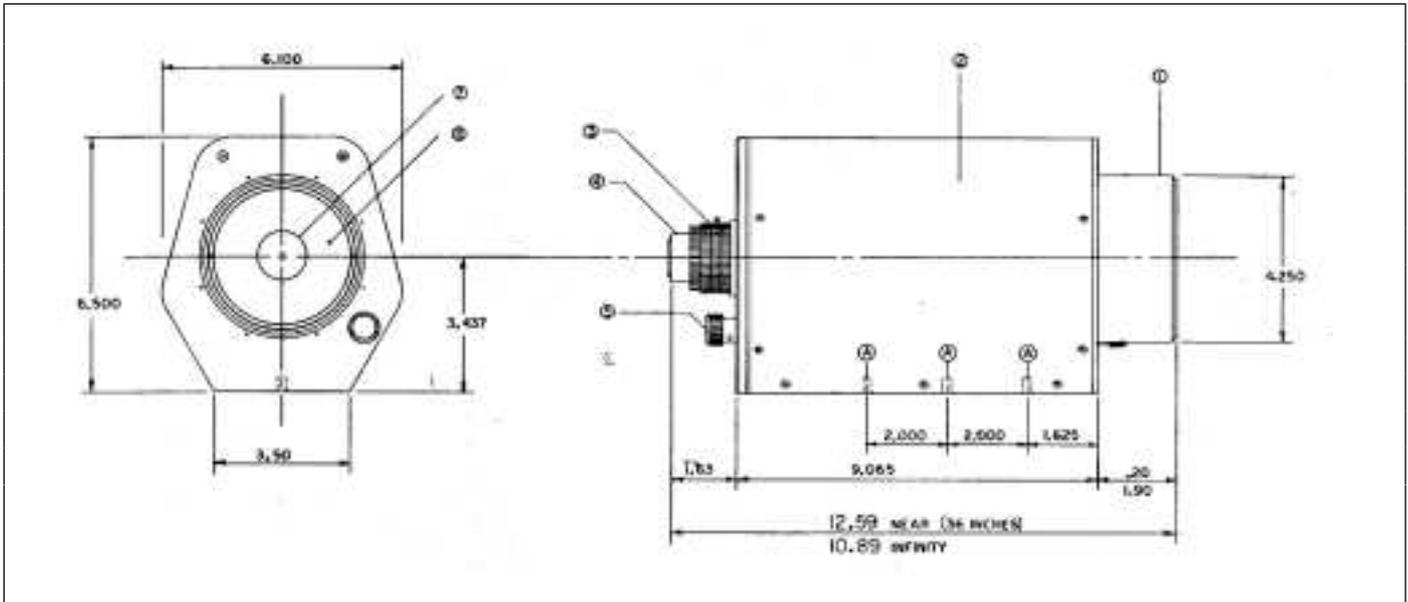
Type	Maksutov Cassegrain Catadioptric
Working range	91cm (36 inches)
Resolution	6 microns at 91cm (36 inches)
Focal length	visual: 1400mm at 2.75 BFD at f/16 photographic: 3200mm at f/32
Magnification	Variable depending on BFD, Auxiliary Lens & Imaging Device
Format	Diffraction limited field 18mm

OPTICS

Corrector Lens	BK7, MgF ₂ coated, 89mm (3.5 inch) diameter
Primary Mirror	Pyrex, Aluminum coated, SiO overcoated, 96mm (3.8 inch) diameter
Secondary Mirror	Aluminum coated, R-II surface of corrector, 29mm (1.14 inch) diameter
Baffling	Helix in central tube, black anti-reflection coated.

MECHANICAL

Barrel	Aluminum plate, machined & black anodized, modular fabricated construction
Lens Cell	Hollow bar, machined & black anodized, precision turned mounting surface & pilot flange
Focus Mechanism	Corrector focus 6 point bearing structure, 6 precision pressed & loaded bearing & matched stainless steel slide rods, direct drive lead screw focuser & matching anti-backlash ball nut & bronze support bearings
Mirror Mounting	Fixed position, 3" diameter stainless steel mounting plate, matched & fitted to barrel assembly, mirror thimble precision thread to match plate
Knobs	Aluminum
Hardware	Stainless steel



Magnification Chart for the FR-1

Working Distance	FR-1 Objective	Auxiliary Lens to 16mm Eyepiece					With 2/3" Format Camera & 14" Monitor
		0.9x	Open	1.5x	2.0x	3.0x	
1 meter	1.332x	9.5x	10.5x	15.8x	21.0x	31.5x	21.8x
2 meters	0.674x	18.7x	20.8x	31.2x	41.6x	62.4x	43.1x

** The above magnifications other than the "OPEN" column are extrapolated data.

** when comparing video and eyepiece magnifications, use the "OPEN" column. Much of the difference here occurs in the artificial magnification from the CCD to the monitor. This sometimes results in "empty" or "useless" magnification. We recommend that overall resolution and field of view be compared for exacting calculations.

** Although eyepiece magnifications are significantly less than CCD magnifications, comparable resolution is achievable due to the resolution limitations of CCD technology and the exceptional physiology of the human eye.

** 1" = 25.4mm

Format/Field Width	6.9mm (at 36") to 15mm (at 96") for video 19.5mm (at 36") to 44.5 (at 96") for 35mm SLR 32mm eyepiece – 17.8mm (at 36") to 41mm (at 96") visual 24mm eyepiece – 15mm (at 36") to 36mm (at 96") visual 16mm eyepiece – 10mm (at 36") to 23mm (at 96") visual 12mm eyepiece – 7.6mm (at 36") to 15mm (at 96") visual
Magnification	32mm eyepiece – 9X (at 36") to 4X (at 96") 24mm eyepiece – 13X (at 36") to 5X (at 96") 16mm eyepiece – 17X (at 36") to 7X (at 96") 12mm eyepiece – 25X (at 36") to 9X (at 96")

Power Pak 100 (# 39487) **Specification Sheet**



3X Barlow & Aplanat

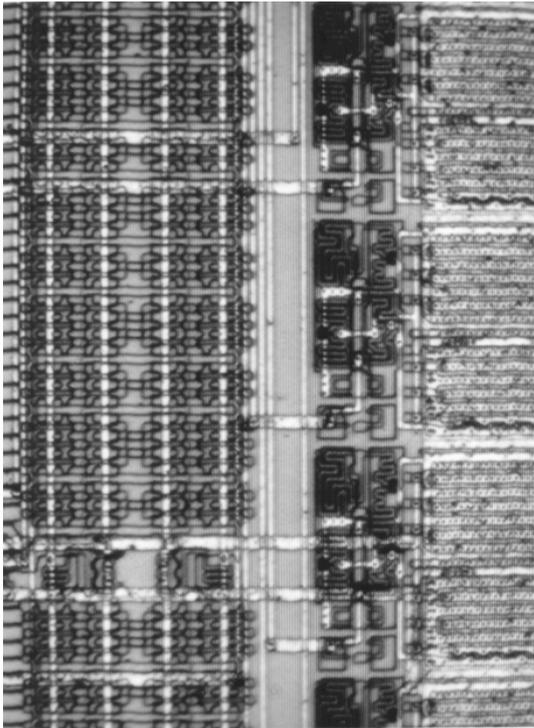
PowerPak 100 is specifically designed to increase the resolution and magnifying power of the QM 100 long distance microscope.

With the addition of the package's aplanat lens attachment, sub-micron characteristics are observable at a working distance of 10 centimeters. To overcome the limitations of CCD pixel technology or to just get a better look visually, the PowerPak 100 package also includes a Questar designed 3X magnifying lens. Fields of view ranging down to 250 microns are possible.

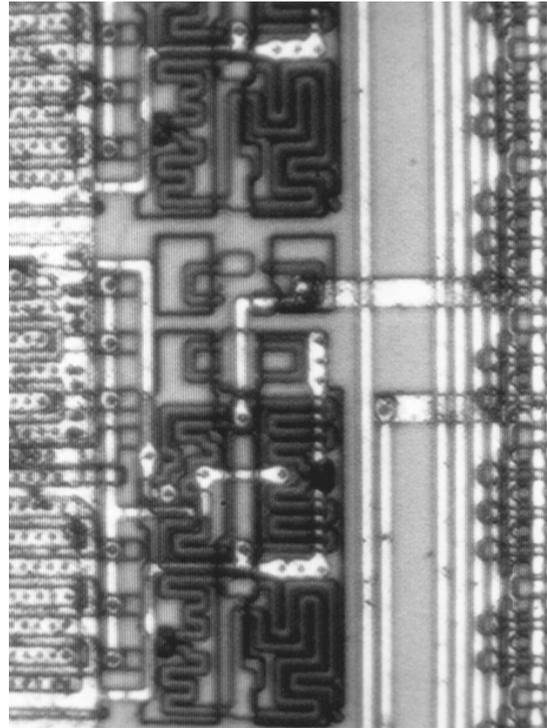
Include the PowerPak 100 package with your newly purchased QM 100 or order it as an addition to your current instrument.

Specifications:

Weight aplanat:	4.75 ounces
Weight 3X lens:	Less than 1 ounce
Theoretical resolution:	550 lp/mm @ 546.1nm
Empirical resolution:	Better than 500 lp/mm (test chart limited)
Numerical aperture:	0.185 @ 10cm
Objective magnification:	8.1X
Working distance:	9-11 centimeters
Dimensions:	Ø 7.5cm x 1.7cm



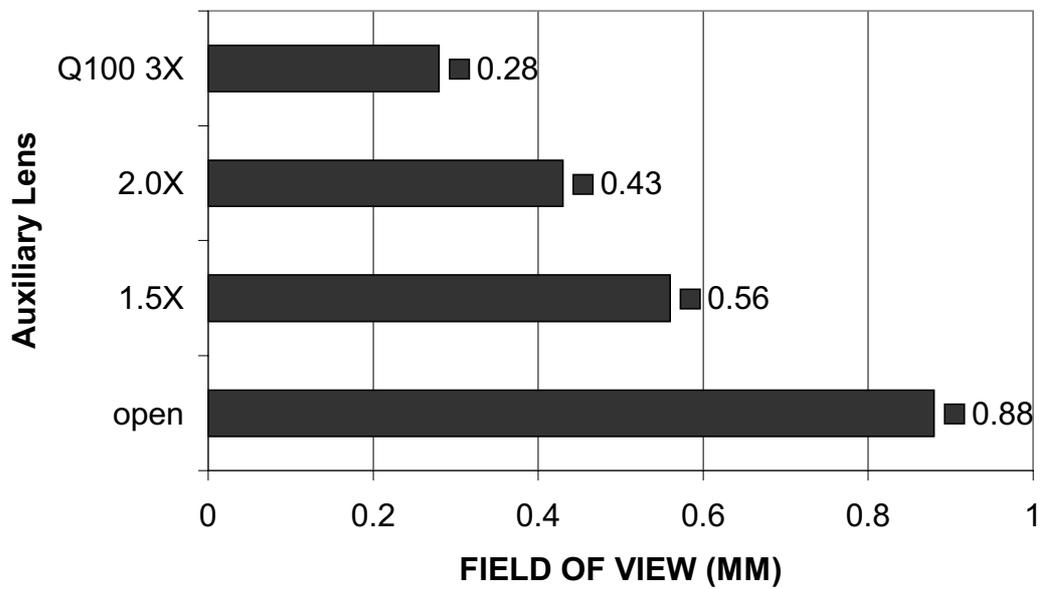
FOV: 340 x 250 microns



FOV: 720 x 550 microns

Etched Wafer Segment

**Fields of View Using Questar QM100 and Aplanat Lens
with Auxiliary Lenses (using 2/3" format camera)**



F-number and Depth of Field Data for the QM 100 Barrel Configuration in the OPEN Position

Working Distance	Numerical Aperture	F-number	Depth of Field
6''	0,139	22,1	28 μm
7''	0,129	21,9	32 μm
8''	0,126	21,1	34 μm
9''	0,117	20,6	39 μm
10''	0,115	19,5	41 μm
11''	0,107	19,4	47 μm
12''	0,098	19,8	56 μm
13''	0,091	20,1	65 μm
14''	0,084	20,4	77 μm

The formula used for depth of field calculations is based on the Raleigh criterion. It is as follows:

$$(0,5)(\lambda)(NA)^2 \text{ where } \lambda=0,546 \mu\text{m.}$$

Perceived depths of field will vary with the user, camera and wavelength. In general, they will increase when a camera is used.

F-number and Depth of Field Data for the QM 1 Barrel Configuration in the OPEN Position

Working Distance	Numerical Aperture	F-number	Depth of Field
22''	0,061	20,1	146 μm
26''	0,054	19,6	187 μm
30''	0,048	19,1	236 μm
34''	0,044	18,8	282 μm
38''	0,040	18,4	341 μm
42''	0,037	18,2	398 μm
46''	0,034	18,0	472 μm
50''	0,032	17,8	533 μm
54''	0,030	17,7	606 μm
58''	0,028	17,6	696 μm
62''	0,026	17,5	807 μm
66''	0,025	17,3	873 μm

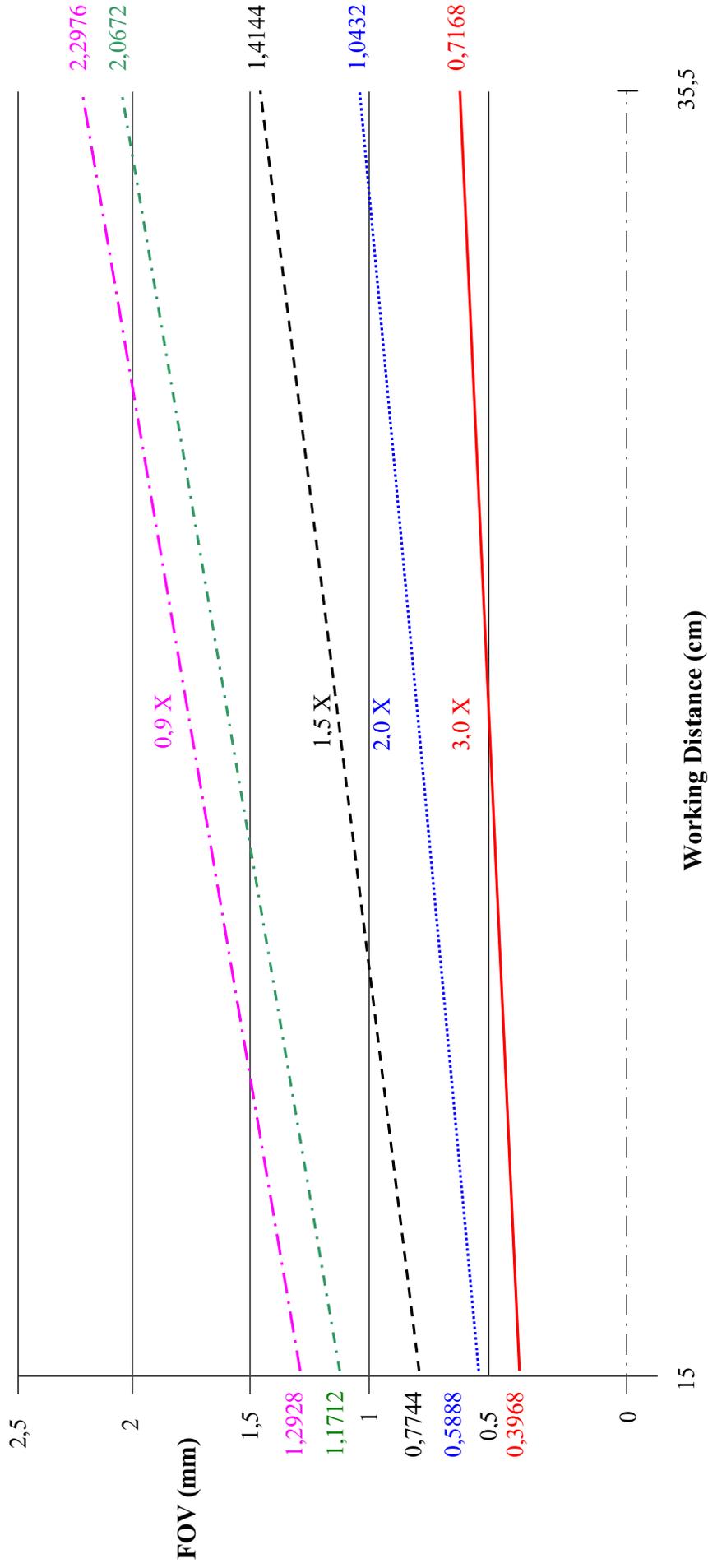
The formula used for depth of field calculations is based on the Raleigh criterion. It is as follows:

$$(0,5)(\lambda)(NA)^2 \text{ where } \lambda=0,546 \mu\text{m.}$$

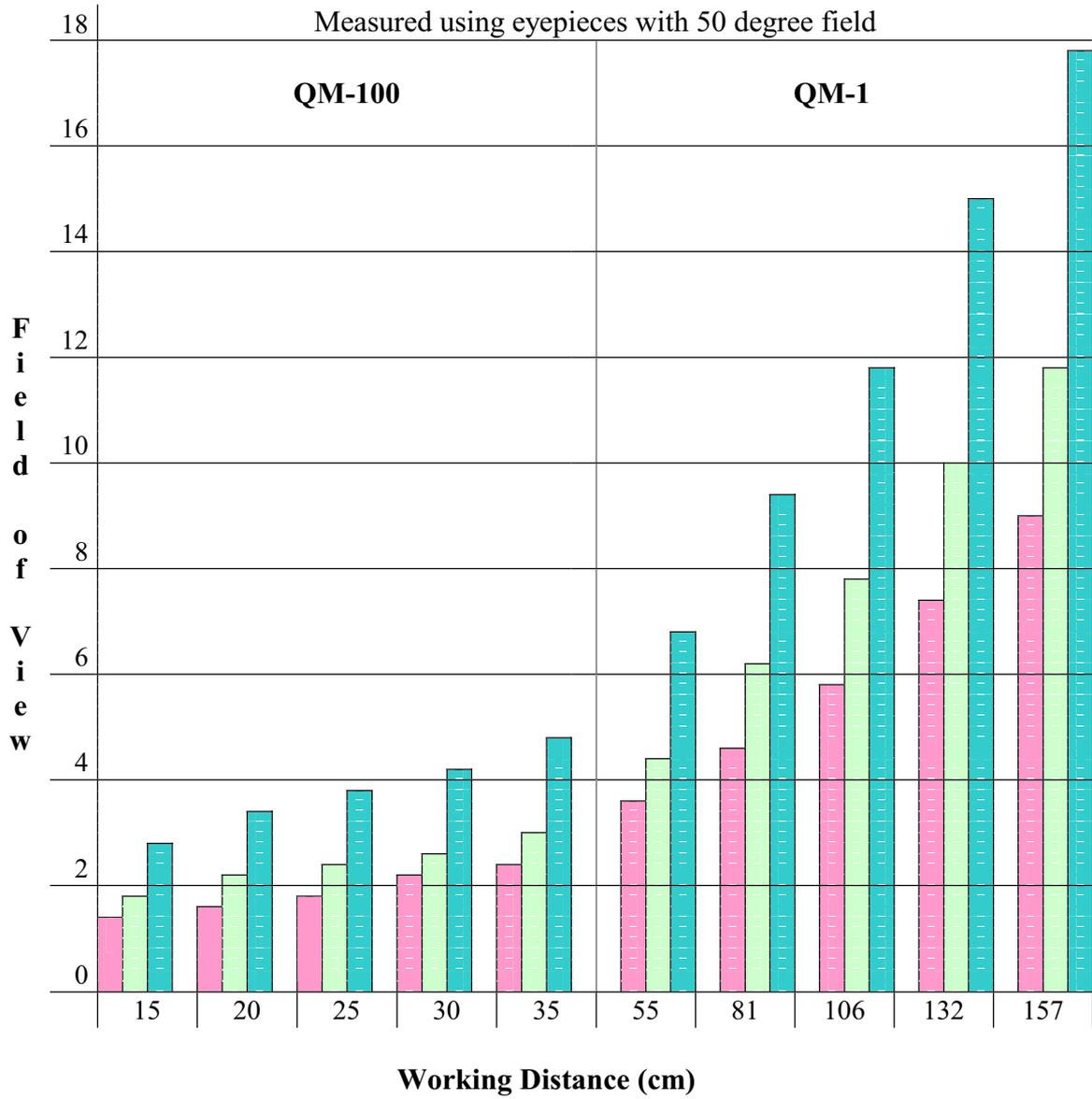
Perceived depths of field will vary with the user, camera and wavelength. In general, they will increase when a camera is used.

Field of View with Auxiliary Lenses Questar QM 100

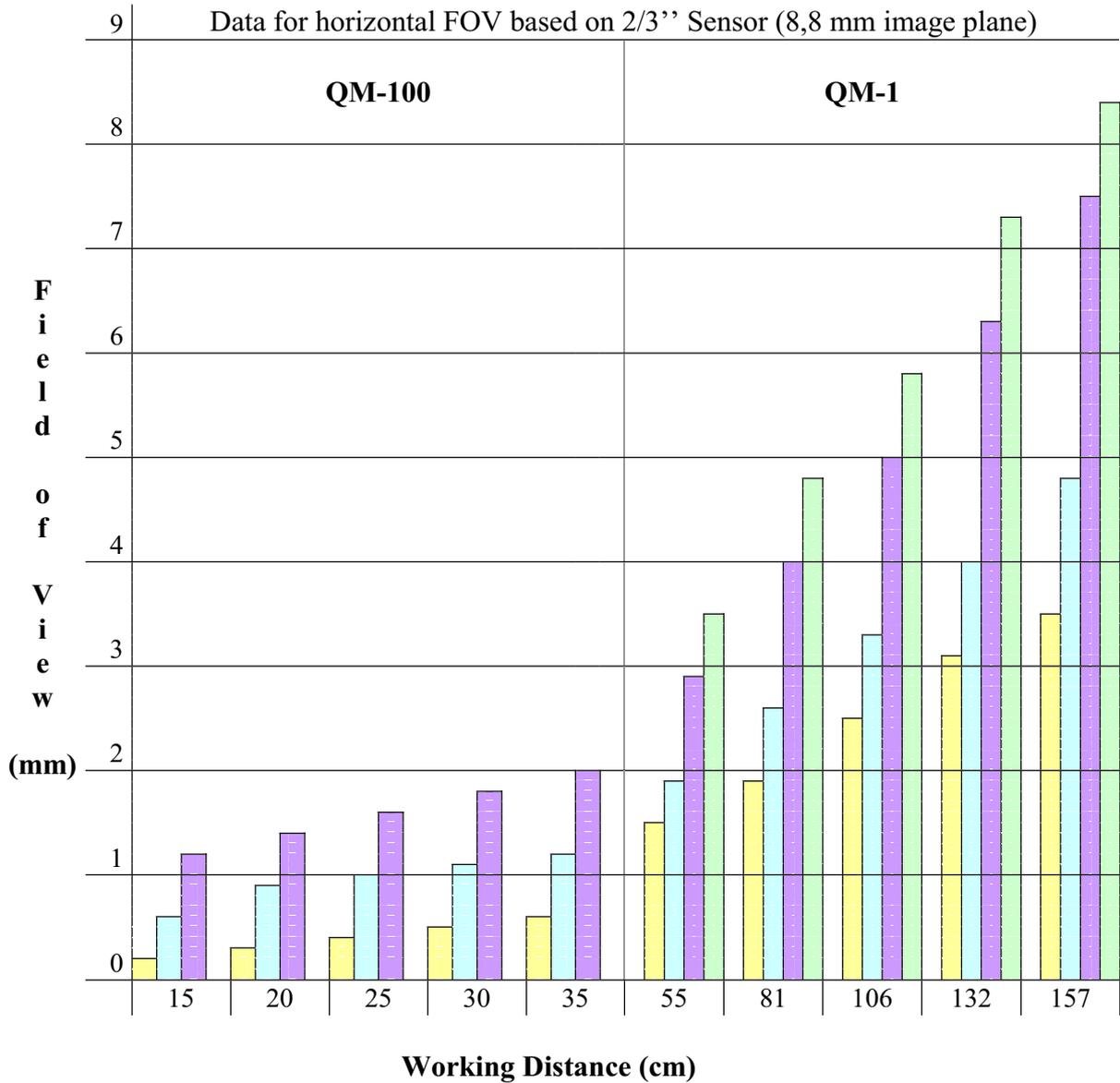
(2/3" format camera)



Microscopes Field of View (Eyepieces)



Microscopes Field of View (CCD Camera)



- 2 X Barlow Lens
- 1,5 X Barlow Lens
- No Auxiliary Lens
- 172 mm pos. Lens

Magnification Chart for the QM 100 Barrel Configuration

Working Distance	QM 100 Objective	Auxiliary Lens to 16 mm Eyepiece				With 2/3" Format Camera & 14" Monitor
		0,9 X	OPEN	1,5 X	2,0 X	
4"	8,13 X	114,3	127,0	190,5	254,0	381,0
6"	6,15 X	86,4	96,0	144,0	192,0	288,0
7"	5,65 X	79,7	88,5	132,8	177,0	265,5
8"	5,21 X	73,4	81,5	122,3	163,0	244,5
9"	4,81 X	67,5	75,0	112,5	150,0	225,0
10"	4,47 X	63,0	70,0	105,0	140,0	210,0
11"	4,17 X	58,5	65,0	97,5	130,0	195,0
12"	3,90 X	54,9	61,0	91,5	122,0	183,0
13"	3,65 X	51,3	57,0	85,5	114,0	171,0
14"	3,43 X	48,2	53,5	80,3	107,0	160,5

The 4" working distance utilizes the Power Pack 100 aplanat attachment.

The above magnifications other than the "OPEN" column are extrapolated data.

When comparing video and eyepiece magnifications, use the "OPEN" column. Much of the difference here occurs in the artificial magnification from the CCD to the monitor. This sometimes results in "empty" or "useless" magnification. We recommend that overall resolution and field of view be compared for exacting calculations.

Although eyepiece magnifications are significantly less than CCD magnifications, comparable resolution is achievable due to the resolution limitations of CCD technology and the exceptional physiology of the human eye.

1" = 25,4 mm

Image Plane Magnification

Data and Results

	Package	Image Plane Measure	Object Size	Magnification at Image Plane	Usable maximum	Approximate Field Using Micrometer Eyepiece
QM-1	Standard Amplified	0,70 mm	0,254 mm	2,8 X	13 X	4,8 mm
		1,65 mm	0,254 mm	6,5 X		2,0 mm
QM-100	Standard Amplified	1,85 mm	0,254 mm	7,2 X	33 X	1,8 mm
		4,25 mm	0,254 mm	16,7 X		0,8 mm
QM-100 and Power Pack	Standard Amplified	2,35 mm	0,254 mm	9,3 X	44 X	1,3 mm
		5,50 mm	0,254 mm	21,6 X		0,5 mm

The image plane magnification can most likely be increased by a factor of 2 over the high magnification stated by adding another Barlow and/or increasing rear BFD spacing.