



**HAL**  
open science

# Etude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique

Sullivan Lechêne

► **To cite this version:**

Sullivan Lechêne. Etude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la protection contre le rayonnement thermique. Autre [cond-mat.other]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français. NNT : 2010NAN10055 . tel-01748656

**HAL Id: tel-01748656**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748656v1>**

Submitted on 29 Mar 2018

**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.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

---

Faculté des Sciences et Technologies - UFR Sciences et Techniques de la Matière et des Procédés  
École Doctorale EMMA (Énergétique, Mécanique, MATériaux) - ED 409  
Département de Formation Doctorale : Mécanique Énergétique

# THÈSE

présentée et soutenue publiquement le mardi 13 juillet 2010

présentée pour l'obtention du

**Doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy Université**  
en Mécanique et Énergétique

par

Sullivan LECHENE

**Etude expérimentale et numérique des rideaux d'eau pour la  
protection contre le rayonnement thermique**

## Composition du jury

<i>Président :</i>	D. Lemonnier	Directeur de recherche CNRS, Institut P' - Futuroscope Chasseneuil
<i>Rapporteurs :</i>	J.L. Consalvi	Maître de conférences, Université de Provence - Marseille
	A. Coppalle	Professeur, INSA - Rouen
<i>Examineur :</i>	S. Desanghère	Docteur - Ingénieur, CSTB - Marne-La-Vallée
<i>Directeurs de thèse :</i>	P. Boulet	Professeur, LEMTA UHP-Nancy
	G. Parent	Maître de conférences, LEMTA UHP-Nancy
<i>Invité :</i>	J.P. Vantelon	Directeur de recherche CNRS

Bonne lecture.

# Remerciements

Le moment est maintenant venu de remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces quelques années et qui ont participé de près ou de loin à l'écriture de ce manuscrit.

Tout d'abord, je tiens évidemment à remercier mes directeurs de thèse, Pascal Boulet et Gilles Parent, pour m'avoir fait confiance durant ces trois années. Par votre moral toujours au beau fixe et votre bonne humeur, vous avez toujours été source de motivation, participant grandement à rendre ces trois années agréables même pendant les jours plus difficiles (la longue et dure période de rédaction, quel souvenir!). J'ai énormément appris auprès de vous grâce à vos précieux conseils tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Encore un grand merci!

Un grand merci également à tous les membres de mon jury pour leur disponibilité et leurs conseils sur l'ensemble de mes travaux. Je tiens à remercier Messieurs Jean-Louis Consalvi et Alexis Coppalle d'avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse. Merci d'avoir pris le temps d'analyser mon manuscrit et d'avoir fourni des conseils avisés et précieux sur mes travaux. Je remercie aussi Messieurs Sylvain Desanghère et Jean-Pierre Vantelon d'avoir accepté d'être membres de mon jury et d'avoir apporté leur expérience dans le domaine. Enfin, un grand merci à Monsieur Denis Lemonnier d'avoir présidé mon jury de thèse et d'avoir apporté un regard critique sur mes travaux.

Je tiens à présent à remercier très chaleureusement les personnes de l'équipe transfert radiatif du laboratoire LEMTA. Commençons par les permanents (et oui, désolé amis doctorants mais hiérarchie oblige, vous passez en dernier!). Un grand merci à Gérard Jeandel, David Lacroix, Sébastien Fumeron et Fatmir Asllanaj pour les divers conseils dispensés au cours de ces quelques années. Merci de vous être rendus disponibles quand le besoin s'en faisait ressentir, que ce soit pour aider "scientifiquement parlant" ou pour débattre sur des sujets vastes et variés. Un grand merci également à mon prédécesseur, Anthony Collin, qui m'a passé le flambeau dans le domaine des rideaux d'eau. Tu m'as mis le pied à l'étrier durant les débuts de la thèse et tu m'as fourni de nombreux conseils avisés sur le sujet durant ces années. Merci également à Laëtitia Soudre d'avoir partagé la caméra infrarouge (pour les personnes intéressées, sa fonction est expliquée plus loin) et de s'être déplacée pour m'écouter pendant ma soutenance. Je remercie tout particulièrement Bernard Monod. Un grand merci pour m'avoir apporté toute ton aide et toute ton expérience dans le domaine expérimental, pour ta bonne humeur et ton humour toujours présents. Tu t'es toujours rendu disponible et tu as fortement contribué à l'élaboration du banc expérimental. Tu as fait partagé (à mon acolyte de manips et moi-même) des moments savoureux et inoubliables. Je remercie évidemment Franck Demeurie, qui a su apporter son aide et sa bonne humeur et je n'oublie évidemment pas ses nombreux coups de klaxons (trois d'après mes souvenirs) en remontant au laboratoire.

Maintenant, c'est à vous les doctorants! Commençons par les collègues qui entament leur dernière année de thèse : Julien, Issiaka, Lionel, Jérôme et Elizabeth. Vous avez tous mis de la bonne humeur au sein du bureau où les joutes oratoires sont omniprésentes. J'ai passé trois années ponctuées de fous rires, de moments d'entraide mais aussi d'instantanés d'énerverment total (aïe la pauvre souris). Julien, malgré tes airs hautains (lui seul pourra comprendre) et une tendance à trop fumer à mon goût, tu as toujours eu un dévouement sans faille pour faire le café (d'ailleurs, ça ne va pas se faire tout seul!). Issiaka, bien que tu sois accroc au Barça (mauvais souvenir pour les matchs Lyon-Barcelone) et derrière tes grandes théories sur le pourquoi du comment nous sommes là et pas ailleurs, tu as toujours su nous recevoir pour des tournois de PES endiablés. Lionel (un vrai réunionnais et surtout pas un zoreil ou zoreol, quoique), amoureux de la forêt et de la moto et d'une danse inqualifiable (que seul un certain JC connaît), merci de nous avoir toujours gratifié de mangues et fruits de la passion venus tout droit de la Réunion. En ce qui concerne Jérôme, vu qu'il est grand, costaud et maître en taekwondo, je ne peux évidemment en dire que du bien! Même si tu as migré à la "cryogénie" après ton stage, tu as toujours su répondre présent aux différents services demandés. Un grand merci à ces compères de bureau pour m'avoir toujours apporté leur aide quand j'en avais besoin et pour m'avoir fait vivre ces moments inoubliables! Je remercie également Elizabeth pour son aide et les nombreux échanges constructifs que nous avons eu sur le thème des rideaux d'eau. Et maintenant, à eux de rédiger cette fameuse thèse. Bon courage!

Merci également aux petits nouveaux, jeunes et insoucians, qui entament seulement leur deuxième année de thèse : Jonathan et Simon. Ils ont également grandement participé à la bonne humeur qui régnait au sein du laboratoire. Jonathan, même derrière maints et maints jeux de mots et ses "pourrissages" d'ordinateur, tu as su passer du statut d'étudiant durant mes cours à celui de doctorant. Je n'étais donc pas un si mauvais prof! Bien qu'il ait changé soudainement de bureau, je remercie tout de même Simon de partager la majorité de son temps de pause avec nous (et accessoirement prendre de notre café... enfin, c'est de bon cœur).

Je remercie aussi tous les stagiaires venus passer quelques mois au sein de l'équipe de recherche : Amine, Guillaume, Imad, Siham, Stéphane et Zahire.

Enfin, au sein de l'équipe, il reste une dernière personne à remercier tout particulièrement : le Maître de Conférences Zoubir Acem. Je ne pouvais pas ne pas te consacrer un paragraphe spécial. Je ne saurais que trop te remercier pour toute l'aide que tu m'as apporté durant ces trois années de thèse. Arrivé en même temps que moi au sein de l'équipe, tu es la personne que j'ai eu en face de moi pendant trois ans! En y réfléchissant, heureusement qu'on s'est entendu! Il y a énormément de choses à dire dont certaines qu'il vaut mieux taire (tu sais certainement de quoi je parle). Toutefois, je vais te rappeler certaines anecdotes qui me reviennent. Tu parviens toujours à sortir, quand on s'y attend le moins d'ailleurs, une chanson (tu m'oublieras par exemple), une citation de film (Je-Je-Je-Je-Je... Je veux la dague!), ou une série (Manimal ou Tonnerre Mécanique) que tout le monde connaît mais que tout le monde a oublié! Personne ne sait comment tu arrives à retrouver tout ça! Je retiens également tes passes millimétrées au foot (dont certaines, voire beaucoup sont "croquées" par l'attaquant, moi) que tu parviens à distiller (là je sais que tu vas être fier que je dise ça), quand tu n'es pas blessé bien sûr (et là, beaucoup moins fier). Je retiendrai aussi les matchs de foot à la télé (même si tu supportes Marseille, personne n'est parfait), les parties de PES acharnées (même si je ne comprends pas que tu payes un jeu et que tu ne te serves que de l'équipe d'Angleterre), les repas aux petits oignons, les différents défis lancés, les opérations kamikazes, etc... En résumé, tu as toujours été là quand j'en avais besoin et tu es devenu un véritable ami. Encore une fois Zoubir, merci pour tout.

Je tiens à présent à remercier très chaleureusement toutes les personnes, hors laboratoire, qui m'ont soutenu et m'ont permis de m'évader de cette fameuse thèse quand celle-ci devenait trop imposante.

Merci à Mathieu, Josselyn, Pierre-Julien, Jean-Baptiste et Cyrielle pour toutes les virées aux quatre coins de l'Europe (Londres et la fameuse visite de la ville à 2 heures du matin, Berlin et les "refoules de boîte", Bruxelles et son palace...), pour les week-end dans les Hautes-Vosges avec les descentes en luge et ski (enfin celles-là, c'est plutôt pour vous).

Je remercie également Loïc et Alex. Ah des soirées les potes, il y en a eu durant ces trois ans. Et des parties de PES contre les espagnols, les anglais ou les allemands, je n'en parle même pas (on va arriver à atteindre les 900!).

Je tiens à remercier également Christophe, Nelson, David et le tennis club de Gironcourt. Il y en eu des victoires en championnat ces dernières années! Même si je souffre quand on s'entraîne, Christophe, j'ai quand même bien progressé cette année. Merci à sa compagne Christelle pour son accueil chaleureux quand il fallait supporter les soirées football! Et courage à toi pour les prochains mois! Un énorme merci à Nelson pour les vacances portugaises, les soirées entre potes avec Christian, Rachel et la petite Anna-Lisa que je remercie également. Et non Christian, la Roma ne gagnera pas la Ligue des Champions! Une petite pensée également pour Céline, amie de toujours et partenaire de tennis.

Merci Alban et Amandine, Jean-Christophe, Amandine et la petite Louise pour votre soutien sans faille et votre présence pendant ma soutenance de thèse. Je remercie également Rémi, Etienne, Florent et leurs compagnes respectives.

Un grand merci également à mes anciens maîtres de stage, Nico et Seb (et leurs compagnes). Vous êtes en quelque sorte mes premiers formateurs dans le monde du travail. On s'en rappellera de ce stage et dire qu'on en parle encore! Une pensée pour Amélie, ma collègue de classe et de stage. Merci de vous être déplacés pour me soutenir lors de mon oral.

Une pensée pour le néo-guyanais, Barnabé, acolyte de Zoubir depuis toujours. Merci pour toutes les parties de PES, les soirées au Pasta-Mano et les matchs de foot.

Je tiens également à remercier Franck (grand supporter lyonnais!) et Arnaud pour toutes les soirées foot devant la télévision, les soirées au bar. Quel ailier ce Franck durant les entraînements de foot avec l'équipe de foot du LEMTA!

Je remercie aussi tous les membres de la "cafet" où j'ai passé quasiment tous mes midis. Je pense que ceux-ci se reconnaîtront.

Je vais terminer en remerciant les personnes qui comptent le plus pour moi : ma famille. Tout d'abord merci à tous mes oncles et tantes, et tous mes cousins et cousines (et ils sont nombreux!), plus particulièrement à Alain et Nicole, Denis et Marinette, Lionel, Loïc, Julie et Maho, Jonathan et Elodie, Béatrice, Thierry, Thomas et ma petite filleule Laura, Sophie, Jérôme, Lola, Charlotte et Nicolas pour tous les bons moments autour de repas de famille. Merci de vous être déplacés physiquement pour certains ou par la pensée pour d'autres pour me soutenir pendant mon oral.

Un énorme merci à mes grands-parents. Je vous remercie d'avoir toujours été là quand j'en avais besoin et de m'avoir toujours soutenu. Et une petite pensée également à mon grand-père maternel qui a certainement dû me regarder de là-haut.

Un immense merci à ma petite sœur, Cynthia, pour tous les fous rires mais aussi toutes les "chamailleries" que je peux lui faire subir. Tu comptes énormément pour moi et je souhaite de tout cœur que tu connaisses la réussite dans la suite de tes études. Thank you so much, sister!

## *Remerciements*

---

Enfin, il est temps de remercier les deux personnes sans qui évidemment rien n'aurait été possible : mes parents. Il n'y pas de mot pour qualifier mon merci. Merci de vos continuels soutiens et encouragements. Merci à vous d'être en permanence présents quand j'en ai besoin (que ce soit pour moi ou pour ma soeur). La liste des remerciements pourrait encore être très longue alors sachez juste que je serai toujours infiniment reconnaissant de tout ce que vous faites... Merci.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
1 Contexte général sur les systèmes de rideaux d'eau utilisés en tant que bouclier radiatif . . . . .	1
2 Différents modes d'action des rideaux d'eau . . . . .	5
3 Outils de simulation et caractérisation des rideaux d'eau . . . . .	7
3.1 Aspects numériques sur la dynamique du rideau . . . . .	7
3.2 Aspects numériques sur le problème radiatif . . . . .	7
4 Ordres de grandeurs et classifications des rideaux d'eau . . . . .	7
5 Raisons justifiant l'étude de stratégies de pulvérisation différentes . . . . .	10
6 Composition du document . . . . .	11
<b>Partie I Outils de caractérisation : code de calcul et banc de mesures</b>	<b>13</b>
<b>Introduction de la première partie</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre 1 Dynamique du spray</b>	<b>17</b>
1.1 Suivi lagrangien des gouttes . . . . .	17
1.1.1 Equation du mouvement . . . . .	17
1.1.2 Equation de la trajectoire . . . . .	19
1.1.3 Bilan massique . . . . .	19
1.1.4 Equation de la chaleur . . . . .	20
1.2 Modèle de dispersion . . . . .	21
1.2.1 Fluctuations de vitesse . . . . .	22
1.2.2 Fluctuations de température . . . . .	23
1.2.3 Choix du pas de temps pour le suivi des particules . . . . .	24

1.3	Simulation eulérienne de l'air entraîné . . . . .	24
1.3.1	Equations de bilan . . . . .	24
1.3.2	Résolution des équations de bilan par la méthode des volumes finis . . . . .	26
1.3.3	Conditions aux limites . . . . .	27
1.4	Couplage entre simulation lagrangienne et eulérienne . . . . .	28
1.5	Convergence des résultats sur le code de simulation dynamique . . . . .	29
<b>Annexe A - Aspects spécifiques liés aux sprays impactants</b>		<b>31</b>
<b>Chapitre 2 Transferts radiatifs à travers le spray</b>		<b>37</b>
2.1	Détermination des propriétés radiatives du milieu . . . . .	37
2.1.1	Propriétés radiatives des gouttes . . . . .	38
2.1.2	Propriétés radiatives des gaz . . . . .	41
2.1.3	Propriétés radiatives du milieu air-gouttelettes . . . . .	43
2.2	Méthode de Monte-Carlo . . . . .	44
2.2.1	Emission de quanta . . . . .	44
2.2.2	Suivi des quanta . . . . .	45
2.2.3	Réception de quanta . . . . .	47
2.3	Convergence du code radiatif . . . . .	47
<b>Annexe B - Ordres de grandeur et étude de sensibilité numérique</b>		<b>49</b>
<b>Chapitre 3 Banc expérimental pour la caractérisation spectrale des rideaux d'eau</b>		<b>59</b>
3.1	Description du dispositif . . . . .	59
3.2	Mode opératoire . . . . .	62
3.2.1	Traitement des données . . . . .	62
3.2.2	Répétabilité et incertitudes de mesures . . . . .	63
<b>Annexe C - Dispositifs expérimentaux annexes</b>		<b>67</b>
<b>Partie II Etude de cas</b>		<b>71</b>
<b>Introduction de la deuxième partie</b>		<b>73</b>
<b>Chapitre 4 Configurations en spray seul avec la tuyère TP400067</b>		<b>75</b>
4.1	Caractéristiques de la buse d'injection . . . . .	75
4.1.1	Estimation du débit d'injection . . . . .	75
4.1.2	Estimation des angles d'injection . . . . .	76

4.1.3	Estimation de la granulométrie . . . . .	76
4.2	Comparaison numérique entre un spray en configuration descendante et un spray en configuration ascendante . . . . .	79
4.2.1	Paramètres d'entrée pour le calcul numérique . . . . .	79
4.2.2	Propriétés radiatives d'une pulvérisation . . . . .	80
4.2.3	Comparaison sur la dynamique du spray . . . . .	82
4.2.4	Comparaison sur les transferts radiatifs . . . . .	92
4.3	Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux . . . . .	97
4.3.1	Bilan . . . . .	100
<b>Chapitre 5 Configurations en rampes</b>		<b>101</b>
5.1	Rampes descendantes . . . . .	102
5.1.1	Cas de référence . . . . .	102
5.1.2	Paramètres influents . . . . .	112
5.1.3	Scénario avec un panneau rayonnant . . . . .	122
5.1.4	Bilan sur les rampes descendantes . . . . .	131
5.2	Rampes ascendantes . . . . .	132
5.2.1	Cas de référence . . . . .	132
5.2.2	Paramètres influents . . . . .	141
5.2.3	Scénario avec un panneau rayonnant . . . . .	143
5.2.4	Bilan sur les rampes ascendantes . . . . .	151
5.3	Rampes impactantes . . . . .	151
5.3.1	Présentation du cas étudié . . . . .	152
5.3.2	Etude préalable sur l'impact de gouttes . . . . .	153
5.3.3	Analyse des résultats . . . . .	158
5.3.4	Bilan sur les rampes impactantes . . . . .	167
5.4	Comparaison des trois modes de pulvérisation . . . . .	167
<b>Chapitre 6 Association de rampes et mesures dans le visible</b>		<b>173</b>
6.1	Etude de configurations en double rampe . . . . .	173
6.1.1	Présentation du cas en double rampe . . . . .	173
6.1.2	Situation de transmission directe . . . . .	174
6.1.3	Situation de panneau rayonnant . . . . .	179
6.1.4	Bilan sur la configuration en double rampe . . . . .	181
6.2	Etude dans le visible . . . . .	181
6.2.1	Protocole de mesures et résultats typiques . . . . .	182
6.2.2	Résultats expérimentaux . . . . .	183

*Table des matières*

---

6.2.3	Comparaison avec la simulation numérique . . . . .	186
6.2.4	Ordres de grandeur de transmissions dans le visible . . . . .	186
6.2.5	Notion de visibilité . . . . .	188
6.2.6	Bilan sur l'étude dans le visible . . . . .	189
<b>Conclusions et perspectives</b>		<b>191</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>197</b>

# Nomenclature

## Symboles latins

$a_n$	Coefficient de Mie [-]
$a_p$	Coefficient dans la méthode des volumes finis [-]
$At$	Atténuation [-]
$b$	Terme source dans la méthode des volumes finis [-]
$b_n$	Coefficient de Mie [-]
$B_M$	Coefficient de transfert de masse de Spalding [-]
$B_T$	Coefficient de transfert thermique de Spalding [-]
$C_{diff}$	Coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air [ $m^2.s^{-1}$ ]
$C_p$	Capacité calorifique [ $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ]
$C_{traînée}$	Coefficient de traînée [-]
$C_v$	Critère de convergence [-]
$C_0$	Constante de Kolmogorov [-]
$c_0$	Vitesse de la lumière [ $m.s^{-1}$ ]
$C_{1\epsilon}$	Constante du modèle k- $\epsilon$ [-]
$C_{2\epsilon}$	Constante du modèle k- $\epsilon$ [-]
$C_{3\epsilon}$	Constante du modèle k- $\epsilon$ [-]
$C_\mu$	Constante du modèle k- $\epsilon$ [-]
$d_i$	Diamètre de la $i^{ème}$ classe de gouttes [m]
$d_p$	Diamètre de la particule [m]
$d_{log}$	Diamètre moyen dans la loi de distribution granulométrique [m]
$D_n$	Dérivée logarithmique [-]
$D_{V0,9}$	Diamètre correspondant au volume cumulé de 90 % des gouttes [m]
$d_0$	Diamètre de l'orifice de sortie d'une buse [m]
$D_{32}$	Diamètre de Sauter [m]
$E$	Constante d'intégration [-]
$e$	Epaisseur de film liquide [m]

F	Force [N]
$f_d$	Loi de distribution de la fraction volumique en fonction du diamètre [ $m^{-1}$ ]
$F_M$	Facteur correctif pour le transfert de masse [-]
$F_N$	Nombre de débit [ $m^3.s^{-1}.Pa^{-\frac{1}{2}}$ ]
$F_T$	Facteur correctif pour le transfert de chaleur [-]
$f_v$	Fraction volumique [ $m^3$ d'une espèce. $m^{-3}$ d'air]
$f(k)$	Fonction de densité de probabilité de k [-]
g	Gravité [ $m.s^{-2}$ ]
$g(k)$	Fonction de distribution cumulée de k [-]
h	Constante de Planck [J.s]
k	Coefficient d'absorption dit réduit [-]
$k_b$	Constante de Boltzmann [J.K $^{-1}$ ]
$k_f$	Energie cinétique turbulente [ $m^2.s^{-2}$ ]
$\langle k_\lambda \rangle$	Paramètre de modélisation pour le modèle C-k [-]
$\dot{m}_{\text{évap}}$	Débit massique d'eau évaporée [kg.s $^{-1}$ ]
$L_f$	Echelle intégrale de longueur longitudinale [m]
$L_v$	Chaleur latente d'évaporation [J.kg $^{-1}$ ]
$L^0$	Luminance du corps noir [W.m $^{-2}.sr^{-1}$ ]
$L_\nu$	Luminance spectrale [W.m $^{-2}.sr^{-1}/cm^{-1}$ ]
m	Indice optique complexe relatif [-]
$m_p$	Masse de la particule [kg]
N	Nombre de particules par unité de volume [ $m^{-3}$ ]
n	Indice de réfraction [-]
$N_c$	Nombre de classes dans le cas d'une polydispersion [-]
$n_e$	Nombre d'essais réalisés [-]
$n_i$	Nombre de gouttes de la classe de diamètre i [-]
$N_p$	Nombre de processeurs [-]
$N_q$	Nombre de quanta reçus [-]
$n_0$	Indice du milieu environnant la particule [-]
$n^*$	Indice complexe de réfraction [-]
$P_\lambda^{\text{Mie}}$	Fonction de phase de Mie [-]
$P_r$	Pression [Pa]
$Q_p$	Echanges thermiques entre la particule et l'air environnant [W]
$Q_{S_r,\lambda}$	Flux radiatif spectral [W.m $^{-2}$ ]
$Q_v$	Débit volumique d'injection [ $m^3.s^{-1}$ ]

$Q_{\lambda_{\text{abs}}}$	Efficacité spectrale d'absorption [-]
$Q_{\lambda_{\text{diff}}}$	Efficacité spectrale de diffusion [-]
$Q_{\lambda_{\text{ext}}}$	Efficacité spectrale d'extinction [-]
R	Nombre aléatoire suivant une loi uniforme dans [0,1] [-]
S	Terme source modélisant la contribution des particules [-]
$S_e$	Surface de la zone d'émission du rayonnement [m <sup>2</sup> ]
$S_1$	Fonction d'amplitude complexe [-]
$S_2$	Fonction d'amplitude complexe [-]
$S_\sigma$	Distance d'interaction [m]
T	Température [K]
t	Temps [s]
$T_L$	Echelle lagrangienne du fluide [s]
$T_{mE}$	Echelle mobile eulérienne du fluide [s]
Tr	Transmittance [-]
$T_{rep}$	Transmittance représentative [-]
$T^*$	Echelle intégrale temporelle du fluide vue par la particule [s]
$T_{\parallel}^*$	Echelle intégrale temporelle dans la direction longitudinale [s]
$T_{\perp}^*$	Echelle intégrale temporelle dans la direction transversale [s]
$T^+$	Température à la paroi adimensionnelle [-]
$T_{\theta}^*$	Echelle intégrale temporelle de température du fluide vu par la particule [s]
U	Vitesse [m.s <sup>-1</sup> ]
u	Fluctuation de vitesse de la phase continue [m.s <sup>-1</sup> ]
$u_p$	Parcours de pression [Pa.m]
$u^+$	Vitesse à la paroi adimensionnelle [-]
V	Visibilité [m]
$V_{\text{éjection}}$	Vitesse d'éjection des particules [m.s <sup>-1</sup> ]
$V_p$	Vitesse de la particule [m.s <sup>-1</sup> ]
$V_r$	Vitesse relative [m.s <sup>-1</sup> ]
Var	Variance [-]
x	Coordonnée de position [m]
$X_p$	Position de la particule [m]
$x_p$	Paramètre de taille [-]
Y	Humidité absolue [kg d'eau.kg <sup>-1</sup> d'air sec]
y	Coordonnée de position [m]
$y^+$	Distance à la paroi adimensionnelle [-]

$z$  Coordonnée de position [m]

## Symboles grecs

$\beta$  Coefficient d'extinction [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $\Gamma$  Constante d'évaporation de Kent [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]  
 $\langle \gamma_\lambda \rangle$  Paramètre de modélisation pour le modèle C-k [-]  
 $\delta$  Epaisseur de film adimensionnée [-]  
 $\delta_{log}$  Paramètre de dispersion [-]  
 $\Delta Q$  Quantité d'énergie absorbée par le milieu [W]  
 $\Delta s$  Epaisseur du milieu [m]  
 $\Delta t$  Pas de temps [s]  
 $\Delta y$  Dimension de cellule [m]  
 $\Delta y_p$  Distance entre la paroi et le centre P de la 1<sup>ère</sup> cellule du maillage [m]  
 $\Delta z$  Dimension de cellule [m]  
 $\delta_0$  Angle d'émission d'un quantum [rad]  
 $\langle \delta_\lambda \rangle$  Paramètre de modélisation pour le modèle C-k [-]  
 $\epsilon$  Emissivité [-]  
 $\epsilon_f$  Taux de dissipation visqueuse [ $\text{m}^2.\text{s}^{-3}$ ]  
 $\zeta_n$  Fonction de Riccati-Bessel [-]  
 $\kappa$  Coefficient d'absorption [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $\kappa_{VK}$  Constante de Von Karman [-]  
 $\Lambda$  Conductivité thermique [ $\text{W}.\text{m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]  
 $\lambda$  Longueur d'onde [m]  
 $\mu$  Viscosité dynamique [ $\text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ]  
 $\Psi$  Variable gaussienne [-]  
 $\nu$  Nombre d'onde [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $\nu_f$  Viscosité cinématique [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]  
 $\rho$  Masse volumique [ $\text{kg}.\text{m}^{-3}$ ]  
 $\sigma$  Coefficient de diffusion [ $\text{m}^{-1}$ ]  
 $\sigma_k$  Constante du modèle k- $\epsilon$  [-]  
 $\sigma_e$  Ecart-type [-]  
 $\sigma_s$  Tension de surface [ $\text{N}.\text{m}^{-1}$ ]  
 $\sigma_\epsilon$  Constante du modèle k- $\epsilon$  [-]  
 $\tau$  Epaisseur optique [-]  
 $\tau_p$  Temps de relaxation dynamique [s]

---

$\tau_w$	Contrainte à la paroi [kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup> ]
$\Theta$	Angle du cône de diffusion [rad]
$\theta$	Angle azimutal [rad]
$\Theta_f$	Température instantanée [K]
$\theta_f$	Fluctuation de température de la phase continue [K]
$\xi$	Variable gaussienne [-]
$\Phi$	Angle définissant la direction de diffusion [rad]
$\varphi$	Angle polaire [rad]
$\phi$	Flux spectral [W.m <sup>-2</sup> ]
$\phi_P$	Grandeur calculée dans une cellule dans la méthode des volumes finis [suivant la grandeur considérée]
$\vec{\Omega}$	Direction de propagation du rayonnement [-]
$\omega_i$	Poids de Gauss [-]

## Indices

f	Relatif à la phase continue
l	Relatif à laminaire
m	Relatif à mélange
max	Relatif à maximum
p	Relatif à la particule
r	Grandeur relative
réf	Relatif à référence
s	Relatif à surface
sat	Grandeur considérée aux conditions de saturation
t	Relatif à turbulent
v	Relatif à vapeur
$\lambda$	Relatif à spectral en longueur d'onde
$\nu$	Relatif à spectral en nombre d'onde

## Nombres adimensionnés

K	Paramètre de Sommerfeld [-]
K'	Nombre de Walzel [-]
Le	Nombre de Lewis [-]
Nu	Nombre de Nusselt [-]
Oh	Nombre d'Ohnesorge [-]

Pr	Nombre de Prandtl [-]
Re	Nombre de Reynolds [-]
Sc	Nombre de Schmidt [-]
Sh	Nombre de Sherwood [-]
St	Nombre de Stokes [-]
We	Nombre de Weber [-]

## **Opérateurs**

$\ X\ $	Norme de X
$ X $	Valeur absolue de X
$\langle X \rangle$	Moyenne de X
$\vec{X}$	Vecteur X
$\mathcal{R}e$	Partie réelle de X

# Introduction générale

Ce chapitre fait office à la fois d'introduction et d'étude bibliographique. Dans un premier temps, le contexte général sur les systèmes de rideaux d'eau et leur application en tant que bouclier radiatif est présenté. Ensuite, nous détaillerons les différents modes d'action du brouillard ainsi que les domaines d'applications s'y rapportant. Les différentes techniques permettant la modélisation dynamique du rideau ainsi que la simulation des transferts radiatifs à travers celui-ci sont présentées et illustrées par plusieurs travaux majeurs s'y rapportant. Différents ordres de grandeur qui participent à la définition des brouillards et rideaux d'eau sont présentés pour aider à cadrer le problème posé. Les raisons justifiant l'étude de stratégies de pulvérisation différentes de la configuration descendante "classique" sont ensuite exposées. Enfin, la composition du présent document est détaillée.

## 1 Contexte général sur les systèmes de rideaux d'eau utilisés en tant que bouclier radiatif

Les brouillards sont des milieux constitués de gouttelettes d'eau dispersées dans l'air. Sur un plan radiatif, ils sont semi-transparents. Placés entre une forte source radiative et une cible à protéger, ils agissent comme des boucliers radiatifs limitant la propagation du rayonnement grâce notamment au caractère absorbant et diffusant des gouttelettes d'eau. La figure 1 illustre ce système de protection (le cas schématisé correspond à un dispositif de rampe munie de pulvérisations descendantes où les gouttes sont projetées directement vers le sol). Système de protection contre un incendie, le but du rideau dans cette étude n'est pas d'interagir avec la flamme dans une optique d'extinction mais de protéger des biens ou des personnes du rayonnement thermique (issu de la source). Nous nous consacrerons donc entièrement à l'effet bouclier et nous ne traiterons pas des interactions avec la flamme. Par contre, dans un contexte d'extinction, on sait que l'eau brumisée agit en partie en réduisant le rayonnement des flammes. Sur ce point précis, notre travail peut aussi apporter des éléments de compréhension et aider à la modélisation.

Aujourd'hui, les rideaux d'eau sont présents dans de nombreuses applications, dont quelques-unes sont illustrées sur les figures 2 et 3. Un premier exemple concerne typiquement l'aspect de protection par les brouillards d'eau (figure 2(a)), étudié dans le cadre de ce travail. La deuxième application illustre la sécurité dans les tunnels (figure 2(b)). Le principe est alors d'isoler l'incendie pour permettre une évacuation plus facile des personnes et une intervention plus aisée des pompiers. Un autre exemple concerne la protection des personnels d'intervention sur les incendies de forêts (figure 3(a)). L'utilisation de rideaux d'eau permet de protéger la cabine de leur camion au cas où le front de flamme les rattrape. Enfin, un système de rideau d'eau privilégiant l'interaction du spray avec la flamme dans une optique d'extinction est illustré sur une dernière photo (figure 3(b)). Dans tous les cas, la performance de ces systèmes de protection dans ces dif-

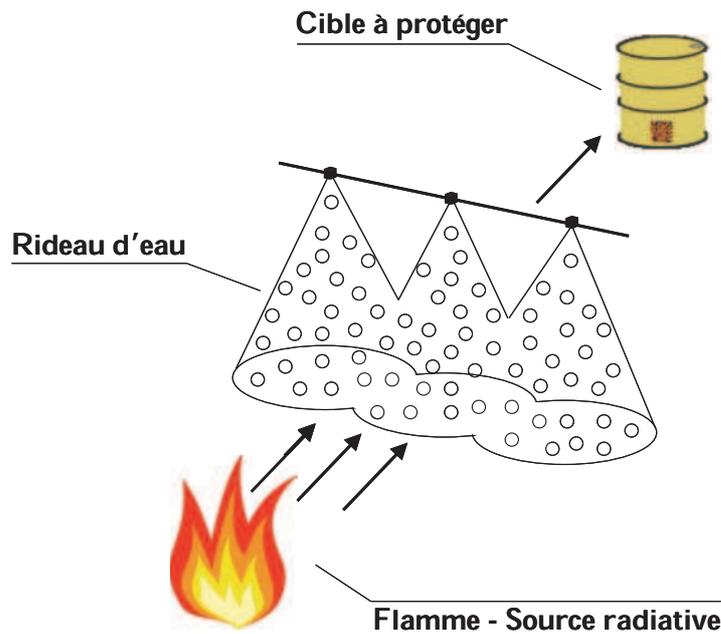


FIGURE 1 – Schéma de principe d'un système de protection par rideau d'eau

férentes applications doit être optimale. Toutefois, ces techniques sont essentiellement empiriques et ont besoin d'optimisations au niveau de l'efficacité des brouillards, d'où les travaux portant sur ce sujet depuis plusieurs décennies. Par ailleurs, les performances d'une installation utilisant des rideaux d'eau ne peuvent être connues que par des essais à échelle réelle (comme illustré sur les figures 2 et 3). Cependant, ce sont des tests demandant des infrastructures considérables engendrant des coûts importants. Il convient donc dans un premier temps d'étudier différentes stratégies de pulvérisation à échelle plus réduite (échelle du laboratoire par exemple, comme cela va être réalisé dans le cadre de ces travaux), avant de commencer des tests à grande échelle.



(a) Système de protection



(b) Application tunnel

FIGURE 2 – Exemples d'applications actuelles

Le contexte général des travaux de cette thèse est d'abord situé par rapport à une présentation des études antérieures. En tant que système de protection contre une forte source radiative,



(a) Protection du personnel d'intervention



(b) Système d'extinction

FIGURE 3 – Exemples d'applications actuelles

les travaux de Ravigururajan [Ravigururajan et Beltran, 1989] comptent parmi les premières études effectuées sur le sujet. L'objectif est alors de simuler les niveaux de température d'une cible réceptrice soumise au rayonnement issu d'une source de chaleur (seul le phénomène d'absorption par les gouttelettes d'eau est pris en compte). Les conclusions apportées montrent que l'atténuation maximale est obtenue pour un diamètre de gouttelettes voisin de la longueur d'onde du rayonnement incident. Cet optimum peut également être obtenu pour des gouttes d'un plus gros diamètre mais la quantité d'eau nécessaire à cette atténuation est plus importante.

Par la suite, Coppalle [Coppalle *et al.*, 1993] propose une étude radiative sur les systèmes de rideaux d'eau. L'amélioration majeure apportée réside dans la prise en compte du phénomène de diffusion par les gouttelettes d'eau (le phénomène d'absorption est également simulé). Les propriétés radiatives des gouttes sont obtenues par la théorie de Mie (Modest [Modest, 1993], Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983]). Le problème radiatif est modélisé par une méthode de type deux-flux.

Les études de Murrell [Murrell *et al.*, 1995] sont consacrées à l'aspect expérimental. Plusieurs types de sprays sont analysés en terme de capacité d'atténuation. Un large panel de débits a été utilisé avec une gamme allant de  $0,35 \text{ l.min}^{-1}$  à  $7,5 \text{ l.min}^{-1}$ . La diminution de la transmission du rayonnement quand le débit est plus fort et la taille des gouttelettes d'eau plus petite est mise en évidence expérimentalement.

Des avancées majeures ont été obtenues dans le cadre d'un programme européen de recherche sur la protection incendie nommé ASTRRE (Atténuation des Sources Thermiques Radiatives par Rideaux d'Eau). Ce programme voit la collaboration de trois centres de recherche : l'Institut Von Karman (IVK - Belgique), le Centre de Thermique de Lyon (CETHIL) et l'Institut des Technologies Chimiques de Lyon (ITCL), avec des partenaires industriels. L'objectif principal de ces travaux est d'établir un code de calcul permettant le dimensionnement de systèmes de protection incendie utilisant des rideaux d'eau pour des zones industrielles à risques. Les travaux de Prétrel [Prétrel, 1997] et Dembélé [Dembélé, 1998] ont permis l'avancée de cette étude. Le premier cité utilise un modèle monodimensionnel d'un écoulement vertical de gouttes pour simuler la dynamique du spray. Le problème radiatif utilise la méthode de type deux-flux. Une étude expérimentale est également menée et consiste en des mesures à la fois sur l'hydrodynamique du spray et sur la transmittance du rayonnement à travers un dispositif de rideaux d'eau (avec des mesures en rampes uniques et rampes multiples). Les travaux de Dembélé [Dembélé, 1998] se sont plus particulièrement concentrés sur l'aspect radiatif du problème en alliant numérique et

expérimental. Un code de simulation monodimensionnel et bidimensionnel est proposé, résolvant l'équation du transfert radiatif par la méthode des ordonnées discrètes. Les propriétés radiatives du spray sont obtenues par la théorie de Mie en ce qui concerne les gouttelettes d'eau et par le modèle C-k pour la partie gazeuse [Soufiani et Taine, 1997]. La combinaison de ces deux travaux a permis d'identifier les paramètres dynamiques clés dans l'optique d'un système de rideaux d'eau efficace : un faible diamètre de gouttes et une fraction volumique en eau importante.

Depuis quelques années, le laboratoire LEMTA contribue à la thématique des rideaux d'eau en tant que bouclier radiatif. Les premiers travaux réalisés par Berour [Berour *et al.*, 2004] consistent en une étude radiative dans un milieu homogène en gouttes (la taille des gouttes est constante dans le milieu considéré). Le domaine est bidimensionnel et la simulation permet de modéliser les effets combinés entre la conduction et le rayonnement au sein de ce dernier. Le problème radiatif est résolu grâce à la méthode des ordonnées discrètes, les propriétés radiatives des gouttes et des gaz ayant été déterminées au préalable. Ces travaux ont permis d'appréhender le comportement radiatif des rideaux. Toutefois, des améliorations telles que la prise en compte d'un modèle tridimensionnel avec une dynamique réaliste du rideau ou de l'ensemble des transferts de chaleur à travers le spray doivent être entreprises.

Les travaux suivants ont permis d'apporter plusieurs évolutions au niveau du problème radiatif. Les études menées par Collin [Collin *et al.*, 2005] et Boulet [Boulet *et al.*, 2006] améliorent la simulation radiative en introduisant un modèle C-k pour la détermination des propriétés des gaz (les propriétés radiatives des gouttes sont toujours évaluées par la théorie de Mie). La prise en considération des transferts de chaleur est également plus complète avec les effets combinés des phénomènes de convection, des flux de chaleur turbulents et surtout de l'évaporation des gouttes. A partir de ces changements, le niveau de transmission du rayonnement à travers un brouillard est évalué. Les principaux résultats montrent que la température varie peu au sein du rideau, qu'une augmentation de la fraction volumique en eau provoque une baisse significative de la transmission et que la pulvérisation doit impérativement mettre en œuvre des gouttes de très petites tailles. L'atténuation est principalement gouvernée par les gouttes au sein du spray, la vapeur d'eau ne jouant un rôle que dans des gammes de longueurs d'onde bien définies. Une perspective importante de ces travaux concerne la modélisation de la dynamique du spray et la mise en place d'essais expérimentaux dans un souci de validation des codes de calcul.

L'aspect expérimental à échelle du laboratoire est traité dans les travaux de Parent [Parent *et al.*, 2006]. Des mesures de transmissions du rayonnement sont effectuées en configuration de spray unique en pulvérisation descendante (la tuyère TP400067 de la société Spraying Systems and co. est utilisée) pour des pressions d'alimentation allant de 1,5 bar à 6 bars. L'effet d'une augmentation de la capacité d'atténuation du rideau avec la pression est retrouvé. Toutefois, la vitesse des gouttes croît également engendrant un temps de séjour plus faible dans le rideau. On observe alors un effet de saturation : à partir d'une certaine pression, le gain en atténuation a tendance à diminuer. Des mesures suivant la hauteur dans le spray sont réalisées et permettent de mettre en avant la faible variation de la transmission suivant ce paramètre. Les niveaux d'atténuation obtenus numériquement dans les travaux de Collin [Collin *et al.*, 2005] sont en accord avec les mesures expérimentales, ce qui permet ainsi la validation du code de calcul radiatif sur une configuration de spray unique.

Les travaux plus récents de Collin [Collin, 2006], [Collin *et al.*, 2007], [Collin *et al.*, 2008] au sein du laboratoire ont permis une amélioration significative sur la modélisation d'un sys-

tème de protection par rideaux d'eau. En effet, un modèle tridimensionnel a été mis en place (cependant, cette avancée engendre des temps de simulation évidemment plus longs, d'où une parallélisation du code de calcul). Un suivi eulérien-lagrangien simule la dynamique du rideau où l'air est entraîné par les gouttelettes d'eau et le problème radiatif est résolu par la méthode de Monte-Carlo. Des essais expérimentaux sont également réalisés en spray unique en situation de transmittance directe (incidence collimatée du rayonnement) et permettent la validation du code de simulation. La sensibilité aux paramètres majeurs que sont la fraction volumique en eau, la granulométrie ainsi que la position dans le rideau est évaluée sur la capacité d'atténuation du rideau. Le code de simulation permet ainsi grâce aux paramètres dynamiques d'expliquer les variations sur les transmittances expérimentales. L'augmentation de la fraction volumique en eau ainsi que la diminution de la taille des gouttes constituent des pistes d'optimisation des systèmes de rideaux d'eau. Par ailleurs, une configuration de pulvérisations en rampes [Collin *et al.*, 2010] permet de créer un véritable bouclier radiatif en augmentant considérablement les dimensions du rideau.

L'ensemble des travaux réalisés au sein du laboratoire a permis la compréhension des mécanismes d'interaction rayonnement - matière mis en jeu au sein du rideau. Le but principal est d'optimiser l'efficacité de ces systèmes de rideaux d'eau tout en conservant une quantité d'eau consommée raisonnable. Un outil numérique performant a été mis en place constituant ainsi un atout majeur dans l'évaluation de la capacité d'atténuation de différentes stratégies de pulvérisation.

La thèse présentée ici s'inscrit directement dans la suite de ces études et constitue une extension des travaux de Collin [Collin, 2006]. L'objectif principal du travail de recherche est de trouver une alternative à la pulvérisation descendante offrant de meilleures capacités d'atténuation tout en conservant la même quantité d'eau injectée. En effet, les niveaux d'atténuation doivent être optimisés. En outre, le volume d'eau au sein du rideau doit être mieux réparti et les effets dynamiques engendrés par les pulvérisations doivent être bénéfiques pour une meilleure efficacité du rideau. Plusieurs stratégies sont comparées à la fois d'un point de vue numérique et d'un point de vue expérimental. La comparaison se fera aussi bien sur la direction d'injection des gouttes (descendante, ascendante) que sur la géométrie de pulvérisation (spray plat, spray hémisphérique, association de tuyères ou rampes, spray impactant), le principe étant de définir une utilisation optimale du spray. Dans un même temps, on poursuivra le développement des outils de caractérisation expérimentaux et numériques.

## 2 Différents modes d'action des rideaux d'eau

Les rideaux d'eau ont trouvé leur première application dans la protection contre les pollutions d'origine chimique. En effet, grâce à l'écoulement d'air généré et à l'adsorption par les gouttelettes d'eau, ils permettent une dilution des polluants dans l'atmosphère. L'efficacité de ces techniques a été démontrée dans les travaux de Lopez [Lopez, 1991], Saint Georges [Saint-Georges, 1993], Griolet [Griolet, 1996] et plus récemment dans ceux de Hald [Hald *et al.*, 2005].

La recrudescence ces dernières années des incendies en tunnel a de manière évidente poussé les scientifiques à trouver des pistes d'optimisation des systèmes de rideaux d'eau sur des problèmes de protection incendie (un recensement a été effectué dans les travaux de Meyrand [Meyrand,

2009] ou Collin [Collin, 2006], un autre concernant les systèmes d'aspersion déjà installés ou installés prochainement est réalisé dans les travaux de Ponticq [Ponticq, 2008]). Ces incendies engendrent dans la majorité des cas des victimes et des pertes matérielles. Par conséquent, les systèmes de protection incendie par brouillard d'eau doivent être performants, d'où les nombreuses études portant sur cette thématique. Les modes d'action de ce type de protection sont multiples. Ils doivent limiter la croissance et la puissance du feu, limiter les niveaux de température au sein du milieu (c'est-à-dire prolonger les conditions de tenabilité pour les personnes non évacuées et pour le personnel d'intervention), limiter la production des fumées (essentiel dans les milieux confinés) et protéger les structures (on se rapproche ici d'une stratégie de pulvérisation impactante où le spray est directement dirigé vers la surface pour la protéger, comme nous le verrons plus loin). Ces modes d'action du rideau interviennent souvent de manière combinée. Les caractéristiques du brouillard d'eau utilisé sont alors adaptées suivant le mode d'action privilégié. Toutefois, l'utilisation du brouillard d'eau ne doit pas engendrer une perte de visibilité trop importante. C'est là une préoccupation actuelle forte des opérationnels. L'évacuation des personnes (par leurs propres moyens avant l'arrivée du personnel d'intervention) situées dans les locaux sinistrés deviendrait alors problématique. Par ailleurs, ce manque de visibilité ne faciliterait évidemment pas l'approche du sinistre par le personnel d'intervention. Par conséquent, l'utilisation de systèmes de rideaux d'eau dans des cas réels ne doit pas être déconnectée de la notion de visibilité.

Nous verrons que les études présentées ici fournissent des résultats dans des domaines variés. Le mode d'action privilégié est d'abord la protection des personnes, réalisée grâce entre autres à la limitation des niveaux de flux rayonnés dans le milieu. La protection des structures est également évoquée avec la stratégie de pulvérisation impactante où les gouttes sont directement projetées sur la cible à protéger. La notion de visibilité, primordiale pour évaluer le bien-fondé d'une installation d'un système de rideau d'eau, fait l'objet d'une attention particulière. Rappelons que l'interaction du spray avec la flamme n'est pas analysée dans ces travaux (le but ici n'est pas d'éteindre l'incendie).

Sur ce dernier point, on peut tout de même noter que l'eau brumisée possède de fortes capacités de production de vapeur et de refroidissement (grande chaleur latente de vaporisation), ce qui permet d'une part une dilution locale de l'oxygène provoquant un étouffement de la flamme et d'autre part un refroidissement de la surface du combustible. De nombreux travaux récents [Consalvi *et al.*, 2004], [Nmira, 2007], [Nmira *et al.*, 2008], [Nmira *et al.*, 2009] sont axés sur les interactions entre le brouillard d'eau et la flamme. L'objectif de ces études est d'évaluer l'influence des paramètres dynamiques du brouillard sur la diminution de la puissance d'un foyer, voire son extinction. Il a été mis en évidence que la distribution en taille de gouttes est un paramètre crucial dans une optique d'extinction. Il est alors apparu qu'une polydispersion est plus efficace qu'une monodispersion. En effet, les grosses gouttes vont permettre d'atteindre plus facilement la surface du combustible alors que les plus petites gouttes vont favoriser une plus forte production de vapeur d'eau. Par ailleurs, une augmentation du débit d'injection tend à diminuer le temps d'extinction. Dans ce type d'applications, on peut également citer les travaux en cours d'E. Blanchard qui sont nés d'une collaboration entre le LEMTA et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

### 3 Outils de simulation et caractérisation des rideaux d'eau

Cette section consiste à présenter les principales méthodes numériques permettant d'une part la modélisation dynamique du rideau d'eau et d'autre part la simulation du problème radiatif. Le but n'est pas de détailler chaque méthode de calcul mais plutôt de faire une présentation succincte de celles existantes. Pour obtenir de plus amples détails sur chacune d'entre elles, on renvoie aux principaux travaux cités (ou au chapitre de ce document dédié à l'approche eulérienne-lagrangienne ou à la méthode de Monte-Carlo).

#### 3.1 Aspects numériques sur la dynamique du rideau

Deux principales méthodes de modélisation de la dynamique du spray sont rencontrées dans la littérature : l'approche eulérienne-eulérienne et l'approche eulérienne-lagrangienne.

La méthode eulérienne-eulérienne consiste à modéliser l'écoulement diphasique air-particules par deux phases continues distinctes. La résolution des équations de bilan sur les différentes phases du milieu est effectuée sur chacun des deux systèmes. Notons également que pour modéliser une polydispersion, nous aurons autant de phases continues caractérisant les particules que de classes souhaitées. Consalvi [Consalvi *et al.*, 2004] utilise en particulier une approche dite multi-classe pour une application proche de nos préoccupations. La méthode des moments [Beck et Watkins, 2002], [Beck et Watkins, 2003] permet également de modéliser l'écoulement d'air et les particules comme deux phases continues distinctes. La différence, comparée à l'approche eulérienne-eulérienne simple, se situe sur la phase caractérisant les particules. A présent, une polydispersion est définie par des moments qui déterminent la distribution en tailles dans le milieu considéré et la concentration en gouttes en particulier [Nmira, 2007], [Nmira *et al.*, 2009]. Cette méthode a été reprise dans les travaux de Eduardo Lemini Aramburo [Eduardo Lemini Aramburo, 2004] pour établir un modèle de jet impactant une paroi (dans l'optique d'une application de type moteur).

C'est au contraire l'approche eulérienne-lagrangienne qui est utilisée dans nos travaux pour modéliser la dynamique du spray. Cette méthode est largement détaillée durant la première partie de ce document et dans les travaux de Collin [Collin, 2006]. Brièvement, la phase dispersée est modélisée grâce au suivi d'un grand nombre de particules au sein de l'écoulement d'air. Quant à la phase continue, elle est simulée grâce à un modèle RANS (Reynolds Average Navier Stokes). Un couplage entre la simulation eulérienne et le suivi lagrangien permet la modélisation numérique complète de la dynamique du spray.

#### 3.2 Aspects numériques sur le problème radiatif

Pour la résolution du problème radiatif, plusieurs méthodes sont rencontrées dans la littérature : la méthode multi-flux et plus particulièrement la méthode deux-flux [Coppalle *et al.*, 1993], [Prétrel, 1997], [Buchlin, 2005]; la méthode des ordonnées discrètes [Berour *et al.*, 2004]; la méthode des volumes finis [Collin, 2006] et la méthode de Monte-Carlo [Collin, 2006]. Dans le cadre de cette étude, nous utilisons la méthode de Monte-Carlo (chapitre 2).

### 4 Ordres de grandeurs et classifications des rideaux d'eau

Le document technique du CNPP (Centre National de Prévention et de Protection) [CNPP, 2007] se propose de donner des définitions concernant l'utilisation des systèmes de rideaux d'eau (il apporte également des exigences d'installation, de maintenance et de fiabilité concernant ces

systèmes). Sa définition du brouillard d'eau est alors :

*Utilisation de l'eau sous forme pulvérisée et finement divisée. Cette pulvérisation doit être telle que 90 % de son volume d'eau est constitué par des gouttes d'un diamètre inférieur à 1 mm ( $D_{V0,9} < 1 \text{ mm}$ ).*

Cette définition est également utilisée dans les travaux de Grant [Grant *et al.*, 2000] qui fournit lui aussi des données caractéristiques sur les brouillards. Le tableau 1 est repris des deux références précédemment citées et offre une classification des sprays en fonction du paramètre  $D_{V0,9}$ .

Classe I	Classe II	Classe III
$D_{V0,9} \leq 200 \text{ } \mu\text{m}$	$200 \text{ } \mu\text{m} \leq D_{V0,9} \leq 400 \text{ } \mu\text{m}$	$400 \text{ } \mu\text{m} \leq D_{V0,9} \leq 1000 \text{ } \mu\text{m}$

TABLE 1 – Classification des brouillards d'eau (selon la norme américaine NFPA 750 - Standard of water mist fire protection systems, 2008)

La distribution de gouttes en volume d'eau est représentée sur la figure 4 de manière cumulée en fonction du diamètre des gouttes d'eau pour une application typique de rideau d'eau utilisée lors de nos travaux. Dans nos cas d'étude, le paramètre  $D_{V0,9}$  vaut  $226 \text{ } \mu\text{m}$ , ce qui signifie que 90 % du volume d'eau injecté se situe en-dessous de ce diamètre. Nous nous situons donc dans des applications en limite de classe II si on suit la classification du tableau 1. Une taille inférieure des gouttes serait à priori préférable sur un plan radiatif mais les travaux expérimentaux à échelle du laboratoire, réalisés sous une pression d'alimentation limitée aux basses pressions, expliquent ce diamètre. Numériquement, des essais sous granulométrie inférieure sont évidemment possibles.

En termes de pressions d'alimentation, la classification donnée dans le document technique du CNPP [CNPP, 2007] est répertoriée dans le tableau 2. Notre gamme de pression utilisée lors des essais expérimentaux se situe entre 1,5 bar et 6 bars maximum.

Basse pression	$P \leq 12,5 \text{ bars}$
Moyenne pression	$12,5 \text{ bars} < P < 35 \text{ bars}$
Haute pression	$P \geq 35 \text{ bars}$

TABLE 2 – Domaines de pressions d'alimentation des systèmes de brouillards d'eau [CNPP, 2007]

L'utilisation des brouillards d'eau présente plusieurs avantages. Du fait d'un volume d'eau plus finement divisé, la quantité de gouttes au sein du rideau devient considérable engendrant ainsi une surface d'échange entre l'eau et le milieu bien plus importante comparée à un système plus conventionnel tel que le sprinklage par exemple (où les gouttes utilisées ont un diamètre

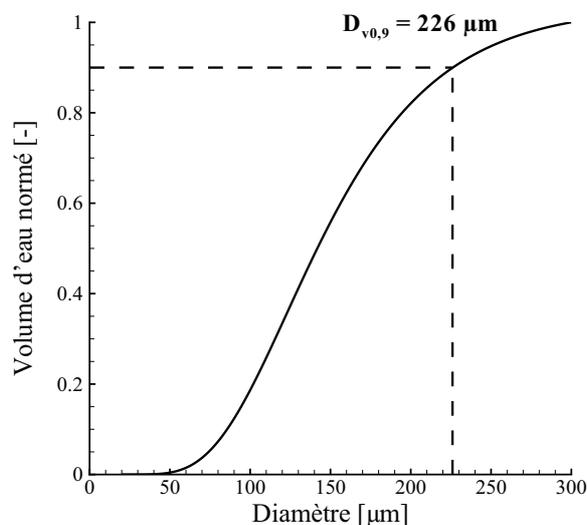


FIGURE 4 – Distribution cumulée de gouttes en volume d’eau en fonction du diamètre des gouttes pour la granulométrie à l’injection utilisée dans nos cas d’étude

beaucoup plus gros, supérieur à 1 mm). La figure 5 illustre bien ce phénomène. Si on prend en considération un diamètre de 100  $\mu\text{m}$  (ordre de grandeur des diamètres de gouttes utilisés dans le cadre de ces travaux) par rapport à un diamètre de 1 mm, le nombre de gouttes dans un litre d’eau est multiplié par 1000 (figure 5(a)), ce qui provoque une surface d’échange multipliée par 10 (figure 5(b)). Bien évidemment, plus on pulvérise petit, plus cet écart va se renforcer. L’atténuation du rayonnement attendue est logiquement meilleure (due au grand nombre de gouttes pulvérisées). En ce qui nous concerne (objectif de protection), une fine granulométrie est par conséquent mieux adaptée à une utilisation des rideaux comme écran radiatif.

Le tableau 3 offre un aperçu sur les niveaux de température (ou de flux) à atteindre dans le milieu pour assurer une protection efficace des usagers en utilisant les systèmes de brouillards d’eau. Ce dernier présente les critères de tenabilité (température, flux thermique, concentration en CO et visibilité) pour les usagers et le personnel d’intervention [Meyrand, 2009], [Ponticq, 2008].

	Usagers	Personnel d’intervention
Température maximum d’exposition	50°C	100°C
Flux thermique radiatif maximum	2 kW.m <sup>-2</sup>	5 kW.m <sup>-2</sup>
Concentration maximum en CO	300 ppm	sous ARI (Appareil Respiratoire Individuel)
Visibilité	> 10 m	

TABLE 3 – Critère de tenabilité pour les usagers et le personnel d’intervention

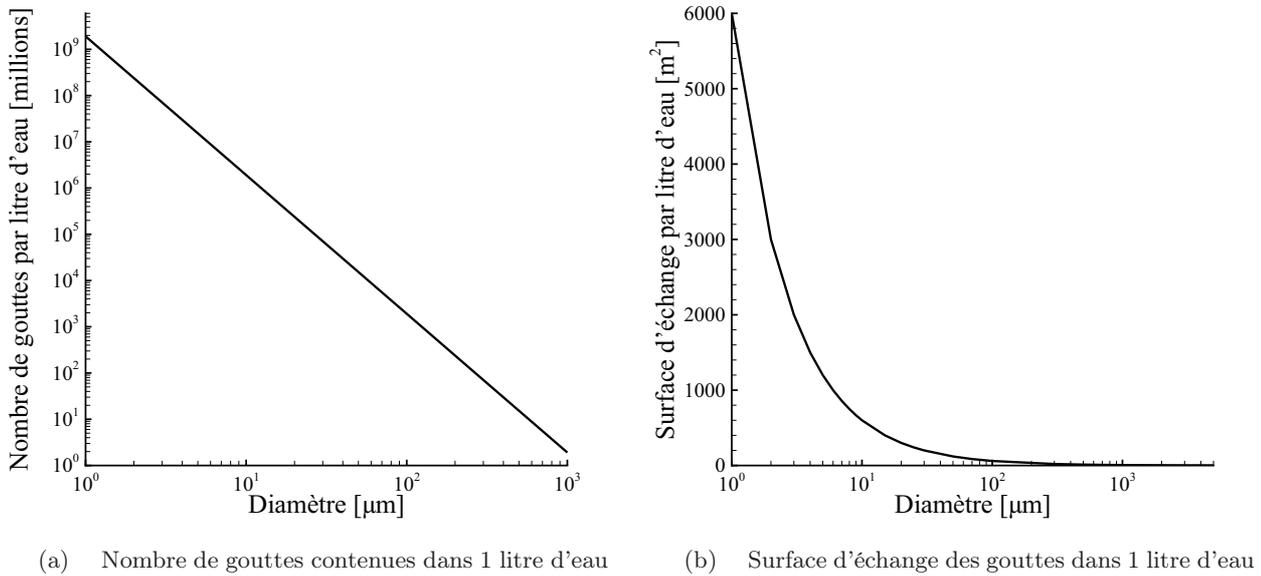


FIGURE 5 – Caractéristiques des gouttelettes d'eau contenues dans 1 litre

## 5 Raisons justifiant l'étude de stratégies de pulvérisation différentes

Etudier des stratégies de pulvérisation différentes de la configuration descendante "classique" s'est justifié par plusieurs raisons. Tout d'abord, il semblait que le potentiel du rideau d'eau à atténuer le rayonnement infrarouge n'était pas exploité à son maximum. En effet, on s'est rendu compte que projeter directement les gouttelettes d'eau vers le sol engendrait un temps de séjour de ces dernières très faible dans la zone de spray. Leur participation à l'interaction avec le rayonnement s'en trouvait donc limitée. Une solution simple pour améliorer la capacité d'atténuation du rideau est d'augmenter le débit mais ce gain se fait au détriment de la consommation d'eau. Le but recherché est de conserver le même volume d'eau injecté tout en augmentant l'efficacité du brouillard. A partir de là, nos recherches se sont axées sur d'autres stratégies de pulvérisation.

La première stratégie concerne la configuration ascendante, le principe consistant à éjecter les gouttelettes d'eau vers le haut. L'idée est alors de profiter d'un double passage des gouttes dans la zone de spray. En effet, ces dernières, éjectées vers le haut, vont alors suivre une phase ascendante puis une phase descendante. On peut donc légitimement penser que l'efficacité face au rayonnement infrarouge va être améliorée (un doublement de la capacité d'atténuation est ainsi attendu). Les deux précédents systèmes de protection par brouillard d'eau (descendant et ascendant) consistent à intercaler le rideau entre la cible et la source radiative. Une alternative à cette technique est d'injecter directement le spray sur la cible à protéger. La protection est alors double : la propagation du rayonnement est limitée d'une part par le rideau d'eau injecté puis d'autre part par le film liquide sur la paroi (il est en effet probable que l'impact des gouttes sur la paroi crée un film liquide ruisselant participant lui aussi à l'atténuation du rayonnement). Une étude spécifique des régimes d'impact est développée plus loin dans l'annexe A. Signalons que le spray impactant a déjà fait l'objet de travaux de la part de Hald [Hald et Buchlin, 2003]

et Buchlin [Buchlin, 2005]. Dans ces études, seule l'influence du film liquide sur l'atténuation du rayonnement est prise en compte, les transferts radiatifs étant modélisés par la méthode deux-flux.

Toutes ces stratégies de pulvérisation sont étudiées au cours de ces travaux, le but étant d'optimiser leur efficacité sans pour autant multiplier la quantité d'eau injectée. Une comparaison entre ces différentes configurations est effectuée et permet de dégager des pistes d'optimisation de ces systèmes.

## 6 Composition du document

Ce mémoire s'articule en deux parties principales. La première détaille les différents outils servant à la caractérisation aussi bien numérique qu'expérimentale des rideaux d'eau. Le code de calcul est dans un premier temps détaillé. Mis en place au sein de l'équipe transfert radiatif du laboratoire LEMTA par Collin [Collin, 2006], le code numérique simule la dynamique des rideaux d'eau ainsi que les transferts radiatifs à travers ceux-ci. Un couplage eulérien-lagrangien permet de suivre des gouttelettes d'eau au sein de l'écoulement d'air environnant. Dans ces applications du type bouclier radiatif, nous supposons que l'absorption du rayonnement est trop limitée pour avoir une influence sur les propriétés radiatives des gouttes d'eau (le rideau d'eau est assez éloigné de la source de rayonnement pour ne pas prendre en compte cet effet). Le problème radiatif est ensuite résolu par la méthode de Monte-Carlo après avoir déterminé les propriétés radiatives du milieu (la théorie de Mie et le modèle C-k permettent respectivement de calculer les propriétés des gouttes et des gaz). Nous verrons une description de ces différents modules. Par ailleurs, plusieurs études de sensibilité sur les paramètres clés de ce code de calcul ont été réalisées afin d'évaluer leur influence sur la capacité d'atténuation d'un rideau. La deuxième manière de caractériser les systèmes de brouillard d'eau réside dans l'approche expérimentale. Le dispositif mis en place au cours de ces travaux est largement détaillé. Il permet l'évaluation de la capacité d'atténuation de diverses stratégies de pulvérisation se différenciant par de nombreux paramètres (direction d'injection, nombre de buses associées et espacement entre elles, nombre de rampes associées et écartement entre elles, type de buses, pression, position spatiale d'étude).

La deuxième partie présente les différents cas d'étude analysés au cours de ces travaux. Tout d'abord, une comparaison en situation de spray unique est réalisée entre injection descendante et injection ascendante avec une confrontation entre résultats numériques et expérimentaux. Ensuite, afin de se rapprocher de configurations plus réalistes, le système en rampes (association de plusieurs sprays) est privilégié. Plusieurs stratégies de pulvérisation sont analysées numériquement et expérimentalement. De manière globale, elles se différencient par leur direction d'injection et sont classées en trois grandes familles : pulvérisation descendante, pulvérisation ascendante et pulvérisation impactante. La comparaison en terme d'efficacité de l'ensemble de ces configurations permet alors de dégager des pistes en vue d'une optimisation des systèmes de rideaux d'eau. Une dernière étude est réalisée dans des gammes de longueurs d'onde dans le domaine visible. Elle apporte des éléments de réponse sur la question posée actuellement concernant la visibilité à travers les brouillards d'eau.

Une synthèse générale est finalement établie. Elle apporte les principales conclusions observées lors de ces travaux sur les systèmes de rideaux d'eau utilisés comme bouclier radiatif. Ce bilan permet également de dégager plusieurs perspectives de développement en vue d'une poursuite de ces études.



## Première partie

# Outils de caractérisation : code de calcul et banc de mesures



# Introduction de la première partie

Cette première partie est consacrée à la présentation des outils de caractérisation : le code de calcul BERGAMOTE (Balance Equations for Radiation Global Attenuation - Model for Optimal Transmission Extinction) et le dispositif expérimental. Mis en place par Collin [Collin, 2006], le modèle permet une modélisation numérique des systèmes de rideaux d'eau utilisés dans une application de type bouclier radiatif. Il a été repris dans la thèse et a fait l'objet de modifications et améliorations décrites plus loin.

Deux codes couplés, présentés dans le chapitre 1, sont utilisés : celui assurant le calcul sur la dynamique du spray et celui évaluant les transferts radiatifs à travers ce même spray. Le schéma de principe du modèle est représenté sur la figure 1. La modélisation se fait en plusieurs étapes. Dans un premier temps, un couplage eulérien-lagrangien va permettre de modéliser un écoulement diphasique où l'air est entraîné par les gouttelettes d'eau injectées (le suivi lagrangien permet de caractériser le mouvement des particules et la simulation eulérienne celui de l'écoulement d'air environnant les gouttelettes d'eau).

Puis, une fois la convergence du calcul sur la dynamique du spray atteinte, une deuxième étape va modéliser les transferts radiatifs à travers le rideau grâce à la méthode de Monte-Carlo. La finalité est alors d'estimer les capacités d'atténuation du rayonnement atteintes par des rideaux d'eau. Signalons qu'une description du code radiatif est menée dans le chapitre 2. Un couplage est possible entre la dynamique du spray et les transferts radiatifs. En effet, si le rayonnement affecte la taille des gouttes via l'évaporation de celles-ci, une mise à jour des propriétés peut être effectuée et un nouveau calcul sur la dynamique est lancé. Le processus itératif peut ensuite être poursuivi entre les deux modules. Toutefois, dans les applications présentées au sein de ces travaux, ce phénomène n'est pas pris en compte car nous nous plaçons dans des situations où la source de chaleur est assez éloignée de la zone de brouillard pour ne pas influencer les propriétés dynamiques du rideau (la densité de flux devient limitée, ce qui est notamment le cas dans la configuration expérimentale).

Toutes les stratégies de pulvérisation envisageables pourront ainsi être étudiées et les efficacités des sprays seront comparées notamment en terme de transmission du rayonnement ou d'atténuation. En pratique, le code numérique est parallélisé permettant ainsi une convergence plus rapide des calculs (notons que la partie eulérienne n'est pas parallélisée). La simulation numérique est alors effectuée sur un cluster comprenant 16 processeurs.

Par ailleurs, le chapitre 3 fournit une description détaillée du banc expérimental mis en place lors de ces travaux et permettant la caractérisation spectrale des rideaux d'eau. L'avantage du dispositif réside dans la possibilité d'étudier diverses stratégies de pulvérisation. Les résultats expérimentaux obtenus permettront également d'évaluer la validité du code de simulation.

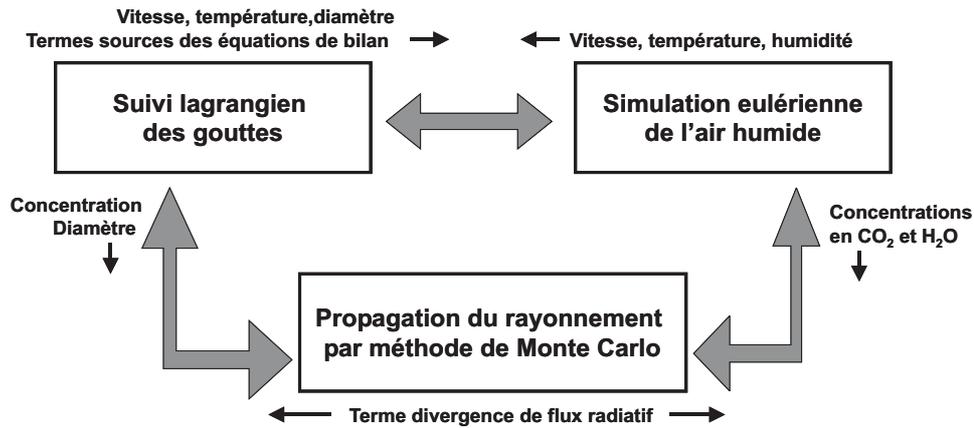


FIGURE 1 – Schéma de principe du code de calcul

Trois annexes sont attachées à cette première partie. L'annexe A présente des aspects spécifiques à la stratégie de pulvérisation impactante. Les différents régimes d'impact sur paroi froide ainsi que les paramètres influençant leurs apparitions ou non sont exposés. On note également la présentation des principaux modèles numériques issus de la littérature définissant les limites entre les différents régimes. L'annexe B est consacrée à une étude de sensibilité sur plusieurs variables numériques importantes. Le but est d'évaluer leurs influences sur la transmission du rayonnement à travers le rideau. Par ailleurs, une étude d'ordres de grandeur est réalisée sur les deux principaux paramètres dynamiques influençant la capacité d'atténuation d'un rideau, à savoir la fraction volumique en eau et le diamètre des gouttes. Au cours de ces travaux, nous avons fait appel de manière occasionnelle à deux dispositifs expérimentaux présentés dans l'annexe C. Le premier dispositif permet de mesurer la distribution granulométrique au sein du spray par anémométrie phase doppler. Le deuxième assure la visualisation d'impacts de gouttes sur une paroi froide grâce à une caméra rapide.

# Chapitre 1

## Dynamique du spray

Dans le code de calcul, la procédure MIRABELLE nous permet de simuler la dynamique du spray par l'intermédiaire d'un couplage eulérien-lagrangien des équations. La modélisation prend en compte les phénomènes d'évaporation, de convection et de dispersion turbulente pour une représentation plus réaliste du brouillard. Ce code de simulation sur la dynamique du spray est repris des travaux de Collin [Collin, 2006].

Le suivi lagrangien des gouttes est d'abord détaillé. Cette méthode lagrangienne permet de suivre chaque particule en enregistrant sa taille, sa température, sa vitesse et ses positions successives. Puis, grâce au lancer d'un grand nombre de gouttes, toutes les caractéristiques physiques de la phase dispersée comme la fraction volumique, la taille moyenne ou les termes sources utiles à la simulation eulérienne de l'air entraîné sont évaluées par traitement statistique.

La simulation eulérienne est ensuite présentée. En effet, l'injection de gouttelettes d'eau va induire un écoulement d'air humide turbulent. Les caractéristiques de la phase continue sont connues grâce à la simulation eulérienne qui consiste en la résolution des équations de bilan sur la masse, la quantité de mouvement, l'énergie et l'humidité par la méthode des volumes finis. La turbulence de l'écoulement est déterminée par un modèle  $k - \epsilon$  standard.

Le couplage eulérien-lagrangien va finalement permettre une simulation complète du rideau d'eau.

### 1.1 Suivi lagrangien des gouttes

Toutes les équations nécessaires au suivi d'une particule sont présentées dans cette section ainsi que l'ensemble des phénomènes intervenant durant le parcours de la goutte.

#### 1.1.1 Equation du mouvement

L'équation régissant le mouvement de la particule est le principe fondamental de la dynamique, permettant de déterminer les composantes de la vitesse instantanée de la goutte selon la relation :

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = \sum \vec{F}_{\text{extérieures}} \quad (1.1)$$

où  $m_p$  est la masse de la particule et  $\vec{V}_p$  représente le vecteur vitesse de cette même particule.

Deux principales forces sont prises en compte : la force de traînée et les effets de la gravité. Collin [Collin, 2006] a d'ailleurs montré que les autres forces pouvant intervenir dans l'équation du mouvement étaient généralement négligeables devant le terme de traînée (force de masse ajoutée, force de gradient de pression, terme historique et force de portance).

### Force de traînée

La traînée correspond à la résistance qu'exerce le fluide environnant sur les particules en mouvement. Elle résulte à la fois des forces de frottements et des forces de pression. Son expression est la suivante :

$$\vec{F}_{\text{traînée}} = C_{\text{traînée}} \rho_f \frac{\pi d_p^2}{8} V_r^2 \frac{\vec{V}_r}{\|\vec{V}_r\|} \quad (1.2)$$

où  $\vec{V}_r$  est la vitesse instantanée relative,  $d_p$  le diamètre de la particule et  $C_{\text{traînée}}$  le coefficient de traînée. La vitesse instantanée relative représente la différence entre les vitesses du fluide et de la particule en mouvement :

$$\vec{V}_r = \vec{U}_f - \vec{V}_p \quad (1.3)$$

avec  $\vec{U}_f$  représentant la vitesse instantanée de la phase fluide.

Pour une particule qui s'évapore, le coefficient de traînée est donné par la relation établie par Faeth [Faeth, 1977] :

$$C_{\text{traînée}} = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) \quad (1.4)$$

avec  $Re_p$  le nombre de Reynolds particulaire défini comme suit :

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p \|\vec{U}_f - \vec{V}_p\|}{\mu_f} \quad (1.5)$$

où  $\rho_f$  est la masse volumique du fluide et  $\mu_f$  est la viscosité dynamique du fluide.

### Force de pesanteur

La force de pesanteur désigne la contribution apportée à la fois par la force de gravité et par celle d'Archimède. Elle se définit sous la forme suivante :

$$\vec{F}_{\text{masse apparente}} = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \vec{g} \quad (1.6)$$

avec  $\rho_p$  la masse volumique de la particule et  $\vec{g}$  le vecteur accélération de la pesanteur.

## Bilan des forces

L'équation du mouvement peut alors s'écrire :

$$m_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} = C_{\text{traînée}} \rho_f \frac{\pi d_p^2}{8} V_r^2 \frac{\vec{V}_r}{\|\vec{V}_r\|} + \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_f) \vec{g} \quad (1.7)$$

### 1.1.2 Equation de la trajectoire

L'équation de la trajectoire permet de déterminer la position de la particule à partir de sa vitesse, évaluée précédemment grâce au principe fondamental de la dynamique. Son expression est donnée sous la forme suivante :

$$\frac{d\vec{X}_p}{dt} = \vec{V}_p \quad (1.8)$$

$\vec{X}_p$  représente le vecteur position de la particule.

### 1.1.3 Bilan massique

Pendant le parcours de la goutte dans le milieu, la masse de celle-ci (et par conséquent son diamètre) peut varier sensiblement dans le cas où le phénomène d'évaporation est pris en compte. Cette évolution est régie par la relation :

$$\frac{d d_p^3}{dt} = - \frac{6}{\rho_p \pi} \dot{m}_{\text{évap}} \quad (1.9)$$

$\dot{m}_{\text{évap}}$  représente le débit d'eau évaporée. Il est obtenu grâce au modèle d'évaporation.

Si le phénomène d'évaporation n'est pas pris en compte, l'équation 1.9 devient alors :

$$\frac{d d_p^3}{dt} = 0 \quad (1.10)$$

L'évaporation de la goutte est gouvernée essentiellement par le gradient d'humidité entre la particule et l'air humide l'environnant. En effet, sous l'hypothèse de la position assez éloignée du rideau d'eau par rapport à notre source de chaleur, la température à l'intérieur de notre spray est voisine de la température ambiante. Dans une utilisation de type bouclier radiatif, la source de chaleur a peu d'influence sur l'évaporation des gouttelettes d'eau.

Le modèle d'évaporation choisi, permettant de déterminer le terme  $\dot{m}_{\text{évap}}$  de notre bilan massique (équation 1.9), est le modèle de diffusion avec soufflage, déjà utilisé dans les travaux de Collin [Collin, 2006], Sirignano [Sirignano, 1999], Prêtre [Prêtre, 1997]. Celui-ci consiste à prendre en compte le flux de Stefan engendrant une augmentation du flux d'évaporation et de convection.  $\dot{m}_{\text{évap}}$  est déterminé par la résolution de l'équation de transport de l'humidité absolue  $Y$  autour d'une goutte. Après simplification largement détaillée par Collin [Collin, 2006],  $\dot{m}_{\text{évap}}$  est donné par :

$$\dot{m}_{\text{évap}} = \pi d_p Sh^* \rho_m C_{\text{diff}} \ln(1 + B_m) \quad (1.11)$$

où  $C_{\text{diff}}$  est le coefficient de diffusion de la vapeur dans l'air,  $r$  le rayon de la particule et  $Sh^*$  le nombre de Sherwood modifié, proposé par Sirignano [Sirignano, 1999] :

$$Sh^* = 2 + \frac{Sh_0 - 2}{F_M} \quad (1.12)$$

Le terme  $Sh_0$  correspond au nombre de Sherwood calculé en négligeant le flux de Stefan. Il dépend de la gamme de Reynolds dans laquelle les gouttes évoluent et il est donné selon la relation :

$$Sh_0 = 1 + (1 + Re_p Sc)^{\frac{1}{3}} g(Re_p) \quad \text{avec } g(Re_p) = \max(1, Re_p^{0,077}) \quad (1.13)$$

où  $Sc$  est le nombre de Schmidt défini par :

$$Sc = \frac{\mu_m}{C_{\text{diff}} \rho_m} \quad (1.14)$$

avec l'indice  $m$  faisant référence à l'utilisation des propriétés du mélange. Elles sont évaluées à partir des concepts de film selon les lois suivantes :

$$T_m = T_s + \frac{1}{3} (T_f - T_s) \quad (1.15)$$

$$Y_m = Y_s + \frac{1}{3} (Y_f - Y_s) \quad (1.16)$$

$F_M$ , présent dans l'équation du nombre de Sherwood modifié 1.12, représente un facteur correctif dont Sirignano [Sirignano, 1999] a établi l'équation ci-dessous :

$$F_M = (1 + B_M)^{0,7} \frac{\ln(1 + B_M)}{B_M} \quad (1.17)$$

avec  $B_M$ , déjà rencontré dans l'expression de  $\dot{m}_{\text{évap}}$ , le nombre de transfert de masse de Spalding donné par :

$$B_M = \frac{Y_{\text{sat}} - Y_f}{1 - Y_{\text{sat}}} \quad (1.18)$$

où  $Y_{\text{sat}}$  est l'humidité absolue à pression de saturation.

#### 1.1.4 Equation de la chaleur

L'évolution de température peut être due à plusieurs modes de transferts de chaleur : la convection de l'air autour de la goutte, l'évaporation de la goutte, la conduction à l'intérieur de la goutte et le rayonnement incident sur la goutte. Nous supposons une température homogène au sein de la goutte. Nous utilisons alors un modèle de conduction infinie qui consiste à supposer la température à l'intérieur de la goutte équivalente à celle à sa surface ( $T_p(r, t) = T_s$ ). Quant au rayonnement incident, il est négligé car les flux engendrés sont faibles au niveau expérimental.

L'équation de la chaleur se présente comme suit :

$$\rho_p \frac{\pi d_p^3}{6} C_{pp} \frac{dT_p}{dt} = Q_p \quad (1.19)$$

où  $C_{pp}$  représente la capacité calorifique de la particule et  $Q_p$  les échanges thermiques entre la particule et l'air environnant (échanges dus à la convection et à l'évaporation). Cette quantité  $Q_p$  a été suggérée par Abramzon et Sirignano [Sirignano, 1999] sous la forme :

$$Q_p = \dot{m}_{\text{évap}} \left[ \frac{C_{p_v} (T_f - T_s)}{B_T} - L_v \right] \quad (1.20)$$

où  $C_{p_v}$  correspond à la capacité calorifique de la vapeur,  $L_v$  à la chaleur latente d'évaporation de l'eau,  $T_f$  et  $T_s$  respectivement à la température du milieu extérieur et à la température de surface de la particule, et  $B_T$  au nombre de transfert thermique de Spalding.  $\dot{m}_{\text{évap}}$  représente le débit de vapeur évaporée déjà étudié dans le paragraphe précédent.

D'après Collin [Collin, 2006], le nombre de transfert thermique de Spalding  $B_T$  est déterminé par la relation suivante :

$$B_T = (1 + B_M) \frac{Sh^* C_{p_v}}{Nu^* C_{p_m} Le_m} - 1 \quad (1.21)$$

où le nombre de Nusselt modifié  $Nu^*$  est défini par la relation :

$$Nu^* = 2 + \frac{Nu - 2}{F_T} \quad (1.22)$$

avec :

$$F_T = (1 + B_T)^{0,7} \frac{\ln(1 + B_T)}{B_T} \quad (1.23)$$

Sirignano [Sirignano, 1999] exprime le nombre de Nusselt par la corrélation suivante :

$$Nu = 1 + (1 + Re_p Pr_m)^{\frac{1}{3}} g(Re_p) \quad \text{avec } g(Re_p) = \max(1, Re_p^{0,077}) \quad (1.24)$$

où  $Pr_m$  est le nombre de Prandtl du mélange air-vapeur.

Le nombre de Lewis du mélange  $Le_m$  est défini suivant la relation :

$$Le_m = \frac{\Lambda_m}{C_{p_m} \rho_m C_{diff}} \quad (1.25)$$

où  $\Lambda_m$  est la conductivité thermique du mélange.

Le calcul de  $B_T$  est itératif comme expliqué dans Collin [Collin, 2006].

De nombreux cas de comparaisons avec des données issues de la littérature ont été effectués par Collin [Collin, 2006], permettant ainsi de valider le modèle d'évaporation utilisé.

## 1.2 Modèle de dispersion

L'écoulement diphasique considéré est turbulent. Par conséquent, cette turbulence influence les propriétés de la particule notamment son mouvement et sa température. L'écoulement d'air étant résolu par un modèle RANS basé sur des équations moyennées, nous obtenons donc les caractéristiques moyennes de la phase continue (section 1.3). Cependant, pour appliquer le suivi lagrangien des particules, les caractéristiques instantanées de la vitesse et de la température de la phase fluide sont nécessaires. Pour les déterminer et ainsi permettre le suivi des particules dans un écoulement turbulent, les vitesses et températures instantanées de la phase fluide sont

décomposées en une valeur moyenne, laquelle est connue grâce à la simulation eulérienne, et une fluctuation à déterminer :

$$\vec{U}_f = \langle \vec{U}_f \rangle + \vec{u}_f \quad (1.26)$$

$$\Theta_f = \langle \Theta_f \rangle + \theta_f \quad (1.27)$$

Un modèle de dispersion va nous permettre de déterminer ces fluctuations. Deux principaux modèles ont été testés : ceux de type Eddy interaction et les modèles stochastiques du premier ordre. Le premier cité est le plus répandu dans la littérature, notamment dans les travaux de Gosman [Gosman et Ioannides, 1981] et Graham [Graham et James, 1996]. Ces modèles génèrent des tourbillons aléatoires, chacun ayant une durée de vie, une zone d'influence et une intensité propres. La particule est influencée par ce tourbillon tant qu'elle reste au voisinage de celui-ci et tant que la durée de vie de ce même tourbillon n'est pas dépassée. Si un des deux cas se produit, une nouvelle fluctuation de vitesse est estimée en se basant sur les propriétés moyennes du fluide.

La seconde catégorie de modèle a été proposée par Burry et Bergeles [Burry et Bergeles, 1993]. Le principe consiste à déterminer les fluctuations de vitesse ou température du fluide le long de la trajectoire de la particule grâce à des processus stochastiques. Le formalisme utilisé dans notre code numérique est basé sur les travaux de Moissette [Moissette, 2001] et Pétrissans [Pétrissans, 2001]. Dans ces modèles, les fluctuations sont générées grâce à une corrélation lagrangienne de forme exponentielle.

### 1.2.1 Fluctuations de vitesse

Les fluctuations de vitesse sont calculées de la manière suivante :

$$u_i^n = u_i^{n-1} \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_i^*}\right) + \Psi_i \quad (1.28)$$

où  $u_i^n$  correspond à la  $i^{\text{ème}}$  composante des fluctuations de vitesse du fluide au  $n^{\text{ième}}$  pas de temps,  $u_i^{n-1}$  au  $(n-1)^{\text{ième}}$  pas de temps.  $T_i^*$  représente l'échelle intégrale temporelle modifiée du fluide vu par la particule,  $\Delta t$  le pas de temps et  $\Psi_i$  une variable gaussienne de moyenne nulle. La détermination de cette variable gaussienne est largement détaillée dans les travaux de Moissette [Moissette *et al.*, 2001] et Collin [Collin, 2006].

L'échelle intégrale temporelle du fluide vu par la particule est définie selon Wang [Wang et Stock, 1993] par la relation :

$$T_i^* = T_{mE_i} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_L}{T_{mE_i}} \right) \left( (1 + St)^{0,4(1+0,01 St)} \right)^{-1} \right] \quad (1.29)$$

où  $St$  est le nombre de Stokes valant :

$$St = \frac{\tau_p}{T_{mE}} \quad (1.30)$$

avec  $\tau_p$  le temps de relaxation dynamique de la particule défini par :

$$\tau_p = \frac{4 \rho_f d_p^2}{3 \mu_f Re_p C_{\text{traînée}}} \quad (1.31)$$

On définit également une échelle de longueur  $L_f$  donnée par la relation :

$$L_f = \sqrt{\frac{2}{3}} k T_{mE} \quad (1.32)$$

Le temps mobile eulérien  $T_{mE}$ , présent dans les équations précédentes, est défini selon Zimmer [Zimmer, 2001], ayant lui aussi appliqué cette méthode stochastique à des sprays, par :

$$T_{mE} = \frac{T_L}{0,3} \quad (1.33)$$

La variable  $T_L$  correspond à l'échelle lagrangienne du fluide. Pour des problèmes de réalisabilité dus à l'utilisation d'un modèle de turbulence  $k - \epsilon$  dans la simulation eulérienne du fluide,  $T_L$  sera déterminée dans le cas d'une turbulence homogène isotrope comme dans Collin [Collin, 2006]. Sa définition est alors :

$$T_L = \frac{4k}{3C_0\epsilon} \quad (1.34)$$

avec  $C_0$  une constante du modèle fixée à 2.

Une modification de  $T^*$  est introduite afin de prendre en compte la présence d'une force extérieure (la gravité). D'après les travaux de Wang [Wang et Stock, 1993] on a alors :

$$T_{\parallel}^* = \frac{T^*}{\sqrt{1 + \left(\frac{T^* V_r^*}{L_f}\right)^2}} \quad (1.35)$$

$$T_{\perp}^* = \frac{T^*}{1 + \left(\frac{T^* V_r^*}{L_f}\right)^2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{T^* V_r^*}{L_f}\right)^2} - \frac{T^* V_r^*}{2L_f} \right] \quad (1.36)$$

où  $V_r$  représente la vitesse relative moyenne.

Cette modification impose un changement de repère pour se placer dans un repère local centré sur la goutte où  $T_{\parallel}^*$  correspond à une propriété dans le sens longitudinal et  $T_{\perp}^*$  aux deux directions transversales.

La validation du modèle de dispersion, grâce à des cas issus de la littérature, a été largement détaillée dans les travaux de Collin [Collin, 2006].

### 1.2.2 Fluctuations de température

Pour simuler les fluctuations de température  $\theta_f^n$ , nous utilisons également un modèle stochastique du premier ordre basé sur les mêmes équations que celles nous donnant les fluctuations de vitesse. Elles sont donc générées de la manière suivante :

$$\theta_f^n = \theta_f^{n-1} \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{\theta}^*}\right) + \xi \quad (1.37)$$

Le terme  $\xi$  est une variable gaussienne dont la détermination est détaillée dans les travaux de Moissette [Moissette, 2001] et Collin [Collin, 2006].

L'échelle intégrale temporelle du fluide vu  $T_\theta^*$  est donnée par la relation suivante dans le cas d'une anisotropie de la dispersion :

$$T_\theta^* = \frac{T_\parallel^*}{Pr_t} \quad (1.38)$$

où  $Pr_t$  est le nombre de Prandtl turbulent fixé à 0,86.

### 1.2.3 Choix du pas de temps pour le suivi des particules

Dans la mise en œuvre du suivi lagrangien, le pas de temps est un élément essentiel. Si ce paramètre est mal évalué, la dynamique du spray résultant de la simulation numérique peut s'en trouver erronée. En effet, un pas de temps trop important ne permettra pas d'obtenir, en post-traitement, des statistiques fiables sur les caractéristiques du spray simulé (fraction volumique, diamètre), notamment dans des zones où la vitesse des gouttes est élevée, ce qui engendrera une évaluation erronée des phénomènes physiques dans notre milieu. En pratique, la particule va fournir une information concernant ses propriétés dynamiques à chaque pas de temps. Puis, en post-traitement, des statistiques sont établies afin d'obtenir les propriétés moyennes du spray. Pour la définition du pas de temps et le traitement statistique des données, on se référera à la section 1.3 du chapitre 1 des travaux de Collin [Collin, 2006].

## 1.3 Simulation eulérienne de l'air entraîné

L'ensemble des équations permettant la simulation eulérienne de l'air entraîné est présenté au cours de cette section. Les équations de bilan sur la masse, la quantité de mouvement, l'énergie et l'humidité sont résolues par la méthode des volumes finis. La turbulence de l'écoulement est déterminée par un modèle  $k - \epsilon$  standard.

### 1.3.1 Equations de bilan

Toutes les équations de bilan utilisées pour simuler l'écoulement d'air sont présentées dans ce paragraphe. Afin de permettre une résolution similaire par la méthode des volumes finis pour l'ensemble des équations, elles seront toutes mises sous la forme générale suivante (Patankar [Patankar, 1980], Versteeg [Versteeg et Malalasekera, 1998]) :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \langle U_{f_j} \rangle \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S \quad (1.39)$$

où  $S$  représente le terme source incluant les phénomènes de dissipation ou de production par unité de volume et  $\phi$  la grandeur étudiée. Le terme de gauche est un terme de convection et le premier terme de droite est un terme de diffusion. Les termes sources seront définis dans la section 1.4.

### Bilan massique

Nous considérons le bilan massique suivant :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \langle U_{f_j} \rangle) = 0 \quad (1.40)$$

Dans les sprays étudiés, la fraction volumique en gouttes est très faible, provoquant ainsi un débit massique d'eau évaporée négligeable sur le bilan de masse global (Béard [Béard, 1994], Ruger [Rüger *et al.*, 2000]). C'est la raison pour laquelle l'équation de continuité ne comprend pas de terme source ou de terme d'échange.

### Bilan sur la quantité de mouvement

Le champ de vitesse de la phase continue est calculé par les équations de Navier Stokes. Une équation est nécessaire pour chaque composante de vitesse. Après introduction d'une relation de fermeture de type loi de gradient et mise sous forme générale, l'équation devient, d'après Collin [Collin, 2006] :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \langle U_{f_j} \rangle \langle U_{f_i} \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_f + \mu_t) \frac{\partial \langle U_{f_i} \rangle}{\partial x_j} \right] + S_{U_{f_i}} \quad (1.41)$$

avec :

$$S_{U_{f_i}} = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \langle P_r \rangle + \frac{2}{3} \rho_f k_f \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu_f + \mu_t) \frac{\partial \langle U_{f_j} \rangle}{\partial x_i} \right] + \langle S_{p_{u_i}} \rangle \quad (1.42)$$

où  $S_{p_{u_i}}$  représente l'influence de la phase dispersée sur la phase continue,  $\mu_t$  correspond à la viscosité dynamique turbulente et  $k_f$  à l'énergie cinétique turbulente. Pour déterminer ces deux valeurs, le modèle de turbulence  $k - \epsilon$  standard est utilisé et consiste en la résolution d'équations de transport portant sur  $k_f$  et sur le taux de dissipation de l'énergie turbulente  $\epsilon_f$ , telle que proposée dans les travaux de Boulet [Boulet et Moissette, 2002], Grancher [Grancher, 1990], Berlemont [Berlemont *et al.*, 1995] ou Sommerfeld [Sommerfeld, 1997] par exemple.

L'équation de transport sur  $k_f$  s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f k_f \langle U_{f_i} \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_f}{\partial x_j} \right] + S_k \quad (1.43)$$

avec :

$$S_k = \frac{\partial \langle U_{f_j} \rangle}{\partial x_i} \left[ \mu_t \left( \frac{\partial \langle U_{f_i} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_{f_j} \rangle}{\partial x_i} \right) \right] - \rho_f \epsilon_f + \langle S_{p_k} \rangle \quad (1.44)$$

L'équation de transport sur  $\epsilon_f$  est donnée par la relation :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_f \epsilon_f \langle U_{f_i} \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_f + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon_f}{\partial x_j} \right] + S_\epsilon \quad (1.45)$$

avec :

$$S_\epsilon = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon_f}{k_f} \frac{\partial \langle U_{f_j} \rangle}{\partial x_i} \left[ \mu_t \left( \frac{\partial \langle U_{f_i} \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_{f_j} \rangle}{\partial x_i} \right) \right] - C_{2\epsilon} \rho_f \frac{\epsilon_f^2}{k_f} + \langle S_{p_\epsilon} \rangle \quad (1.46)$$

$\langle S_{p_k} \rangle$  et  $\langle S_{p_\epsilon} \rangle$  sont des termes sources correspondant à l'influence des particules sur la turbulence. On renvoie à Collin [Collin, 2006] pour une analyse des modèles et de leur influence sur le calcul. Dans notre cas,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ ,  $C_{1\epsilon}$  et  $C_{2\epsilon}$  sont des constantes du modèle telles que :  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\epsilon = 1, 2$ ;  $C_{1\epsilon} = 1, 44$  et  $C_{2\epsilon} = 1, 99$ .

La viscosité turbulente  $\mu_t$  est déterminée de la manière suivante :

$$\mu_t = \rho_f C_\mu \frac{k_f^2}{\epsilon_f} \quad (1.47)$$

avec  $C_\mu = 0,09$ .

### Bilan sur l'énergie

Le champ de température de la phase continue est déterminé grâce à l'équation de transport de l'énergie, équation faisant intervenir à la fois les transferts de chaleur par convection, par diffusion et les échanges entre phases. Elle est définie de la manière suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \langle U_{fj} \rangle \langle T_f \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu_f}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \langle T_f \rangle}{\partial x_j} \right] + S_T \quad (1.48)$$

avec :

$$S_T = \frac{\langle S_{pT} \rangle}{C_{p_f}} \quad (1.49)$$

$\langle S_{pT} \rangle$  est un terme source issu des échanges de chaleur avec la phase dispersée. On pourrait ajouter si nécessaire un terme source radiatif. Dans les applications qui suivent, ce terme n'est pas nécessaire car, étant loin de la source de rayonnement, les flux de chaleur incidents mis en jeu n'engendrent pas de terme source d'énergie significatif.

### Bilan sur la vapeur d'eau

Le champ d'humidité absolue de la phase continue est connu par la résolution de l'équation de transport de la vapeur d'eau formulée de la manière suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_f \langle U_{fj} \rangle \langle Y_f \rangle) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( C_{diff} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \langle Y_f \rangle}{\partial x_j} \right] + \langle S_m \rangle \quad (1.50)$$

$\langle S_m \rangle$  est le terme source provenant de l'évaporation des gouttes lié à  $\dot{m}_{\text{évap}}$  vue dans l'équation 1.11. Le nombre de Schmidt turbulent  $Sc_t$  est considéré égal à 1.

### 1.3.2 Résolution des équations de bilan par la méthode des volumes finis

L'ensemble des équations utilisées dans la simulation eulérienne de l'air environnant le spray est résolu par la méthode des volumes finis. La mise en forme générale des équations de transport (1.39) permet de développer une discrétisation de la forme :

$$a_p \phi_p = \sum_{\text{pts voisins}} a_i \phi_i + b \quad (1.51)$$

où  $\phi_p$  représente la grandeur calculée dans la cellule entourant le point P, b le terme source et  $a_p$  et  $a_i$  respectivement les coefficients associés à  $\phi_p$  et  $\phi_i$ . Le principe des volumes finis consiste donc à déterminer le terme  $\phi_p$  en connaissant les termes  $\phi_i$  de ses proches voisins. Pour évaluer les termes de convection, plusieurs schémas de discrétisations sont implémentés dans le code tels que le schéma Upwind, le schéma Power Law, le schéma exponentiel ou le schéma Quick. Pour des raisons de stabilité, nous utiliserons dans notre simulation le schéma Upwind 1<sup>er</sup> ordre.

En ce qui concerne la détermination de la pression, nous utiliserons un schéma de type

SIMPLE.

Le balayage de l'ensemble des cellules de notre maillage suit un algorithme de type TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm).

L'utilisation de la méthode des volumes finis dans notre simulation est très largement inspirée des travaux de Patankar [Patankar, 1980] et Versteeg [Versteeg et Malalasekera, 1998].

### 1.3.3 Conditions aux limites

Proche des parois, les caractéristiques moyennes de l'écoulement varient considérablement. Une modélisation correcte de ces zones nécessite un resserrement du maillage dans celles-ci et ainsi un nombre de mailles conséquent. Pour des raisons de temps de calcul qui deviendraient beaucoup trop élevés, des lois de parois, dont le formalisme est repris des travaux de Versteeg et Malalasekera [Versteeg et Malalasekera, 1998], sont utilisées et permettent de ne pas effectuer le calcul en utilisant les équations classiques en proche paroi.

L'utilisation de lois de parois commence par la détermination de la distance à la paroi adimensionnelle  $y^+$  :

$$y^+ = \frac{\Delta y_P}{\nu_f} \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_f}} \quad (1.52)$$

avec  $\Delta y_P$  représentant la distance entre la paroi et le centre P de la 1<sup>ère</sup> cellule du maillage et  $\tau_w$  la contrainte à la paroi.

On écrit alors une loi de paroi dite standard donnant la vitesse  $u^+$  et la température  $T^+$  selon les relations suivantes :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa_{VK}} \ln(E y^+) \quad (1.53)$$

où la constante de Von Karman vaut  $\kappa_{VK} = 0,4178$  et où E est une constante d'intégration dépendant de la rugosité des parois qui vaut en général 9,793.

$$T^+ = Pr_t \left[ u^+ + P \left( \frac{Pr_l}{Pr_t} \right) \right] \quad (1.54)$$

où  $Pr_t$  et  $Pr_l$  sont respectivement les nombres de Prandtl turbulent et laminaire. La fonction  $P \left( \frac{Pr_l}{Pr_t} \right)$  est définie par l'équation :

$$P \left( \frac{Pr_l}{Pr_t} \right) = 9,24 \left[ \left( \frac{Pr_l}{Pr_t} \right)^{0,75} - 1 \right] \left[ 1 + 0,28 \exp \left( -0,007 \left( \frac{Pr_l}{Pr_t} \right) \right) \right] \quad (1.55)$$

L'énergie cinétique turbulente en proche paroi  $k_{f_P}$  se détermine par résolution d'une équation de transport intégrant un terme source modifié :

$$S_{k_P} = \left( \tau_w \langle U_P \rangle - \rho_f C_\mu^{\frac{3}{4}} k_{f_P}^{\frac{3}{4}} u^+ \right) \frac{\nu_{f_{cellule}}}{\Delta y_P} \quad (1.56)$$

où  $\langle U_P \rangle$  est la vitesse tangentielle à la paroi au point P du maillage et  $\tau_w$  est défini par :

$$\tau_w = \mu \frac{\langle U_P \rangle}{\Delta y_P} \quad (1.57)$$

Le taux de dissipation visqueuse en proche paroi  $\epsilon_{f_P}$  est défini en fonction de  $k_{f_P}$  par :

$$\epsilon_{f_P} = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k_{f_P}^{\frac{3}{2}}}{\kappa_{VK} \Delta y_P} \quad (1.58)$$

Une humidité fixe est imposée à la paroi. L'explication vient du fait qu'un spray en conditions réelles n'est jamais utilisé dans une enceinte parfaitement étanche, ce qui a comme conséquence un renouvellement permanent d'air laissant supposer que l'on garde des conditions d'humidité stables aux bords du domaine.

## 1.4 Couplage entre simulation lagrangienne et eulérienne

Un couplage fort existe entre le suivi lagrangien et la simulation eulérienne. En effet, la phase dispersée influence le calcul de la phase continue par l'intermédiaire de termes sources dans les équations de transport de la simulation eulérienne (voir la section 1.3). En retour, la phase continue agit également sur le calcul de la phase dispersée grâce aux grandeurs moyennes et fluctuantes utilisées dans le suivi des gouttes. Les différents termes sources utilisés sont détaillés lors de ce paragraphe.

Les échanges de quantités de mouvement entre la phase continue et les gouttelettes sont dus à la force de traînée. Le terme source correspondant est donné par la relation :

$$\langle S_{p_{u_i}} \rangle = N \left\langle -m_p \left[ \frac{dV_{p_i}}{dt} - g_i \right] \right\rangle \quad (1.59)$$

où  $N$  est le nombre de particules par unité de volume.

Le terme source déterminant les échanges d'énergie entre la goutte et l'air environnant est donné par :

$$\langle S_{p_T} \rangle = N \left\langle -\dot{m}_{\text{évap}} C_{p_v} \frac{(T_f - T_p)}{B_T} \right\rangle \quad (1.60)$$

La présence de gouttes dans le milieu va générer ou atténuer la turbulence et engendrer une modification de celle-ci. Le terme source d'énergie cinétique turbulente  $\langle S_{p_k} \rangle$  est donné dans les travaux de Sommerfeld [Sommerfeld, 1997] et Boulet [Boulet et Moissette, 2002] par la relation :

$$\langle S_{p_k} \rangle = |\langle S_{p_{u_i}} \rangle (\langle U_{f_i} \rangle - \langle V_{p_i} \rangle)| + \langle s_{p_{u_i}} v_i \rangle \quad (1.61)$$

Le terme source présent dans l'équation de la dissipation visqueuse va s'écrire :

$$\langle S_{p_\epsilon} \rangle = C_{\epsilon_3} \frac{\epsilon_f}{k_f} \langle S_{p_k} \rangle \quad (1.62)$$

où  $C_{\epsilon_3}$  est une constante fixée à 1,87 dans les travaux de Chang [Chang, 1998]. Une étude de sensibilité sur le paramètre  $C_{\epsilon_3}$  a été effectuée dans les travaux de Collin [Collin, 2006].

Le terme source provenant de l'évaporation des gouttes est déterminé par :

$$\langle S_m \rangle = N \langle -\dot{m}_{\text{évap}} \rangle \quad (1.63)$$

## 1.5 Convergence des résultats sur le code de simulation dynamique

En pratique, le code de simulation numérique sur la dynamique du spray suit un processus itératif. Un suivi lagrangien de  $N_g$  gouttes est d'abord réalisé (les gouttes pouvant être réparties sur plusieurs classes pour une polydispersion) nous fournissant des informations sur les propriétés moyennes des particules. Ce suivi va engendrer des termes sources qui vont être intégrés dans les équations de la partie eulérienne. Cette simulation eulérienne résout l'ensemble des champs (vitesse, pression, énergie cinétique turbulente, dissipation visqueuse, température, humidité) caractérisant la phase continue de notre milieu (air environnant). Si la convergence des résultats n'est pas atteinte, cette démarche est de nouveau lancée (nouveau suivi lagrangien puis simulation eulérienne).

La convergence des résultats est d'abord basée sur un calcul de résidus sur l'ensemble des caractéristiques du spray. Des points stratégiques au sein du maillage sont également choisis (plus particulièrement dans l'axe central du spray) et les évolutions de tous les paramètres du spray sont visualisées. La convergence est considérée atteinte lorsque ces paramètres ne varient plus après plusieurs cycles complets eulérien-lagrangien. Pour de plus amples informations, on se référera à la section 3.2 du chapitre 3 des travaux de Collin [Collin, 2006].

Ce chapitre a permis de décrire le code de calcul amenant à la modélisation numérique d'un rideau d'eau. Ce couplage eulérien-lagrangien produit une simulation complète de la dynamique du spray en caractérisant à la fois le suivi des particules de la pulvérisation et l'écoulement de l'air environnant. Il reste dès lors à présenter le code de simulation des transferts radiatifs à travers le spray, ce qui permettra d'obtenir une modélisation complète d'un système de protection contre le rayonnement thermique issu d'une forte source de chaleur. Avant cela, une annexe présente les aspects dynamiques spécifiques à la stratégie de pulvérisation impactante.



# Annexe A - Aspects spécifiques liés aux sprays impactants

Avant de rentrer dans les aspects spécifiques à la stratégie de pulvérisation impactante, il faut souligner qu'il est difficile de connaître les régimes d'interaction se produisant entre une goutte et une paroi sans passer par des essais expérimentaux. Par ailleurs, les travaux réalisés à ce sujet ont pour principal objectif de comprendre les différents régimes d'impact afin de prévoir le résultat du processus. Beaucoup de paramètres entrent en ligne de compte et rendent alors complexe la prédiction du régime d'impact d'une goutte. Du fait d'une fraction volumique faible au sein du rideau, on suppose que les gouttes vont impacter la paroi à protéger de manière indépendante. Par conséquent, l'étude d'impact de gouttes seules sur une paroi est alors utile pour connaître les régimes se produisant. Par ailleurs, signalons qu'il est possible qu'un film liquide ruisselant sur la paroi se forme suite aux multiples impacts de gouttes. De manière globale, cette partie fournit uniquement les informations spécifiques à nos conditions d'utilisation du spray impactant (paroi lisse à température ambiante). Une bibliographie couvrant l'ensemble des propriétés des régimes d'impact est fournie dans les travaux de Dewitte [Dewitte, 2006].

## A.1. Différents régimes d'impact de gouttes sur paroi froide sèche ou mouillée

Au contact d'une goutte avec une paroi froide (sèche ou mouillée par la présence d'un film liquide), plusieurs régimes d'impact peuvent se produire. Soit la goutte se dépose, soit elle rebondit ou soit elle suit un régime de splashing. Les travaux de Rein [Rein, 1993] détaillent l'ensemble des régimes d'impact pouvant se produire suivant différentes conditions (présence de film liquide ou non, température de paroi, caractéristiques de la goutte incidente). Signalons que les impacts de gouttes résultent en une perte de quantité de mouvement par dissipation interne au moment du contact avec la paroi.

Pour avoir présence de dépôt (figure 1), il faut que l'énergie au moment de l'impact soit faible. La goutte s'étale alors sur la paroi. Lorsque le phénomène de dépôt est important, un film liquide se crée sur la paroi ciblée. Dans le cas d'une surface d'impact mouillée, le dépôt peut également se produire avec le mélange de la goutte au film liquide déjà existant.

La goutte peut également rebondir sur la paroi d'impact. Le principe du rebond (figure 2) se déroule comme suit : au moment du contact avec la paroi, la goutte va évidemment perdre de l'énergie et s'étaler sur cette dernière. Si la particule incidente conserve suffisamment d'énergie, elle peut se reformer et quitter la paroi. Signalons toutefois que le phénomène de rebond, que ce soit avec ou sans film liquide, se produit essentiellement pour des impacts rasants.

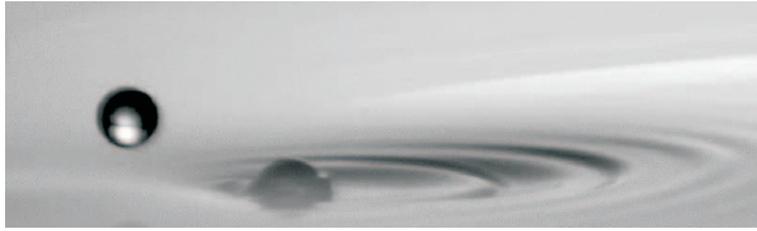


FIGURE 1 – Dépôt de goutte sur un film résiduel [Le Clercq, 2000]

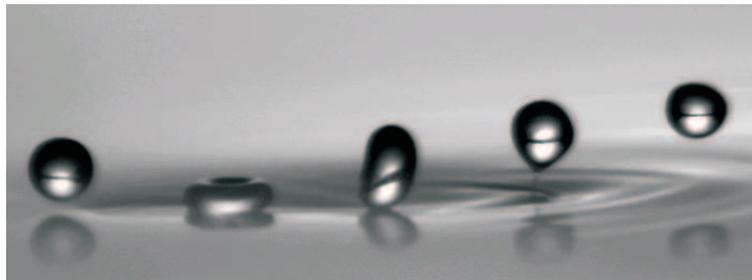


FIGURE 2 – Rebond de gouttes sur film liquide [Le Clercq, 2000]

Le dernier régime pouvant se dérouler sur paroi froide (sèche ou humide) est le splashing (figure 3). Au contact avec la surface d'impact, une partie de la goutte va alors éclater en plusieurs petites particules secondaires. L'autre partie va se déposer sur la paroi ou s'intégrer au film liquide déjà existant. Dans le cas d'une paroi mouillée, on peut voir l'apparition d'une couronne précédant l'éclatement de la goutte. Ce processus se déroule en général pour des énergies d'impact élevées. Ce phénomène complexe fait l'objet d'études particulières. On peut citer notamment les travaux de Cossali [Cossali *et al.*, 2002] et Roisman [Roisman et Tropea, 2005] où des caractérisations du régime de splashing sur film liquide sont effectuées. Les propriétés de la couronne et des gouttes secondaires créées y sont largement étudiées (taille et diamètre de la couronne, diamètre des gouttes secondaires).

## A.2. Paramètres influents sur le régime d'impact

Les trois régimes d'impact présentés dans le paragraphe précédent sont influencés par plusieurs paramètres. Le processus se produisant au contact d'une goutte sur une paroi dépend à la fois des caractéristiques de l'impact, des propriétés du liquide ainsi que des propriétés de la surface d'impact.

En ce qui concerne les caractéristiques de l'impact, le régime se déroulant va dépendre de la vitesse et du diamètre des gouttes ainsi que de l'angle d'incidence. De manière générale, une augmentation de la vitesse (composante normale à la paroi) a tendance à favoriser le régime de splashing comme cela a été observé dans les études de Rioboo [Rioboo *et al.*, 2001]. L'angle d'incidence est défini par rapport à la normale à la paroi (c'est-à-dire qu'un angle de  $0^\circ$  va correspondre à un impact suivant une direction normale à la surface). Plus l'angle va être important,

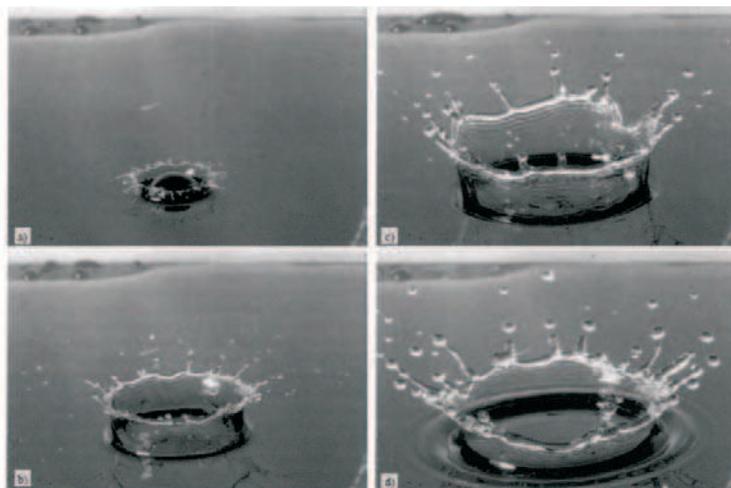


FIGURE 3 – Régime de splashing obtenu sur film liquide à différents instants. Formation d’une couronne et création de gouttes secondaires [Cossali *et al.*, 1997], [Gueyffier, 2000]

plus l’impact va être rasant. Une augmentation de cet angle va avoir tendance à diminuer la quantité de mouvement. Ce phénomène va alors favoriser le régime de rebond ou de dépôt. Au contraire, un petit angle (impact normal à la paroi) va plutôt entraîner des régimes de splashing. Par ailleurs, plus le diamètre des gouttes incidentes est grand, plus le régime de splashing est favorisé (l’énergie au moment de l’impact va alors être plus forte).

Le processus d’impact dépend également des propriétés du liquide notamment la tension de surface (qui tend à minimiser la surface d’une goutte et à assurer sa cohésion) et la viscosité (qui génère la perte d’énergie au moment de l’impact). Dans notre cas, le liquide utilisé est de l’eau. Sa tension de surface pour une température de 293 K est de  $0,073 \text{ N.m}^{-1}$ . La viscosité de l’eau à la même température est de  $0,001 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .

Les derniers paramètres influençant le régime d’impact sont les propriétés de la paroi telles que la rugosité de la surface, la mouillabilité, la température de la paroi et la présence de film liquide ou non. Dans les cas étudiés au cours de ces travaux, on suppose que l’impact se déroule à température ambiante sur paroi lisse.

### A.3. Principaux nombres adimensionnels caractérisant l’impact de goutte

De nombreux auteurs ont introduit dans la littérature des lois de similitude permettant de relier les essais expérimentaux aux cas réels (les principaux modèles numériques caractérisant les régimes d’impact de gouttes isolées sont donnés dans la section suivante). Ces lois font intervenir plusieurs nombres sans dimension définis au cours de ce paragraphe et permettent de délimiter les différents régimes d’impact.

Le nombre de Weber ( $We$ ) caractérise le rapport entre les forces d’inertie et les forces de tension surfacique de la goutte. Il se définit par la relation :

$$We = \frac{\rho_p d_p V_p^2}{\sigma_s} \quad (1)$$

où  $\rho_p$ ,  $d_p$ ,  $V_p$  correspondent respectivement à la masse volumique, le diamètre et la vitesse de la particule et  $\sigma_s$  représente la tension de surface du liquide.

Le nombre de Reynolds (Re) représente le rapport entre les forces dynamiques et les forces de viscosité exercées sur la goutte. Il permet de caractériser l'écoulement au niveau de la goutte et se traduit suivant :

$$Re = \frac{\rho_p d_p V_p}{\mu_p} \quad (2)$$

où  $\mu_p$  définit la viscosité dynamique du liquide.

Le nombre d'Ohnesorge (Oh) permet de caractériser l'effet des forces de tension superficielle par rapport aux forces de viscosité. Celui-ci se définit comme suit grâce au nombre de Reynolds et au nombre de Weber :

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (3)$$

Si le régime d'impact des gouttes sur la paroi engendre la formation d'un film liquide, l'épaisseur de film adimensionnée est donnée par la relation :

$$\delta = \frac{e}{d_p} \quad (4)$$

où  $e$  représente l'épaisseur du film liquide.

Le paramètre de Sommerfeld (K) fait intervenir à la fois les propriétés physiques du liquide et les principales caractéristiques de l'impact. C'est une combinaison de nombres adimensionnés précédemment cités :

$$K = Oh Re^{1,25} \quad (5)$$

Le nombre de Walzel  $K'$  permet lui aussi de déterminer les frontières entre les différents régimes d'impact. Ce dernier se définit par :

$$K' = We Oh^{-0,4} \quad (6)$$

## A.4. Principaux modèles numériques caractérisant les limites des régimes d'impact

Différents modèles d'impact de gouttes isolées sont exposés dans la littérature. Ils sont basés sur des essais expérimentaux et utilisent les nombres adimensionnés définis dans le paragraphe précédent. Les relations établies permettent de délimiter les différents régimes d'impact. Le but de cette section est alors de fournir les principales relations satisfaisant à nos conditions d'utilisation (présence de film liquide ou non, paroi lisse, paroi à la température ambiante). Pour les détails concernant des impacts de gouttes selon d'autres conditions, on renvoie aux travaux de

Dewitte [Dewitte, 2006] qui a proposé une bibliographie complète sur l’impact de gouttes.

Le paramètre de Sommerfeld (équation 5) a été introduit dans les travaux de Mundo [Mundo *et al.*, 1995], [Mundo *et al.*, 1997] et a permis d’établir une limite entre le régime de dépôt et le régime de splashing pour une goutte impactant une paroi froide et sèche. Des essais expérimentaux ont été effectués avec des gouttes d’eau et d’éthanol avec un diamètre variant entre 50 et 150  $\mu\text{m}$  (dans nos cas d’étude, on se situe donc bien dans le même ordre de grandeur au niveau des diamètres de gouttes). Par ailleurs, Hörter [Hörter, 1996] a défini une limite entre le régime de dépôt et le régime de rebond, toujours en se basant sur le paramètre de Sommerfeld. La classification des régimes d’impact obtenus est donnée dans le tableau 1.

Rebond	Dépôt	Splashing
$K < 3$	$3 \leq K \leq 57,7$	$K > 57,7$

TABLE 1 – Limites entre les différents régimes d’impact de gouttes sur paroi froide et sèche [Mundo *et al.*, 1995], [Hörter, 1996]

Concernant l’impact sur film liquide sur paroi froide, Cossali [Cossali *et al.*, 1997] propose une corrélation basée sur le paramètre  $K'$  pour délimiter la limite entre dépôt et splashing. Cette limite est donnée par la relation suivante et fait également intervenir l’épaisseur de film adimensionnée (équation 4).

$$K'_{\text{limite}} = 2100 + 5880 \delta^{1,44} \quad (7)$$

Pour un paramètre  $K'$  situé en-dessous de cette limite, le régime de dépôt se produit. En revanche, si  $K'$  est au-dessus, c’est le régime de splashing qui va avoir lieu. Cette corrélation est utilisée plus loin dans le paragraphe 5.3.2 pour évaluer quel régime se produit suivant nos conditions d’impact (vitesse de gouttes, angle d’impact, épaisseur de film liquide).

Plusieurs autres corrélations existent dans la littérature. Faisant intervenir des paramètres qui ne sont pas pris en compte dans nos cas d’étude (rugosité de la paroi par exemple), ces relations ne sont pas détaillées dans ce document. Pour des informations complémentaires, on renvoie alors aux différents travaux cités.

Les travaux de Bai [Bai et Gosman, 1995], Cossali [Cossali *et al.*, 1997] ou Sikalo [Sikalo *et al.*, 2002] se sont concentrés sur des impacts de gouttes sur paroi rugueuse. Ils ont alors permis d’établir des corrélations définissant les différents régimes d’impact en prenant en compte la rugosité de la paroi. Notons que de manière générale ces études sont effectuées sur paroi sèche et mouillée. Par ailleurs, Stanton [Stanton et Rutland, 1996] propose des limites de régimes d’impact basées sur le nombre de Weber. La particularité est que ces limites font intervenir une fréquence d’impact de gouttes  $f$ . Les régimes définis par cette relation sont le rebond, le dépôt, l’étalement et le splashing. Nous pouvons également citer les travaux récents de Weiss [Weiss, 2005] qui ont porté sur les impacts de gouttes sur film liquide.



## Chapitre 2

# Transferts radiatifs à travers le spray

Après convergence du code de calcul portant sur la simulation de la dynamique du spray, les transferts radiatifs à travers le milieu semi-transparent peuvent être évalués grâce à la seconde partie du code de calcul : QUETSCHES, mis en place par Collin [Collin, 2006]. Ce découplage des deux codes est rendu possible car le spray, étant étudié dans une application de type bouclier radiatif, est considéré assez loin de la source de rayonnement. De plus, dans la configuration expérimentale, la densité de flux incident est très limitée. De ce fait, la faible énergie absorbée due au rayonnement ne provoque pas de modifications sur les caractéristiques des gouttes et n'a donc aucune influence sur la dynamique du spray. Notons que le code permettrait tout de même de prendre en compte, si besoin est, le couplage entre dynamique et transferts radiatifs par processus itératif. De plus, comme pour le suivi lagrangien, le code radiatif est parallélisé permettant ainsi une convergence plus rapide des résultats.

Dans un premier temps, après récupération des données sur les caractéristiques de notre milieu issues du couplage eulérien-lagrangien, les propriétés radiatives spectrales de la pulvérisation peuvent être déterminées. La théorie de Mie est utilisée pour calculer les coefficients d'absorption et de diffusion des gouttes et la fonction de phase, alors que le modèle C-k permet de connaître les coefficients d'absorption de la phase gazeuse.

Puis, la simulation des transferts radiatifs à travers un spray est réalisée par la méthode de Monte-Carlo. Cette technique va nous permettre d'évaluer la capacité d'un spray à être efficace, c'est-à-dire son aptitude à atténuer le rayonnement infrarouge.

La majeure partie du code de calcul a été repris des travaux de Collin [Collin, 2006]. Cependant, des modifications ont été apportées afin d'améliorer les temps de calcul. Cela concerne notamment la mise en place d'un critère de convergence basé sur la variance, une nouvelle discrétisation spectrale pour les propriétés radiatives et une définition des zones d'émission et de réception du rayonnement différentes permettant maintenant, entre autres, de s'adapter parfaitement aux surfaces utilisées au niveau expérimental.

### 2.1 Détermination des propriétés radiatives du milieu

Le milieu considéré est un écoulement diphasique où l'air est entraîné par les gouttelettes d'eau. Au niveau des transferts radiatifs, les gouttes sont responsables de l'ensemble de la dif-

fusion, dont la caractéristique est d'être fortement anisotrope vers l'avant, c'est-à-dire dans la direction du rayonnement incident, et d'une partie du phénomène d'absorption. L'autre partie de l'absorption est due aux gaz, principalement de la vapeur d'eau. Signalons que l'émission propre du milieu n'est pas prise en compte dans notre étude. En effet, la zone de spray ayant une température proche de la température ambiante, son émission est négligeable devant celle de la source de rayonnement utilisée [Collin, 2006].

### 2.1.1 Propriétés radiatives des gouttes

La théorie de Mie, reprise selon le formalisme donné dans l'ouvrage de Modest [Modest, 1993] (on peut également citer en ce qui concerne la théorie de Mie les travaux de Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983]), permet de déterminer les propriétés radiatives spectrales des gouttelettes d'eau injectées, supposées parfaitement sphériques. Le coefficient spectral d'absorption  $\kappa_\lambda$ , le coefficient spectral de diffusion  $\sigma_\lambda$  et la fonction de phase  $P_\lambda$  permettent de rendre compte des phénomènes d'interaction entre la particule et le rayonnement incident. Ces différents coefficients vont dépendre de plusieurs paramètres : l'indice optique complexe relatif, le paramètre de taille et la direction de propagation du rayonnement diffusé.

L'indice optique complexe relatif  $m$  est une donnée sur la composition du milieu semi-transparent, telle que :

$$m = \frac{n^*}{n_0} \quad (2.1)$$

où  $n_0$  correspond à l'indice du milieu environnant la particule et  $n^*$  est l'indice complexe de réfraction du milieu (l'eau ici) défini par :

$$n^* = n - ik \quad (2.2)$$

avec  $n$  l'indice de réfraction et  $k$  l'indice d'absorption du milieu, donnés dans les travaux de Hale et Querry [Hale et Querry, 1973].

Le paramètre de taille  $x_p$  s'écrit sous la forme :

$$x_p = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad (2.3)$$

où  $d_p$  est le diamètre de la particule et  $\lambda$  la longueur d'onde du rayonnement.

### Détermination des coefficients d'absorption, de diffusion et d'extinction des gouttes

La première étape dans l'utilisation de la théorie de Mie est la détermination des coefficients de Mie  $a_n$  et  $b_n$ . Différentes relations, proposées notamment dans l'ouvrage de Modest [Modest, 1993] et celui de Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983], existent pour estimer ces coefficients. Dans notre simulation, nous préférons le formalisme de Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983] pour des raisons de stabilité numérique lors de son implémentation :

$$a_n = \frac{\left[ \frac{D_n(m x_p)}{m} + \frac{n}{x_p} \right] \mathcal{R}e[\zeta_n(x_p)] - \mathcal{R}e[\zeta_{n-1}(x_p)]}{\left[ \frac{D_n(m x_p)}{m} + \frac{n}{x_p} \right] \zeta_n(x_p) - \zeta_{n-1}(x_p)} \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{\left[ m D_n (m x_p) + \frac{n}{x_p} \right] \mathcal{R}e [\zeta_n (x_p)] - \mathcal{R}e [\zeta_{n-1} (x_p)]}{\left[ m D_n (m x_p) + \frac{n}{x_p} \right] \zeta_n (x_p) - \zeta_{n-1} (x_p)} \quad (2.5)$$

où  $\mathcal{R}e$  représente la partie réelle du nombre complexe considéré et  $D_n$  la dérivée logarithmique définie par la relation suivante :

$$D_{n-1} (m x_p) = \frac{n}{m x_p} - \frac{1}{D_n (m x_p) + \frac{n}{m x_p}} \quad (2.6)$$

Cette fonction est calculée par récurrence descendante avec comme valeur initiale :

$$D_{n_{max}} = 0 \quad (2.7)$$

$\zeta_n$  est une fonction de Riccati-Bessel définie par relation de récurrence :

$$\zeta_n (x_p) = \frac{(2n - 1)}{x_p} \zeta_{n-1} (x_p) - \zeta_{n-2} (x_p) \quad (2.8)$$

avec comme valeurs initiales :

$$\zeta_0 (x_p) = \sin x_p + i \cos x_p \quad (2.9)$$

et :

$$\zeta_1 (x_p) = \frac{\sin x_p}{x_p} - \cos x_p + i \left( \frac{\cos x_p}{x_p} + \sin x_p \right) \quad (2.10)$$

Les coefficients  $a_n$  et  $b_n$  dépendent des fonctions  $D_n$  et  $\zeta_n$ . Ces coefficients sont donc obtenus par des séries et leurs valeurs tendent théoriquement vers 0 quand  $n$  tend vers  $+\infty$ . Dans la pratique, Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983] proposent une limite basée sur le paramètre de taille  $x_p$  et l'indice optique complexe relatif  $m$ , soit :

$$N_{max} = \max \left[ x_p + 4 x_p^{\frac{1}{3}} + 2, |m x_p| \right] \quad (2.11)$$

De cette manière, un grand nombre de termes est pris en compte dans les différentes séries, les termes restants ne représentant alors qu'une part négligeable. Signalons que la suite  $D_n$  aura pour limite  $n_{max} = N_{max} + 15$ , une limite classique garantissant la stabilité numérique de la solution.

La connaissance des coefficients de Mie va nous permettre d'évaluer les facteurs d'efficacité d'extinction, de diffusion et d'absorption qui sont directement reliés aux propriétés radiatives recherchées. Les relations définies par Kerker [Kerker, 1969] donnent ces efficacités sous forme de séries de la façon suivante :

$$Q_{\lambda_{ext}} (d_p) = \frac{2}{x_p^2} \sum_{n=1}^{N_{max}} (2n + 1) \mathcal{R}e [a_n + b_n] \quad (2.12)$$

$$Q_{\lambda_{diff}} (d_p) = \frac{2}{x_p^2} \sum_{n=1}^{N_{max}} (2n + 1) \left[ |a_n|^2 + |b_n|^2 \right] \quad (2.13)$$

$$Q_{\lambda_{abs}} (d_p) = Q_{\lambda_{ext}} (d_p) - Q_{\lambda_{diff}} (d_p) \quad (2.14)$$

Nous pouvons à présent déterminer les propriétés radiatives d'un spray constitué d'un ensemble de gouttes. Pour ce faire, nous nous plaçons dans le cas d'une diffusion indépendante, c'est-à-dire que la diffusion d'une particule n'est pas influencée par les particules se situant autour. La fraction volumique dans le milieu est faible (toujours inférieure à  $10^{-2}$  m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> d'air). La gamme de paramètres de taille (équation 2.3) dans notre cas se situe entre 3,1 (obtenu pour une particule de taille 30  $\mu\text{m}$  à une longueur d'onde de 60  $\mu\text{m}$ ) et  $1,9 \cdot 10^3$  (obtenu pour une particule de taille 300  $\mu\text{m}$  à une longueur d'onde de 1  $\mu\text{m}$ ). Au vu de ces valeurs, l'hypothèse utilisée est vérifiée d'après les travaux de Modest (au chapitre 11 de la seconde édition de son ouvrage [Modest, 1993]). Les coefficients spectraux vont alors pouvoir être estimés en sommant les contributions des différentes gouttes de chaque classe de diamètre.

Le coefficient spectral d'absorption  $\kappa_\lambda$  est donné par la relation :

$$\kappa_\lambda = \sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda_{abs}}(d_i) \quad (2.15)$$

Le coefficient spectral de diffusion  $\sigma_\lambda$  est donné par :

$$\sigma_\lambda = \sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda_{diff}}(d_i) \quad (2.16)$$

Le coefficient spectral d'extinction  $\beta_\lambda$  est donné par :

$$\beta_\lambda = \sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} N_i Q_{\lambda_{ext}}(d_i) \quad (2.17)$$

avec  $N_i$  le nombre de particules par unité de volume de diamètre  $d_i$  de la classe considérée et  $N_c$  le nombre total de classes.

### Détermination de la fonction de phase

La fonction de phase pour une particule sphérique est estimée selon la relation proposée par Bohren et Huffman [Bohren et Huffman, 1983] :

$$P_\lambda^{Mie}(d_p, \Theta) = 2 \frac{|S_1(\Theta)|^2 + |S_2(\Theta)|^2}{x_p^2 Q_{\lambda_{diff}}(d_p)} \quad (2.18)$$

Cette fonction spectrale dépend du diamètre de la particule et de l'angle de diffusion  $\Theta$ . Cet angle est formé par la direction du rayon incident et la direction après diffusion de ce même rayon.  $S_1$  et  $S_2$  sont deux fonctions d'amplitudes complexes données par Bohren et Huffman sous la forme :

$$S_1(\Theta) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \pi \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\mu) + b_n \tau_n(\mu)] \quad (2.19)$$

$$S_2(\Theta) = \sum_{n=1}^{N_{\max}} \pi \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\mu) + a_n \tau_n(\mu)] \quad (2.20)$$

où  $\mu = \cos \Theta$ . Les termes  $\pi_n$  et  $\tau_n$  sont deux séries données respectivement par :

$$\pi_n(\mu) = \frac{2n-1}{n-1} \mu \pi_{n-1}(\mu) - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2}(\mu) \quad (2.21)$$

$$\tau_n(\mu) = n \mu \pi_n(\mu) - (n+1) \pi_{n-1}(\mu) \quad (2.22)$$

Les conditions initiales de ces deux séries sont :  $\pi_0 = 0$  et  $\pi_1 = 1$ .

Pour un ensemble de particules, la fonction de phase de Mie va être déterminée selon la relation :

$$P_\lambda^{Mie}(\Theta) = \frac{1}{\sigma_\lambda} \sum_{i=1}^{N_c} \pi \frac{d_i^2}{4} Q_{\lambda_{diff}}(d_i) P_\lambda^{Mie}(d_i, \Theta) N_i \quad (2.23)$$

avec  $N_c$  représentant le nombre de classes considérées dans le cadre d'une polydispersion.

### 2.1.2 Propriétés radiatives des gaz

Les principaux gaz semi-transparents pouvant être présents dans notre milieu sont la vapeur d'eau ( $H_2O_{vap}$ ), engendrée par l'évaporation des gouttelettes d'eau due au fort gradient d'humidité autour de la particule, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère ou le dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone issus éventuellement d'un processus de combustion. Toutefois, étudiant les brouillards d'eau dans une application basée essentiellement sur la protection, les gaz issus de la combustion ne sont pas pris en compte dans notre calcul. La vapeur d'eau est par conséquent le principal gaz responsable d'une partie de l'absorption du rayonnement.

Les propriétés radiatives des gaz proviennent du modèle C-k (Correlated-k) tel que présenté par Soufiani et Taine [Soufiani et Taine, 1997]. Le formalisme du modèle est très largement détaillé dans les travaux de Collin [Collin, 2006]. En pratique, le code de calcul utilise une base de données pour les coefficients d'absorption pré-calculés pour des humidités relatives dans une gamme de 0 à 100%, les coefficients ayant été estimés tous les 10% et étant recalculés par interpolation entre ces valeurs d'humidité.

Pour établir ces bases de données, on définit d'abord la transmittance spectrale selon la relation [Soufiani et Taine, 1997] :

$$Tr_\lambda = \int_0^\infty f(k) \exp(-k u_p) dk \quad (2.24)$$

où  $f(k)$  est une fonction de densité de probabilité du coefficient d'absorption,  $u_p$  est un parcours de pression tel que  $u_p = f_v \text{Pr} \Delta s$  avec  $\Delta s$  l'épaisseur du milieu.

$f(k)$  est donnée par Dembélé [Dembélé, 1998] :

$$f(k) = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\langle k_\lambda \rangle \langle \gamma_\lambda \rangle}{\pi k \langle \delta_\lambda \rangle}} \exp \left[ \frac{\langle \gamma_\lambda \rangle}{\langle \delta_\lambda \rangle} \left( 2 - \frac{k}{\langle k_\lambda \rangle} - \frac{\langle k_\lambda \rangle}{k} \right) \right] \quad (2.25)$$

où  $\langle k_\lambda \rangle$ ,  $\langle \gamma_\lambda \rangle$  et  $\langle \delta_\lambda \rangle$  sont des paramètres de modélisation évalués pour  $H_2O$ ,  $CO_2$  et CO grâce aux travaux de Soufiani et Taine [Soufiani et Taine, 1997]. Les valeurs de  $\langle \delta_\lambda \rangle$  et  $\langle k_\lambda \rangle$  sont données pour différentes températures dans une gamme allant de 300 K à 2900 K avec un pas de

200 K et font également intervenir  $f_{vCO_2}$ ,  $f_{vO_2}$  et  $f_{vH_2O}$  qui correspondent respectivement aux fractions volumiques du dioxyde de carbone, de l'oxygène et de la vapeur d'eau dans l'air.

Pour une certaine fraction volumique de vapeur d'eau  $f_{vH_2O}$ , les taux de présence des autres espèces sont données par [Prétrel, 1997] :

$$f_{vO_2} = 0,209475 \left( 1 - f_{vH_2O} \right) \quad (2.26)$$

$$f_{vCO_2} = 3,22 \cdot 10^{-4} \left( 1 - f_{vH_2O} \right) \quad (2.27)$$

Pour des raisons pratiques, cette fonction  $f(k)$  est plus facile à calculer sous une forme faisant intervenir sa cumulée car cette dernière est une fonction monotone croissante alors que  $f(k)$  est beaucoup plus complexe.

Cette fonction cumulée est notée  $g(k)$  telle que :

$$g(k) = \int_0^k f(k') dk' \quad (2.28)$$

Elle possède les particularités suivantes :

$$g(0) = 0 \quad (2.29)$$

$$g(k \rightarrow \infty) = 1 \quad (2.30)$$

$$\int_0^1 dg = \int_0^\infty f(k) dk \quad (2.31)$$

La transmittance spectrale exprimée en fonction de  $g(k)$  devient alors :

$$Tr_\lambda = \int_0^1 \exp(-k u_p) dg \quad (2.32)$$

Numériquement, cette intégrale est calculée grâce à la relation :

$$Tr_\lambda = \sum_{j=1}^{n_g} w_j \exp(-k_j u_p) dg \quad (2.33)$$

On utilise classiquement une quadrature de Gauss en 7 points, définie dans le tableau 2.1.

$k_j$  est un point de Gauss tel que d'après la relation (2.28) :

$$g_j = \int_0^{k_j} f(k') dk' \quad (2.34)$$

A partir d'une inversion par méthode de Simpson, l'équation 2.34 permet de déterminer les valeurs de  $k_j$ .

Sur la base de ces  $k_j$ , les coefficients d'absorption  $\kappa_j$  sont fournis par la relation :

Points - $g_i$	Poids - $w_i$
0	0,045
0,155405848	0,245
0,45	0,32
0,744594152	0,245
0,9	0,0561111111
0,935505103	0,051248583
0,984494897	0,037640306

TABLE 2.1 – Quadrature de Gauss en 7 points

$$\kappa_{jgaz} = f_{v_{H_2O}} k_{j_{H_2O}} + f_{v_{CO_2}} k_{j_{CO_2}} \quad (2.35)$$

On réalise alors un calcul par poids de Gauss et on obtient au final en moyenne dans la bande spectrale un flux sous la forme :

$$Q_r = \sum_{j=1}^{n_g} w_j Q_{r_j} \quad (2.36)$$

### 2.1.3 Propriétés radiatives du milieu air-gouttelettes

L'hypothèse d'additivité simple entre les contributions de la phase dispersée et de la phase fluide va nous permettre de déterminer les propriétés radiatives du milieu air-gouttelettes selon les relations suivantes :

$$\kappa_j = \kappa_{\lambda_{goutte}} + \kappa_{jgaz} \quad (2.37)$$

$$\sigma_j = \sigma_{\lambda_{goutte}} \quad (2.38)$$

$$\beta_j = \kappa_{\lambda_{goutte}} + \sigma_{\lambda_{goutte}} + \kappa_{jgaz} \quad (2.39)$$

En pratique, ces propriétés radiatives sont des grandeurs définies pour chaque point de Gauss dans chaque bande spectrale. En ce qui concerne la discrétisation spectrale, plusieurs types sont utilisés. Un modèle 367 bandes dont la gamme spectrale s'étend en termes de nombres d'onde de  $150 \text{ cm}^{-1}$  à  $9300 \text{ cm}^{-1}$  avec un pas de  $25 \text{ cm}^{-1}$  va permettre d'obtenir des résultats assez fins mais va augmenter les temps de calcul. Une discrétisation en 43 bandes peut aussi être utilisée avec un découpage spectral moins fin mais elle possède l'avantage de nécessiter des temps de calcul plus courts. Un modèle 71 bandes (tableau 2.2), correspondant à un bon compromis entre temps de calcul et finesse du résultat sera utilisé et provient d'une combinaison des deux discrétisations précédentes. Dans les zones où seules les gouttes sont responsables de l'interaction avec le rayonnement (zones présentant peu de variations des propriétés radiatives sur une large bande de longueurs d'onde), la discrétisation est celle du modèle à 43 bandes alors que dans les bandes de vapeur d'eau (zones présentant de fortes variations des propriétés radiatives sur de courtes bandes de longueurs d'onde), le découpage est celui du modèle 367 bandes.

La validation des différents modèles utilisés et la comparaison avec des données issues de la littérature ont été développées dans les travaux de Collin [Collin, 2006].

Gamme de nombres d'onde [cm <sup>-1</sup> ]	Nombre de bandes	Largeur de bande [cm <sup>-1</sup> ]
687,5 - 1187,5	5	100
1187,5 - 1337,5	1	150
1337,5 - 2062,5	29	25
2062,5 - 2262,5	2	100
2262,5 - 2412,5	1	150
2412,5 - 3412,5	5	200
3412,5 - 3962,5	22	25
3962,5 - 4162,5	1	200
4162,5 - 5662,5	5	300

TABLE 2.2 – Modèle 71 bandes

## 2.2 Méthode de Monte-Carlo

Connaissant à présent les propriétés radiatives du milieu, la simulation des transferts radiatifs à travers le brouillard d'eau peut être entreprise grâce à la méthode de Monte-Carlo dont le formalisme utilisé est inspiré des travaux de Modest [Modest, 1993] et Wong [Wong et Mengüç, 2002]. Dans cette méthode, le rayonnement est modélisé par des paquets d'énergie ou quanta. Après émission, ces quanta sont suivis durant leur parcours dans le milieu semi-transparent où des événements d'absorption et de diffusion modifient leurs caractéristiques (énergie, direction), la propagation s'arrêtant après absorption totale ou sortie du domaine de calcul.

### 2.2.1 Emission de quanta

Les quanta sont lancés aléatoirement à partir d'une surface d'émission dont les caractéristiques (taille, température, matériau) sont choisies par l'utilisateur selon l'application souhaitée. Dès lors, les quanta vont être caractérisés par leur position de départ, leur direction de propagation, leur énergie et leur longueur d'onde. Pour une surface dont la normale est orientée selon l'axe X, la position d'émission pour chaque quantum va être définie aléatoirement selon les relations :

$$y_{\text{émission}} = y_{\text{centre surface}} + (R_y - 0,5) \Delta y \quad (2.40)$$

$$z_{\text{émission}} = z_{\text{centre surface}} + (R_z - 0,5) \Delta z \quad (2.41)$$

où  $(y_{\text{centre surface}}, z_{\text{centre surface}})$  représente la position du centre de la surface d'émission,  $\Delta y$  et  $\Delta z$  les dimensions de cette zone.  $R_y$  et  $R_z$  sont deux nombres aléatoires qui suivent une loi uniforme dans  $[0;1]$ .

La direction d'émission du quantum est caractérisée aléatoirement par deux angles  $\omega_0$  (azimutal) et  $\delta_0$  (polaire), définis d'après les travaux de Collin [Collin, 2006] par :

$$\cos \delta_0 = (1 - R_\delta \sin^2 \delta_{\text{max}})^{\frac{1}{2}} \quad (2.42)$$

$$\omega_0 = 2 \pi R_\omega \quad (2.43)$$

$R_\delta$  et  $R_\omega$  sont deux nombres choisis de manière aléatoire entre 0 et 1. L'angle  $\delta_{max}$  représente l'angle d'ouverture du cône d'émission pour les quanta émis par la surface ( $\frac{\pi}{2}$  dans le cas d'une surface à émission hémisphérique).

Une fois la position et la direction de lancer choisies, une quantité d'énergie est attribuée à chaque quantum. En considérant une zone d'émission de surface  $S_e$ , de température  $T$  et d'émissivité  $\epsilon$  avec une émission réalisée selon une incidence donnée, le flux radiatif spectral va s'écrire :

$$Q_{s_r,\lambda} = S_e \epsilon_\lambda \pi L_\lambda^0(T) \sin^2 \delta_{max} \quad (2.44)$$

$L_\lambda^0(T)$  correspondant à la luminance spectrale du corps noir à la température  $T$  et  $\epsilon$  à l'émissivité de la surface rayonnant.

La puissance portée par un quantum est donc :

$$Q_\lambda = \frac{Q_{s_r,\lambda}}{N_{quanta}} \quad (2.45)$$

où  $N_{quanta}$  est le nombre de quanta lancés.

Notons que l'émission propre du milieu n'intervient pas dans les différentes applications étudiées car elle est négligeable devant le rayonnement engendré par la forte source de chaleur. Par ailleurs, nous nous intéressons seulement aux propriétés de transmission du spray et non à ce qu'il émet.

### 2.2.2 Suivi des quanta

Une fois lancé, le quantum va être suivi durant son parcours dans le milieu étudié. La méthode de Monte-Carlo va nous permettre de connaître son évolution, soumise à des événements d'absorption et de possibles événements de diffusion, jusqu'à la sortie du domaine de calcul ou absorption totale. Dans la littérature, différentes techniques dérivées de cette méthode existent (Modest [Modest, 1993], Wong [Wong et Mengüç, 2002]). La modélisation utilisée dans notre simulation numérique est présentée dans les travaux de Collin [Collin, 2006], référencée MMC2.2.

La distance d'interaction  $S_\sigma$  correspond au chemin parcouru par le quantum sans être diffusé. Cette caractéristique, basée sur le coefficient de diffusion, est estimée, pour un milieu hétérogène, par :

$$R_\sigma = \exp\left(-\int_0^{S_\sigma} \sigma ds\right) \quad (2.46)$$

où  $R_\sigma$  est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

Le phénomène d'absorption du rayonnement est évalué de façon progressive le long du trajet optique pour prendre en compte une éventuelle hétérogénéité des propriétés radiatives dans le milieu. Le calcul s'effectue cellule après cellule dans le maillage numérique. La quantité d'énergie absorbée par le milieu est exprimée par :

$$\Delta Q = \left(\exp\left(-\int_0^{\Delta s} \kappa ds\right) - 1\right) Q_{entrée} \quad (2.47)$$

où  $\Delta s$  représente la distance parcourue par le quantum dans la cellule et  $Q_{\text{entrée}}$  correspond à l'énergie du quantum à l'entrée dans la cellule.

Cette méthode de calcul est appliquée le long de la distance d'interaction jusqu'à un événement de diffusion. La nouvelle direction de propagation du quantum diffusé est définie grâce à deux angles  $\Phi$  et  $\Theta$  (figure 2.1).

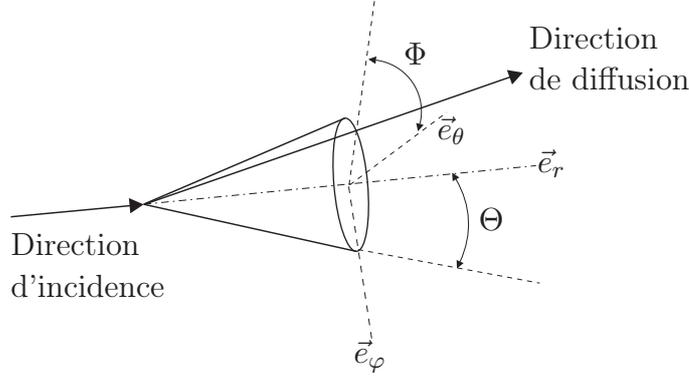


FIGURE 2.1 – Présentation des différents angles de diffusion

L'angle  $\Theta$  est déterminé en tirant aléatoirement au préalable un nombre  $R_\Theta$  (compris entre 0 et 1) et en se basant sur la fonction de phase de Mie cumulée  $P(\Theta)$ . On utilise alors l'équation :

$$R_\Theta = \frac{1}{2} \int_0^\Theta P(\Theta) \sin \Theta d\Theta \quad (2.48)$$

L'évaluation de cet angle va permettre de fixer un cône de diffusion, la direction selon laquelle le quantum est diffusé étant située sur ce cône. Ce dernier est illustré sur le schéma de la figure 2.1. En se basant sur un repère local  $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ , l'angle  $\Phi$  qui détermine une direction unique de diffusion est évalué de manière équiprobable sur le cône de diffusion :

$$\Phi = 2\pi R_\Phi \quad (2.49)$$

où  $R_\Phi$  est un nombre aléatoire compris entre 0 et 1.

La nouvelle direction de propagation va être définie, dans le repère en coordonnées cartésiennes (figure 2.2), par [Collin, 2006] :

$$\vec{\Omega} = A \vec{e}_x + B \vec{e}_y + C \vec{e}_z \quad (2.50)$$

$$A = \cos \Theta \sin \varphi \cos \theta - \sin \Phi \sin \Theta \cos \varphi \cos \theta - \cos \Phi \sin \Theta \sin \theta \quad (2.51)$$

$$B = \cos \Theta \sin \varphi \sin \theta - \sin \Phi \sin \Theta \cos \varphi \sin \theta + \cos \Phi \sin \Theta \cos \theta \quad (2.52)$$

$$C = \cos \Theta \cos \varphi + \sin \Phi \sin \Theta \sin \varphi \quad (2.53)$$

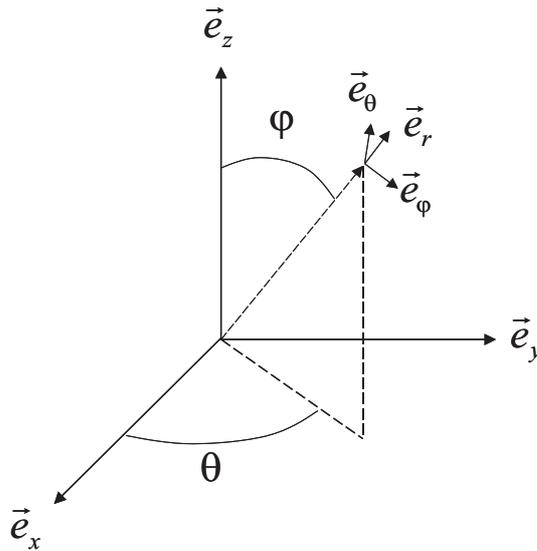


FIGURE 2.2 – Système de référence en coordonnées sphériques

### 2.2.3 Réception de quanta

De la même manière que pour la surface d'émission, la zone de réception des quanta est choisie par l'utilisateur selon l'application souhaitée. L'énergie reçue dans cette zone est enregistrée et le flux spectral reçu en est déduit. La transmission du rayonnement à travers le brouillard d'eau est ensuite évaluée comme le rapport entre le flux reçu en présence de spray et le flux reçu sans spray (dans ce cas, le rayonnement est simulé dans un milieu homogène sans gouttelettes d'eau avec la même configuration géométrique) :

$$Tr = \frac{\text{Flux reçu avec spray}}{\text{Flux reçu sans spray}} \quad (2.54)$$

L'efficacité du spray contre le rayonnement peut également être définie en terme d'atténuation qui n'est autre que le complémentaire à la transmission.

$$At = 1 - Tr \quad (2.55)$$

## 2.3 Convergence du code radiatif

Afin d'améliorer les temps de calcul du code radiatif, un critère de convergence basé sur la variance a été mis en place. Cette nouveauté a permis également d'automatiser la simulation des transferts radiatifs. La précédente démarche au niveau de la convergence consistait à lancer un nombre équivalent de quanta pour chaque longueur d'onde définie dans notre discrétisation spectrale. Dans ce cas, plus le nombre de quanta lancé était important, plus les résultats devenaient précis. Le flux spectral était calculé dans une configuration avec spray et dans une configuration sans spray et on en déduisait alors la transmission. La convergence était ensuite appréciée arbitrairement. Dans le cas où on estimait que la convergence n'était pas atteinte, le double de quanta était relancé pour l'ensemble des longueurs d'onde.

À présent, pour chaque longueur d'onde, un nombre donné de quanta est lancé, on évalue le flux reçu, et c'est un critère statistique basé sur un calcul de variance qui décide de l'arrêt de la

procédure. Dans le cas où ce critère n'est pas satisfait, le double de quanta est à nouveau lancé. Dans le cas contraire, la longueur d'onde suivante est considérée. L'opération se répète jusqu'à étude de la discrétisation spectrale complète. Cette méthode permet donc d'utiliser le code de façon automatique et de baser le calcul des transmissions sur un critère de convergence précis.

Pour une longueur d'onde donnée, chaque processeur va lancer le même nombre de quanta et par conséquent évaluer le flux spectral reçu dans la zone considérée. La variance est calculée sur le flux spectral obtenu par chacun des processeurs (rappelons que le code de calcul est parallélisé) selon le formalisme suivant :

$$Var_{\phi} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \phi_i^2 - \left[ \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \phi_i \right]^2 \quad (2.56)$$

où  $\phi$  représente le flux spectral obtenu et  $N_p$  le nombre de processeurs.

Finalement, la convergence sera établie lorsque le coefficient de variation, défini par l'équation 2.57, sera inférieur à 1 %.

$$C_v = \frac{\sqrt{Var_{\phi}}}{\bar{\phi}} \quad (2.57)$$

où :

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \phi_i}{N_p} \quad (2.58)$$

Une fois la convergence atteinte et les flux radiatifs spectraux obtenus avec et sans spray, l'efficacité des différentes configurations simulées peut être estimée en comparant les transmissions ou atténuations spectrales obtenues.

Nous venons de décrire au cours de ce chapitre les diverses étapes permettant une modélisation complète des transferts radiatifs à travers un rideau d'eau (le code de calcul concernant la dynamique du spray est fourni dans le chapitre 1). Dès lors, nous pouvons estimer la capacité d'atténuation du rayonnement de divers systèmes de brouillards d'eau. L'annexe qui suit présente différentes études de sensibilité portant sur plusieurs aspects de la modélisation numérique.

# Annexe B - Ordres de grandeur et étude de sensibilité numérique

Ce chapitre est consacré à une étude de sensibilité numérique et d'ordres de grandeur sur plusieurs paramètres clés influençant la modélisation du rideau d'eau et des transferts radiatifs à travers celui-ci. Il s'agit de quantifier l'influence de certains paramètres sur les résultats obtenus au niveau de la transmission du rayonnement. Les niveaux d'atténuation atteints ne sont pas vraiment analysés ; seule la différence entre les résultats obtenus pour des configurations faisant varier ces paramètres numériques sensibles est discutée (tous les phénomènes dynamiques mis en jeu dans le rideau d'eau et leurs influences sur la capacité d'atténuation de ce dernier sont largement détaillés dans la deuxième partie de ces travaux consacrée à l'étude de cas).

Il est important de signaler que dans les travaux de Collin [Collin, 2006], des études de sensibilité sur des paramètres différents de ce même code de calcul ont déjà été réalisées. Pour une configuration de spray seul en injection descendante, ces travaux ont montré que des variations modérées du débit (de l'ordre de 5 %) influencent peu la capacité d'atténuation du rideau. En ce qui concerne le diamètre moyen de la distribution granulométrique, les conclusions sont identiques puisqu'une variation de l'ordre de 5 % ne provoque qu'une évolution de la transmittance de 1 %. Par ailleurs, dans le cadre de ces études, il a été établi qu'il n'était pas possible de modéliser un spray en ne considérant qu'une seule taille de gouttes, l'influence de la polydispersion sur la capacité d'atténuation du rideau n'étant pas négligeable (avec une sous-estimation de la transmission de l'ordre de 5 % dans le cas d'une monodispersion). Par ailleurs, dans le cas d'un rideau polydispersé, une évolution du diamètre existe en fonction de la position dans le rideau, variation qui ne peut évidemment pas être prise en considération dans une dynamique monodisperse.

Les études de sensibilité réalisées dans le cadre de ce travail vont permettre dans un premier temps de déterminer s'il est concevable de modifier certains paramètres du code dans une optique de réduction des temps de calcul. On pense notamment au critère de convergence du code radiatif ou encore à la diminution de l'angle d'émission des quanta. Cette dernière investigation permettrait de s'affranchir d'une émission hémisphérique plus coûteuse en temps de simulation. Dans un deuxième temps, les paramètres dynamiques intéressants (à savoir fraction volumique et diamètre) font l'objet de variations afin d'estimer leur influence sur la capacité d'atténuation du milieu. Les influences de l'ensemble des paramètres étudiés sont évaluées en termes de transmittances du rayonnement à travers un rideau.

## B.1. Etude de sensibilité sur la partie radiative du code de calcul

### B.1.1. Variation du critère de convergence du code radiatif

La mise en place d'un critère de convergence au niveau du code de calcul radiatif (paragraphe 2.3) nécessite une étude de sensibilité sur celui-ci afin de déterminer la valeur optimale à lui attribuer. En effet, diminuer ce paramètre va engendrer une meilleure finesse des résultats mais en contrepartie un temps de calcul plus important pour atteindre la convergence. D'un autre côté, l'augmenter va réduire le temps de simulation mais offrira une plus grande incertitude sur les résultats. L'objectif est alors de trouver un compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

Pour ce faire, ce critère de convergence est analysé dans une configuration de pulvérisations descendantes en rampe (association de tuyères d'injection). Lors de cette étude, les paramètres numériques utilisés pour la modélisation de la dynamique du rideau et des transferts radiatifs à travers celui-ci ont peu d'importance à partir du moment où ceux-ci sont équivalents dans l'ensemble des cas considérés (ils sont exposés plus loin dans la section 5.1 consacrée aux rampes en injection descendante). Seul le critère de convergence du code radiatif varie. Notons que l'émission et la réception du rayonnement sont hémisphériques. La transmittance s'obtient par le quotient du flux reçu calculé en présence du rideau et du flux calculé sans spray. Le critère de convergence est alors fixé successivement à 0,5 % ; 1 % ; 2 % et 5 % pour le calcul de chacun des flux. Ce critère est basé sur une variance sur le nombre de processeurs utilisés (dans la parallélisation) comme expliqué au paragraphe 2.3.

La figure 1 présente les évolutions de la transmittance du rayonnement obtenue à une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$  (une valeur représentative comme nous le verrons plus loin) en fonction de la hauteur dans le domaine pour diverses valeurs du critère de convergence. De façon évidente, la précision des résultats est mauvaise pour un paramètre de 5 %, comme le montrent les nombreuses variations de la courbe de transmittance (en comparaison avec les autres cas d'étude). En revanche, dans les trois autres situations, les résultats sont assez proches les uns des autres. Pour compléter cette observation à une seule longueur d'onde ( $5 \mu\text{m}$ ), la figure 2 donne l'évolution des transmittances spectrales en fonction du nombre d'onde pour les mêmes simulations radiatives (les courbes de transmittances sont obtenues à une position donnée du domaine, identique pour toutes les configurations). Les observations sont similaires à celles établies pour la transmittance à  $5 \mu\text{m}$ . Le critère de convergence à 5 % n'est pas satisfaisant au niveau de la précision des résultats pour être utilisé dans les simulations numériques. Pour les trois autres cas, les valeurs calculées sont toujours très proches. Toutefois, de légères différences sont à constater pour un critère de convergence de 2 % (en comparant aux autres courbes) pour les grands nombres d'onde (petites longueurs d'onde) et petits nombres d'onde (grandes longueurs d'onde). Par conséquent, le choix s'oriente vers un critère de convergence de 1 % sur le calcul de flux spectral. On s'assure ainsi d'une bonne finesse des résultats sans pour autant augmenter considérablement les temps de simulation.

Les transmittances totales des cas considérés sont calculées à partir des transmittances spectrales précédentes par une moyenne de Planck (définie plus loin par l'équation 3.2) et sont répertoriées dans le tableau 1. On remarque alors qu'une variation du critère de convergence sur le flux (de 0,5 % à 5 %) n'engendre aucune différence sur les transmissions totales (au millième près), contrairement aux valeurs spectrales. Cette similitude est due à l'utilisation de la méthode

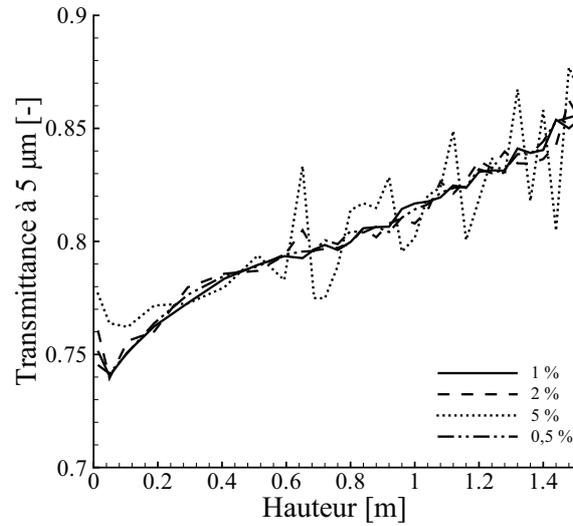


FIGURE 1 – Evolution de la transmittance à 5  $\mu\text{m}$  en fonction de la hauteur pour des simulations radiatives présentant des critères de convergence différents

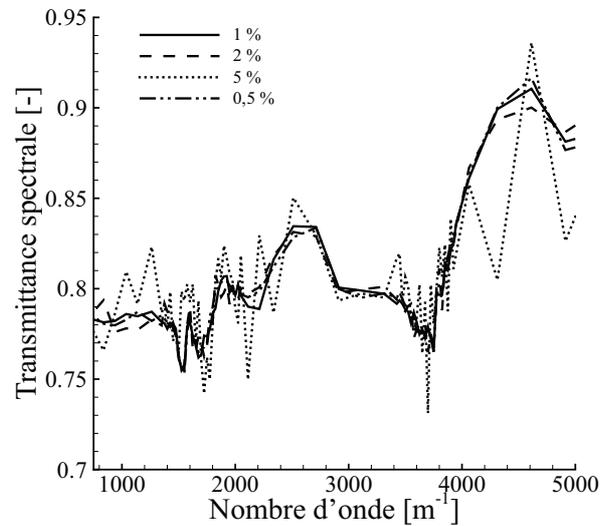


FIGURE 2 – Evolution de la transmittance spectrale pour des simulations radiatives présentant des critères de convergence différents

de Monte-Carlo. En effet, un des avantages est qu'elle encadre tout de suite la solution correctement. La diminution du critère de convergence (engendrant une augmentation du nombre de quanta lancés) permet juste de resserrer l'intervalle de confiance. Par conséquent, le critère de convergence ne doit pas forcément être le même dans tous les cas d'étude (suivant que l'on souhaite une transmittance spectrale ou totale).

$C_v$ [-]	0,5 %	1 %	2 %	5 %
Tr [-]	0,808	0,808	0,808	0,808

TABLE 1 – Transmittances totales obtenues suite à une variation du critère de convergence du code radiatif

### B.1.2. Variation de l'angle d'émission des quanta

L'influence de l'angle d'émission des quanta est évaluée dans le cadre d'un scénario radiatif ressemblant à la configuration expérimentale (le dispositif est détaillé plus loin dans le chapitre 3). Pour cette étude, il est juste nécessaire de savoir que les dimensions des surfaces d'émission et de réception sont identiques à celles utilisées dans le banc expérimental (corps noir de dimensions 30 cm x 35 cm pour la source radiative et spectromètre dont la zone de réception correspond à un disque de 2,2 cm de diamètre). Les sprays sont de dimensions finies. Au vu des dimensions réduites, il est par conséquent légitime de penser qu'une limitation de l'angle d'émission des quanta est possible. Cet angle devrait correspondre à l'angle limite permettant au quanta d'atteindre la zone de rideau (au-delà de cet angle, les quanta ne pouvant pas atteindre la zone de spray ne peuvent donc plus être diffusés et n'ont alors aucune chance d'atteindre la cible située en face). Deux cas d'étude sont mis en avant dans cette section : une configuration en spray unique et une configuration en rampe. Pour les deux systèmes considérés, les surfaces d'émission et de réception sont placées à 80 cm du point d'injection. Pour chacun des cas, les caractéristiques (radiatives et dynamiques) sont gardées identiques et le seul paramètre qui varie est l'angle d'émission des quanta.

Les transmittances (à une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$ ) calculées dans le cas du spray unique sont reportées dans le tableau 2. On remarque qu'à partir d'un angle de  $20^\circ$ , la transmittance n'évolue quasiment plus (par ailleurs si on calcule l'angle limite à partir duquel les quanta n'atteignent plus la zone de spray, celui-ci vaut environ  $18^\circ$  dans le cas d'un spray unique typique de nos cas d'étude). Par conséquent, une réduction de l'angle d'émission est possible et nous prendrons alors dans l'ensemble des études comprenant un spray unique un angle de lancer des quanta de  $20^\circ$  (ce qui permet alors de réduire les temps de calcul comparés à une émission hémisphérique). Notons également qu'une émission collimatée fournit des résultats voisins des autres transmittances.

Angle d'émission [°]	0	20	60	120
Transmittance [-]	0,885	0,921	0,931	0,914

TABLE 2 – Evolution de la transmittance (à  $5 \mu\text{m}$ ) en fonction de différents angles d'émission des quanta dans le cas d'un spray unique

Dans le cas d'une rampe, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3. Là encore, à partir d'un angle d'émission de  $20^\circ$ , la transmittance du rayonnement n'évolue quasiment plus. Toutefois, l'angle limite (au-dessus duquel les quanta n'atteignent plus la zone de spray) dans une configuration en rampe typique de nos cas d'étude s'élève environ à  $26^\circ$ . Nous sommes alors

légèrement au-dessus de la valeur fournie par l'étude de sensibilité. Afin de s'affranchir de cette légère différence, nous prendrons un angle d'émission des quanta de  $30^\circ$  dans les études concernant des configurations en rampes.

Angle d'émission [°]	0	20	60	120
Transmittance [-]	0,712	0,801	0,810	0,814

TABLE 3 – Evolution de la transmittance (à  $5 \mu\text{m}$ ) en fonction de différents angles d'émission des quanta dans le cas d'une rampe

En guise de complément, l'influence de l'angle d'émission des quanta est à présent évaluée dans le cadre d'un scénario de source étendue du type panneau rayonnant. Un écran radiatif uniforme en termes de fraction volumique en eau et de diamètres des gouttes est utilisé. Le schéma de principe de la configuration étudiée est présenté sur la figure 3. Le domaine numérique possède des dimensions de  $4 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  avec un maillage structuré et uniforme comprenant  $3 \times 1 \times 10$  cellules. L'écran radiatif, d'une épaisseur de  $10 \text{ cm}$ , est situé dans la zone centrale suivant la direction  $x$  et s'étend sur toute la hauteur du domaine. La surface d'émission du rayonnement correspond à un panneau rayonnant positionné à  $x = 0$  (plan  $YZ$  s'étendant sur toute la hauteur du domaine) ayant les caractéristiques d'un corps noir à une température de  $1000 \text{ K}$ . La zone de réception, de dimensions équivalentes à la surface d'émission, est située en face de la source de rayonnement à une distance de  $4 \text{ m}$ . Notons que la réception du rayonnement est hémisphérique. Deux plans de symétries (plans  $XZ$ ) permettent de réduire les temps de calcul. Les conditions initiales du domaine sont fixées à une température de  $291 \text{ K}$  et une humidité relative de  $60 \%$ . Compte tenu des conclusions établies dans la section précédente, l'ensemble des résultats de transmissions est fourni avec un critère de convergence sur le flux à  $1 \%$ . Nous nous situons dans une configuration d'écran radiatif infini avec des surfaces d'émission et de réception du rayonnement infinies (symétries). On s'attend à ce que l'émission du rayonnement soit hémisphérique.

La figure 4 illustre l'influence de plusieurs angles d'émission des quanta dans la simulation numérique radiative (cinq cas sont considérés :  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  et  $180^\circ$ ) sur la transmittance d'un rideau. L'angle de  $0^\circ$  correspond à une émission du rayonnement collimatée alors que l'angle de  $180^\circ$  correspond à une émission hémisphérique. Les transmittances sont calculées à une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$  pour un écran radiatif ayant des caractéristiques dynamiques représentatives des rideaux d'eau étudiés plus loin (un diamètre des gouttes de  $100 \mu\text{m}$  et une fraction volumique en eau de  $10^{-4} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air). Des écarts sur la capacité d'atténuation du rideau sont constatés en fonction de l'angle utilisé (l'écart maximum étant quasiment de  $4 \%$  sur la transmittance entre une émission collimatée et une émission hémisphérique). De manière globale, la transmission est surévaluée lorsque l'angle d'émission du rayonnement est réduit (signalons que cet écart est quasiment constant suivant la hauteur dans le domaine).

Les figures 5 montrent que des différences similaires sur la transmission du rayonnement existent lorsque les paramètres dynamiques du rideau sont changés. Deux cas sont analysés : le premier (figure 2.5(a)) concerne un brouillard avec un diamètre de gouttes de  $100 \mu\text{m}$  et une fraction volumique de  $10^{-3} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air alors que le deuxième (figure 2.5(b))

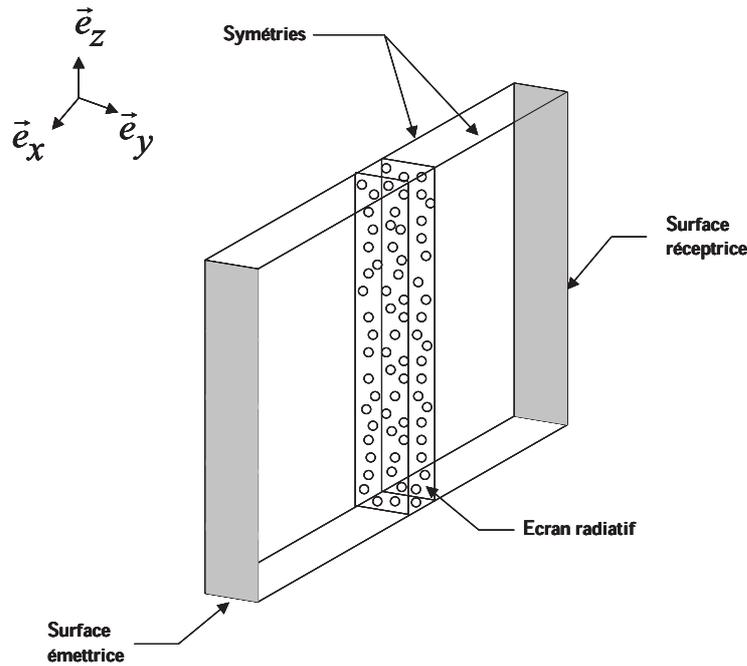


FIGURE 3 – Schéma de principe utilisé pour l'étude de sensibilité

utilise un diamètre de  $50 \mu\text{m}$  et une fraction volumique de  $10^{-4} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air. Une émission supposée collimatée conduit à surestimer la transmission par rapport à une émission hémisphérique. Les différences constatées entre ces deux cas sont de l'ordre de 6 % (notons tout de même que sur la figure 2.5(a) où la transmission du rayonnement est faible, l'écart relatif entre émission collimatée et hémisphérique atteint 35 %).

Cette étude de sensibilité confirme nos attentes et établit que des différences non négligeables sur la capacité d'atténuation d'un rideau existent suivant l'angle d'émission du rayonnement choisi. Par conséquent, il devient difficile de s'affranchir d'une émission hémisphérique dans la modélisation des transferts radiatifs dans le cas de surfaces rayonnantes étendues.

## B.2. Paramètres entrés dans la partie lagrangienne du code de calcul

Cette section met l'accent sur les caractéristiques des gouttelettes d'eau simulées dans notre rideau d'eau (suivi lagrangien dans le code de simulation). Le diamètre de ces gouttes ainsi que la fraction volumique en eau du milieu sont analysés afin d'évaluer les effets d'une variation de ces caractéristiques sur l'efficacité du spray (un milieu homogène monodisperse est considéré). Ensuite, l'effet du nombre de classes pris en compte est estimé dans le cas d'une pulvérisation polydispersée (simulation de plusieurs diamètres de gouttes au sein du rideau).

### B.2.1. Variation des caractéristiques dynamiques du spray : fraction volumique et diamètre

Le scénario utilisé dans le cadre de cette étude est identique à celui présenté dans le paragraphe précédent (domaine composé de trois zones simulant un écran radiatif avec une source d'émis-

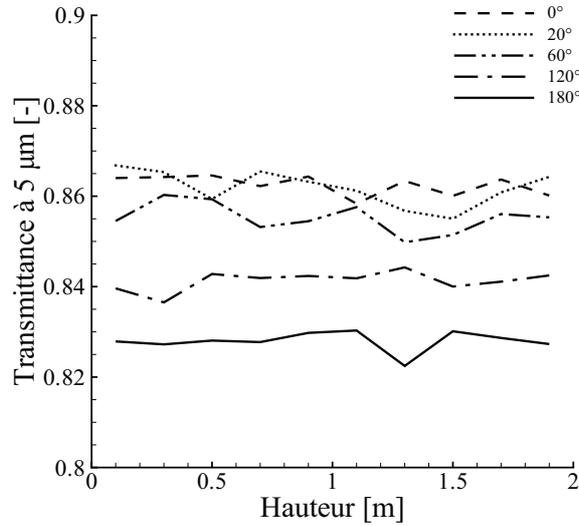
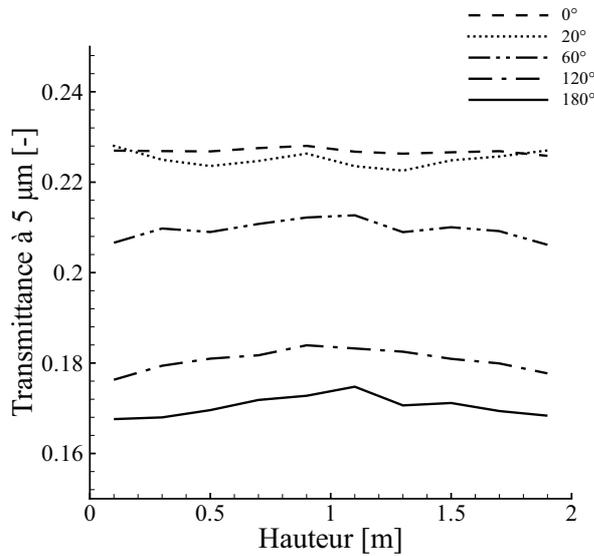
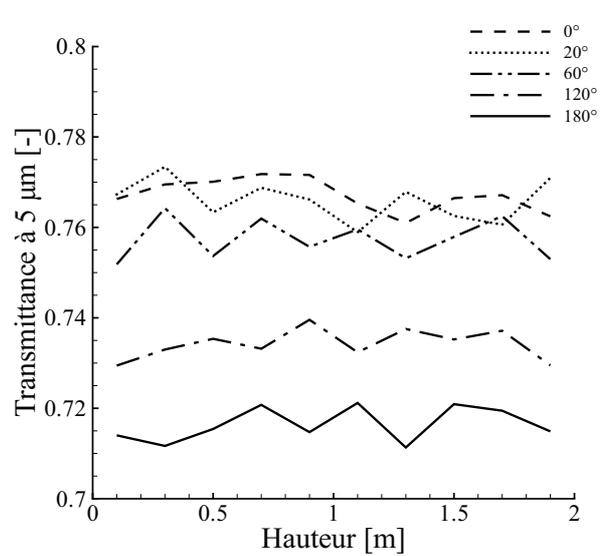


FIGURE 4 – Evolution de la transmittance à une longueur d’onde de  $5 \mu\text{m}$  en fonction de la hauteur pour différents angles d’émission des quanta dans un milieu homogène en diamètre ( $100 \mu\text{m}$ ) et en fraction volumique ( $10^{-4} \text{ m}^3$  d’eau par  $\text{m}^3$  d’air)



(a) Diamètre :  $100 \mu\text{m}$  ; fraction volumique :  $10^{-3} \text{ m}^3$  d’eau par  $\text{m}^3$  d’air



(b) Diamètre :  $50 \mu\text{m}$  ; fraction volumique :  $10^{-4} \text{ m}^3$  d’eau par  $\text{m}^3$  d’air

FIGURE 5 – Evolution de la transmittance à une longueur d’onde de  $5 \mu\text{m}$  en fonction de la hauteur pour différents angles d’émission des quanta dans un milieu homogène en diamètre et fraction volumique

sion du rayonnement étendue). La fraction volumique en eau du milieu ainsi que le diamètre des gouttelettes d’eau sont fixés. L’ensemble des résultats est présenté en terme de transmittance du

rayonnement à une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$ . Ce choix de longueur d'onde présente l'avantage de se situer dans une zone où seules les gouttes sont responsables de l'atténuation du rayonnement (on se situe hors bandes de vapeur d'eau). Nous avons montré qu'il est nécessaire de considérer une émission du rayonnement hémisphérique dans le cadre de surfaces rayonnantes étendues. Par conséquent, les différents cas considérés ont été étudiés en prenant en compte ces observations et les résultats obtenus sont recensés dans le tableau 4.

Plusieurs écrans radiatifs présentant des caractéristiques différentes sont analysés (plus particulièrement trois fractions volumiques en eau du milieu sont étudiées :  $10^{-3} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air,  $10^{-4} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air et  $10^{-5} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air, ainsi que cinq diamètres de gouttelettes d'eau :  $10 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $500 \mu\text{m}$  et  $1 \text{ mm}$ ). De manière globale, plus la fraction volumique en eau au sein du rideau est importante, plus sa capacité à atténuer le rayonnement infrarouge est bonne. Toutefois, l'augmentation de cette grandeur ne doit pas se faire au détriment d'une consommation d'eau excessive. Le but est alors de trouver une alternative d'injection permettant à la fois d'améliorer la quantité d'eau au sein du rideau sans pour autant accroître le débit d'eau injecté, d'où l'objectif des travaux de cette thèse consistant à comparer différentes stratégies de pulvérisation.

Par ailleurs, à quantité d'eau équivalente, plus les tailles de gouttes au sein de la pulvérisation sont petites, plus la capacité d'atténuation du rideau augmente, l'atténuation du rideau atteignant même quasiment 100 % pour une fraction volumique de  $10^{-3} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air et un diamètre de  $10 \mu\text{m}$ . Au contraire, pour une même fraction volumique et un diamètre de gouttes de  $1 \text{ mm}$ , la transmission du rayonnement atteint 83 % (la baisse de la fraction volumique engendre même pour un même diamètre une transmission quasiment de 99 %). On comprend bien l'intérêt des techniques du type brouillard d'eau sur ce critère du rayonnement puisqu'elles mettent en œuvre des gouttelettes de petites tailles par rapport aux méthodes du type "sprinklage". Toutefois, cette caractéristique ne doit pas être déconnectée de la notion de stabilité du rideau. En effet, les petites gouttes, de faibles inerties (car plus légères), vont être fortement influencées par les fluctuations dues aux interactions avec la turbulence. Par conséquent, un rideau constitué uniquement de gouttes de  $10 \mu\text{m}$  (bien que très efficace face au rayonnement infrarouge lorsque le spray n'est pas en mouvement), est probablement très instable (pour preuve, nous pouvons observer les trajectoires de gouttes de  $66 \mu\text{m}$  de diamètre sur la figure 4.8 présentée plus loin et se rendre compte des trajectoires très aléatoires de ces particules pourtant plus massives). Le risque est alors d'obtenir un spray qui se désagrège complètement, ce qui rend ainsi le système de protection inefficace. Il semble que la combinaison de différentes tailles de gouttes au sein du spray est nécessaire : des grosses gouttes à forte inertie permettant d'obtenir un rideau stable (ces tailles de gouttes peuvent être plus ou moins importantes suivant les conditions d'utilisation du rideau ; nous pouvons imaginer que la taille sera différente si le brouillard est utilisé en présence ou non de ventilation) et des petites gouttes plus efficaces face au rayonnement à quantité d'eau équivalente. Le but est alors de trouver le meilleur compromis entre capacité d'atténuation et stabilité (sans oublier la consommation d'eau).

Le tableau 5 fournit les transmittances calculées par une loi de Beer (données en haut à droite dans les cellules du tableau) basée sur le coefficient d'extinction (donné en bas à gauche dans les cellules du tableau). Ces valeurs sont à mettre en parallèle avec les transmittances évaluées grâce à la méthode de Monte-Carlo (tableau 4). Cette étude montre que la loi de Beer donne une mauvaise estimation de la transmittance du rayonnement à travers un rideau (milieu absorbant et diffusant). Par exemple, pour un diamètre de  $100 \mu\text{m}$  et une fraction volumique de  $10^{-3} \text{ m}^3$

		Fraction volumique [m <sup>3</sup> d'eau/m <sup>3</sup> d'air]		
		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>
Diamètre	10 μm	0,871	0,300	≈ 0
	50 μm	0,967	0,715	0,048
	100 μm	0,972	0,823	0,173
	500 μm	0,987	0,952	0,693
	1 mm	0,986	0,982	0,832

TABLE 4 – Transmittances à une longueur d'onde de 5 μm pour un écran radiatif avec différents diamètres et fractions volumiques

d'eau par m<sup>3</sup> d'air, le calcul par une loi de Beer évalue la transmittance à 0,54 alors que la méthode de Monte-Carlo l'estime à 0,71.

		Fraction volumique [m <sup>3</sup> d'eau/m <sup>3</sup> d'air]		
		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>
Diamètre	10 μm	5,6	55,9	559,2
	50 μm	0,6	6,3	62,6
	100 μm	0,3	3,2	31,9
	500 μm	0,1	0,6	6,1
	1 mm	≈ 0	0,3	3,0

TABLE 5 – Transmittances calculées par une loi de Beer basée sur le coefficient d'extinction (chaque cellule contient  $\beta$  en bas à gauche en m<sup>-1</sup> et  $\text{Tr}_{Beer}$  en haut à droite) à une longueur d'onde de 5 μm pour un écran radiatif avec différents diamètres et fractions volumiques

### B.2.2. Variation du nombre de classes de gouttes

Simplifier la modélisation numérique d'un spray en lançant une monodispersion jugée équivalente n'est pas envisageable [Collin, 2006]. Par conséquent, il convient d'utiliser une polydispersion avec un nombre de classes de gouttes donné pour simuler de manière plus fine le rideau d'eau. Cette étude de sensibilité sur le nombre de classes va permettre de déterminer si ce paramètre est influent sur la capacité d'atténuation d'un rideau. Si cette variation se confirme, il restera alors à évaluer le nombre de classes à considérer dans la simulation numérique. Pour ce faire, plusieurs dynamiques de spray ont été modélisées en utilisant des polydispersions selon 4,

20 et 100 classes de gouttes. Au niveau de la simulation des transferts radiatifs, la configuration correspond à une surface rayonnante étendue ayant les mêmes caractéristiques qu'un corps noir à une température de 1000 K. Les résultats obtenus en terme de transmittance sont illustrés sur la figure 6 à une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$ . Les évolutions des courbes de transmittance sont identiques et peu de différences sont à constater entre les trois cas d'étude (la différence est de l'ordre de 1 % sur la transmission du rayonnement). Par conséquent, le nombre de classes choisi dans la polydispersion simulée influence peu la capacité d'atténuation du rideau. Dans l'ensemble de ces travaux, le choix du nombre de classes s'est porté sur vingt, ce qui permet d'avoir au sein du rideau un panel de diamètres de gouttes assez varié permettant de dégager des différences de comportements sur le plan dynamique.

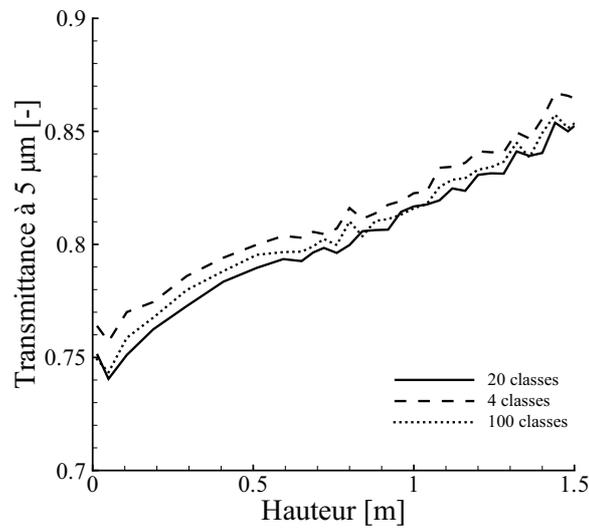


FIGURE 6 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur pour des simulations de rideaux utilisant un nombre de classes de gouttes différent dans la distribution granulométrique

### B.3. Bilan sur l'étude de sensibilité

Ces différentes études de sensibilité ont permis dans un premier temps d'estimer les valeurs optimales à donner à des paramètres tels que le critère de convergence du code radiatif ou encore l'angle d'émission du rayonnement. Le but est alors de trouver le meilleur compromis entre temps de calcul et précision des résultats. Dans un deuxième temps, l'analyse s'est portée sur les paramètres dynamiques qui influencent de manière importante l'efficacité d'un rideau, à savoir la fraction volumique et le diamètre. Il en est ressorti la confirmation qu'à quantité d'eau égale, une pulvérisation de gouttes de petites tailles possède une capacité d'atténuation du rayonnement bien supérieure à un spray privilégiant des gouttes de plus gros diamètres. Il faut également garder à l'esprit que cette particularité ne doit pas être dissociée de la notion de stabilité du rideau. Un compromis est alors à trouver entre petites et grosses gouttes de manière à obtenir un rideau efficace face au rayonnement sans que celui-ci ne se désagrège sous les effets dynamiques de l'air environnant.

## Chapitre 3

# Banc expérimental pour la caractérisation spectrale des rideaux d'eau

Afin d'évaluer expérimentalement la transmission spectrale à travers un brouillard d'eau, un dispositif de mesures a été mis en place. Ce chapitre est consacré à la description détaillée de ce banc de mesures. Les aspects concernant la répétabilité et les incertitudes sur les mesures effectuées sont abordés. Différentes configurations peuvent être étudiées permettant ainsi d'établir un panel de données expérimentales varié et de comparer les efficacités obtenues avec les diverses stratégies de pulvérisations considérées. Commençons d'abord par la description du dispositif expérimental.

### 3.1 Description du dispositif

Les éléments essentiels qui composent le dispositif expérimental sont présentés sur la photographie de la figure 3.1. Le brouillard d'eau est généré par des buses espacées le long d'une rampe, elle-même fixée sur une barre mobile pouvant pivoter et se déplacer sur un axe vertical. Cette disposition permet d'une part d'étudier toutes les directions d'injection possibles et d'autre part de mesurer le rayonnement infrarouge transmis à n'importe quelle position dans le spray en modifiant la ligne de visée du spectromètre. Une seconde barre peut aussi être ajoutée afin d'obtenir un système de double rampe permettant d'étudier la combinaison de sprays pour différentes configurations et espacements. L'alimentation en eau de la rampe est réalisée grâce à un circuit d'eau ouvert. Un compresseur est utilisé pour stocker de l'air sous une pression de 10 bars dans un réservoir tampon de 50 litres qui permet de stabiliser la pression en eau en évitant de trop fortes variations provenant du réseau. La réserve en eau servant à l'alimentation des buses est de 30 litres, assurant l'autonomie nécessaire à la réalisation de nos essais compte tenu d'un débit réduit au niveau des buses utilisées (typiquement  $0,3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  par buse sous une alimentation de 4 bars). L'air est alors introduit dans ce réservoir permettant ainsi d'avoir un écoulement d'eau sous une pression constante. L'intérêt est d'éviter toute fluctuation de pression pouvant engendrer une variation des paramètres, notamment du débit ou de la granulométrie des buses utilisées. Le contrôle de cette pression est réalisé par un capteur placé sur la rampe. Une vanne de régulation, placée à la sortie du réservoir d'air comprimé, permet de régler l'alimentation en eau à la pression souhaitée. Au cours des différents essais, trois types de buses, se différenciant

par la forme de leur jet, leur débit ou encore leurs angles d'injection ont été étudiés (références : TP400067, TP1100067 et TG1 de la société Spraying Systems and co.). Des différences ayant été observées avec les données constructeur, les principales caractéristiques de ces buses ont été mesurées et sont présentées plus loin dans le tableau 4.1 et 4.2. Le choix s'est porté sur ces tuyères car la granulométrie qu'elles génèrent se rapproche fortement de celle qui est utilisée dans des applications réelles. En revanche, pour des raisons d'utilisation à l'échelle du laboratoire, leur débit est très faible (pression d'utilisation faible). Un exemple typique d'utilisation de la buse TP400067 en rampe est présenté sur la photo 3.1. Notons que le phénomène de diffusion par les gouttes (dans le visible ici) est mis en évidence à l'aide d'un laser He-Ne.

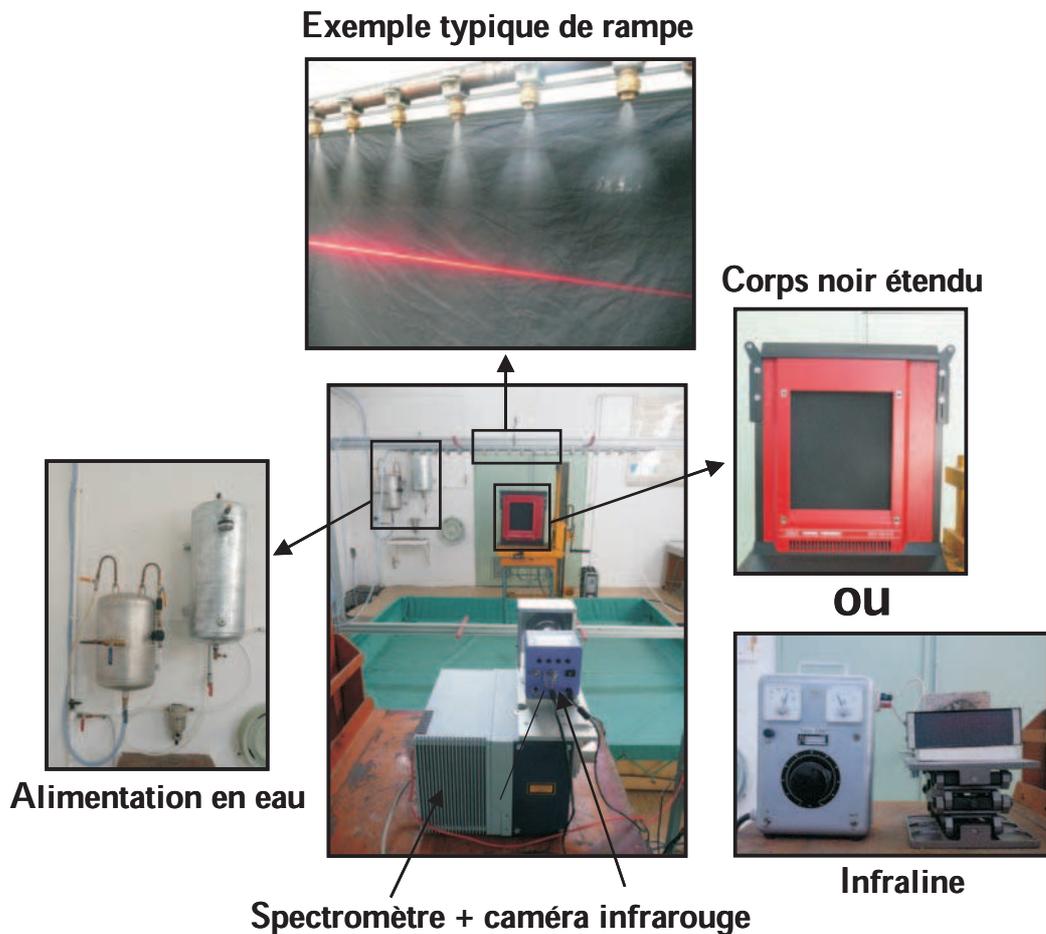


FIGURE 3.1 – Dispositif expérimental

La mesure de transmission du rayonnement infrarouge à travers le spray est réalisée grâce à la combinaison de trois appareils. Deux sources de rayonnement sont disponibles. Les premiers essais ont été réalisés avec une plaque de type Infraline (de Itech System) de dimensions 19,5 cm par 6,5 cm (figure 3.1), chauffée à la température de 1000 K et se comportant approximativement comme un corps noir. Par la suite, un corps noir étendu de dimensions 30 cm par 35 cm, de température 773 K a été utilisé comme source de rayonnement (ce corps noir est visible sur la photo 3.1). Le rayonnement, après avoir traversé la zone de spray, est analysé avec un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) de type Matrix de Bruker (visible sur la photo 3.1). Le spectromètre utilise

de manière classique un interféromètre de Michelson et une séparatrice en KBr. Un double détecteur InSb/HgCdTe est combiné à l'appareil, chacun ayant sa propre gamme de mesures dans l'infrarouge. Le détecteur HgCdTe analyse le rayonnement reçu dans la gamme de nombres d'onde  $600\text{-}2000\text{ cm}^{-1}$  alors que le détecteur InSb est utilisé dans la gamme comprise entre  $1900\text{ cm}^{-1}$  et  $5000\text{ cm}^{-1}$ . La gamme commune allant de  $1900\text{ cm}^{-1}$  à  $2000\text{ cm}^{-1}$  permet dans la pratique le raccordement des deux spectres. La résolution spectrale est prise égale à  $4\text{ cm}^{-1}$ . Le rayonnement est reçu à l'entrée du spectromètre dans un angle solide de  $9.10^{-4}\text{ sr}$  et la surface de réception correspond à un disque de  $4,4\text{ cm}$  de diamètre. Le dernier élément clé utilisé est une caméra infrarouge PV 320L de Electrophysics. Cet appareil utilise un capteur d'une résolution de  $320 \times 240$  pixels et une plage spectrale allant de  $2$  à  $14\text{ }\mu\text{m}$  ( $700\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$ ) bien adaptée à notre application. L'objectif a une longueur focale de  $35\text{ mm}$ . Plusieurs améliorations sont apportées par la caméra [Parent *et al.*, 2009]. D'une part, elle permet d'obtenir des données de transmissions supplémentaires et d'autre part, elle aide à l'alignement du spectromètre et de la source d'émission. Les informations au sujet de la transmission sont obtenues à l'aide de différents filtres ajoutés à la caméra, chacun permettant une mesure dans une bande centrée sur une longueur d'onde spécifique (figure 3.2), à savoir  $3,80\text{ }\mu\text{m}$  (environ  $2631\text{ cm}^{-1}$ );  $4,45\text{ }\mu\text{m}$  (environ  $2247\text{ cm}^{-1}$ ) et  $7,83\text{ }\mu\text{m}$  (environ  $1277\text{ cm}^{-1}$ ). L'utilisation simultanée des deux appareils de réception du signal est possible grâce à une séparatrice placée sur le faisceau incident qui redirige approximativement à chaque appareil la moitié des signaux reçus. Dans l'ensemble des applications, la distance entre l'émission et la réception du signal est approximativement de  $4\text{ m}$ .

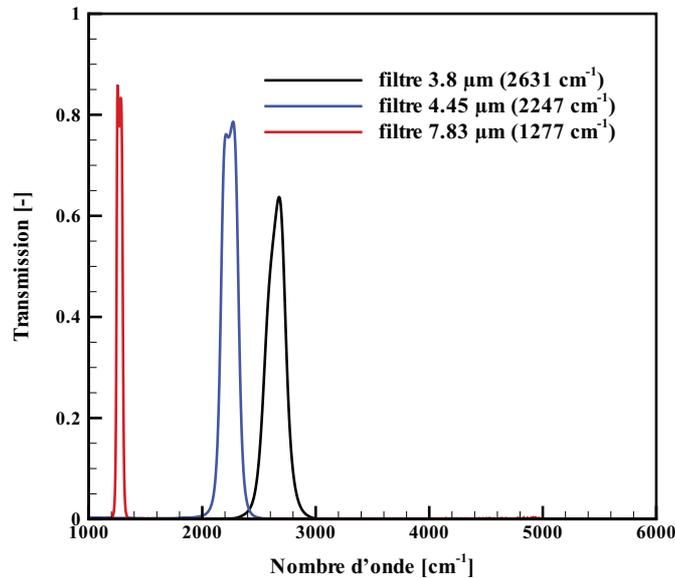


FIGURE 3.2 – Bandes spectrales des filtres utilisés sur la caméra infrarouge

## 3.2 Mode opératoire

### 3.2.1 Traitement des données

Les différentes stratégies de pulvérisation étudiées seront comparées en terme de transmission. Les mesures de flux  $\phi$  réalisées avec et sans rideau d'eau sont référencées en indice avec l'indication "avec spray" et "sans spray" respectivement. Notons que chacun des flux spectraux obtenus avec le spectromètre est le résultat d'une moyenne réalisée sur trois essais consécutifs, chaque essai étant lui-même caractérisé par un spectre résultant d'une moyenne effectuée sur 100 scans. Après prise en compte d'une mesure de "zéro", notée  $\phi_0$ , réalisée sans rideau d'eau et sans corps noir permettant ainsi de prendre en compte l'émission de rayonnement due au milieu environnant, le rapport des deux flux donne la transmittance spectrale à travers le rideau d'eau considéré :

$$T_\nu = \frac{\phi_{avec\ spray} - \phi_0}{\phi_{sans\ spray} - \phi_0} \quad (3.1)$$

Avec une moyenne de Planck réalisée sur l'intervalle de nombres d'onde  $\Delta\nu$  qui nous concerne à partir de la luminance spectrale  $L_{\nu,\theta}^0$  du corps noir à la température  $\theta$ , la transmittance totale peut également être déterminée par :

$$Tr = \frac{\int_{\Delta\nu} L_{\nu,\theta}^0 T_\nu d\nu}{\int_{\Delta\nu} L_{\nu,\theta}^0 d\nu} \quad (3.2)$$

où la luminance spectrale  $L_{\nu,\theta}^0$  est donnée par la relation :

$$L_{\nu,\theta}^0 = \frac{2 h c_0^2 \nu^3}{e^{\frac{h c_0 \nu}{k \theta}} - 1} \quad (3.3)$$

où  $h$ ,  $k$  et  $c_0$  sont respectivement la constante de Planck, la constante de Boltzmann et la vitesse de la lumière.

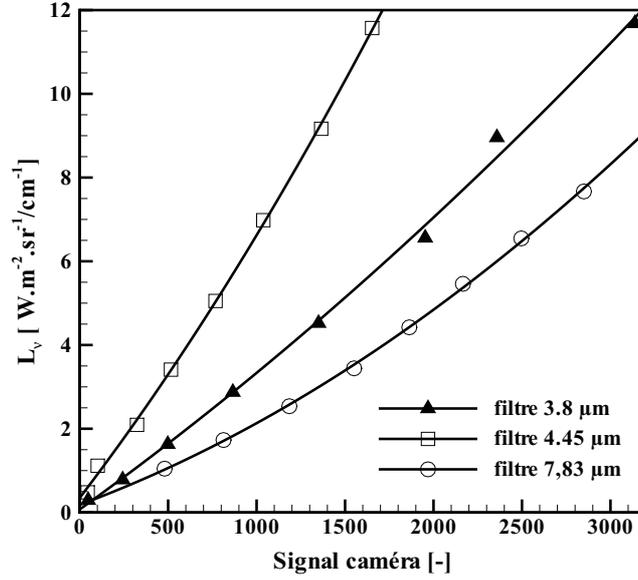
L'atténuation du rayonnement qui est le complémentaire de la transmission peut enfin être estimée en fonction du nombre d'onde par :

$$A_\nu = 1 - T_\nu \quad (3.4)$$

Quant à l'atténuation totale, elle est définie par :

$$A = 1 - Tr \quad (3.5)$$

L'évaluation de la transmission du rayonnement à l'aide de la caméra infrarouge est plus complexe. Du fait de la non-linéarité du signal caméra par rapport au flux, un étalonnage préalable est nécessaire [Parent *et al.*, 2009]. Pour chacun des trois filtres, une calibration est effectuée en mesurant l'émission du rayonnement par un corps noir thermostaté. Une correspondance est ainsi obtenue entre le signal caméra, la température du corps noir et donc la luminance spectrale du corps noir grâce à la loi de Planck. Une mesure de "zéro" est également prise en compte pour les mêmes raisons que celles explicitées précédemment. Les courbes d'étalonnage de la caméra obtenues pour chacun des trois filtres sont représentées sur la figure 3.3, les symboles correspondant aux mesures directes effectuées alors que les lignes continues constituent des régressions polynomiales du second ordre. Suivant le filtre utilisé, des corrections sont effectuées sur le signal brut reçu par la caméra selon les équations 3.6, 3.7 et 3.8 afin d'obtenir le flux exact provenant de la source de rayonnement.


 FIGURE 3.3 – Etalonnage de la caméra infrarouge [Parent *et al.*, 2009]

$$\text{Filtre } 3,80 \text{ } \mu\text{m} : L_\nu = 2,25.10^{-7} \phi_{\text{cam}}^2 + 3,04.10^{-3} \phi_{\text{cam}} + 7,244.10^{-2} \quad (3.6)$$

$$\text{Filtre } 4,45 \text{ } \mu\text{m} : L_\nu = 7,48.10^{-7} \phi_{\text{cam}}^2 + 5,53.10^{-3} \phi_{\text{cam}} + 3,4874.10^{-1} \quad (3.7)$$

$$\text{Filtre } 7,83 \text{ } \mu\text{m} : L_\nu = 3,81.10^{-7} \phi_{\text{cam}}^2 + 1,57.10^{-3} \phi_{\text{cam}} + 1,8408.10^{-1} \quad (3.8)$$

où  $L_\nu$  représente la luminance spectrale et  $\phi_{\text{cam}}$  le signal caméra.

En pratique, l'acquisition par la caméra infrarouge est effectuée sur la durée du protocole de mesure par le spectromètre (comprenant une mesure réalisée avec spray et une sans spray). Après correction sur le signal reçu effectuée grâce aux équations 3.6, 3.7 et 3.8, la transmission est alors estimée par la relation 3.1 pour chacun des trois filtres.

### 3.2.2 Répétabilité et incertitudes de mesures

Le mode opératoire pour la caractérisation spectrale des rideaux d'eau fait état de moyennes sur plusieurs scans et sur plusieurs essais pour améliorer le rapport signal sur bruit. Pour donner une idée de la répétabilité des données obtenues par le spectromètre et des incertitudes correspondantes, des mesures successives sont réalisées avec et sans spray. Dans le cas où le brouillard n'est pas activé, il ressort que les variations obtenues en termes de flux reçus par le spectromètre sont très faibles montrant alors la stabilité du spectromètre et du corps noir utilisés durant le protocole de mesures. En présence de rideau, la configuration étudiée est une rampe unique en pulvérisation ascendante avec un espacement entre les buses de 10 cm (les buses d'injection utilisées sont des tuyères TP400067 sous une pression d'alimentation de 4 bars). Les mesures sont effectuées jusqu'à épuisement du réservoir d'eau. Le choix s'est porté sur cette configuration car

c'est un cas exigeant où les trajectoires de gouttes complexes et une possible moins bonne stabilité du rideau peuvent induire plus de problèmes de répétabilité. En revanche, en configuration descendante, les effets d'inertie sont plus forts et les temps de séjour plus courts entraînant par conséquent une meilleure stabilité. Comme lors du mode opératoire classique mis en place, des moyennes sont calculées sur trois essais consécutifs. Les transmissions spectrales obtenues, leur moyenne et l'écart-type estimé autour de 2% sont représentés sur la figure 3.4(a).

Sur la figure 3.4(b) sont présentés la transmission moyenne et l'intervalle de confiance à 99,9% défini par  $\left[ \bar{T} - 4,221 \frac{\sigma_e}{\sqrt{n_e}} ; \bar{T} + 4,221 \frac{\sigma_e}{\sqrt{n_e}} \right]$  où  $\sigma_e$  est l'écart type calculé sur les mesures de transmissions,  $n_e$  est le nombre d'essais réalisés et la valeur de 4,221 correspond, d'après la loi de Student, au quantile d'ordre 0.999 et de degré  $n_e = 13$  (nécessaire pour tenir compte de la faible valeur de  $n_e$  dans le cas étudié). Cet intervalle de confiance permet d'être sûr à 99,9 % que la mesure effectuée va se trouver entre les bornes inférieures et supérieures visualisées sur la figure 3.4(b). L'ensemble des mesures de transmissions données par la suite est donc estimé avec une incertitude de plus ou moins 2%.

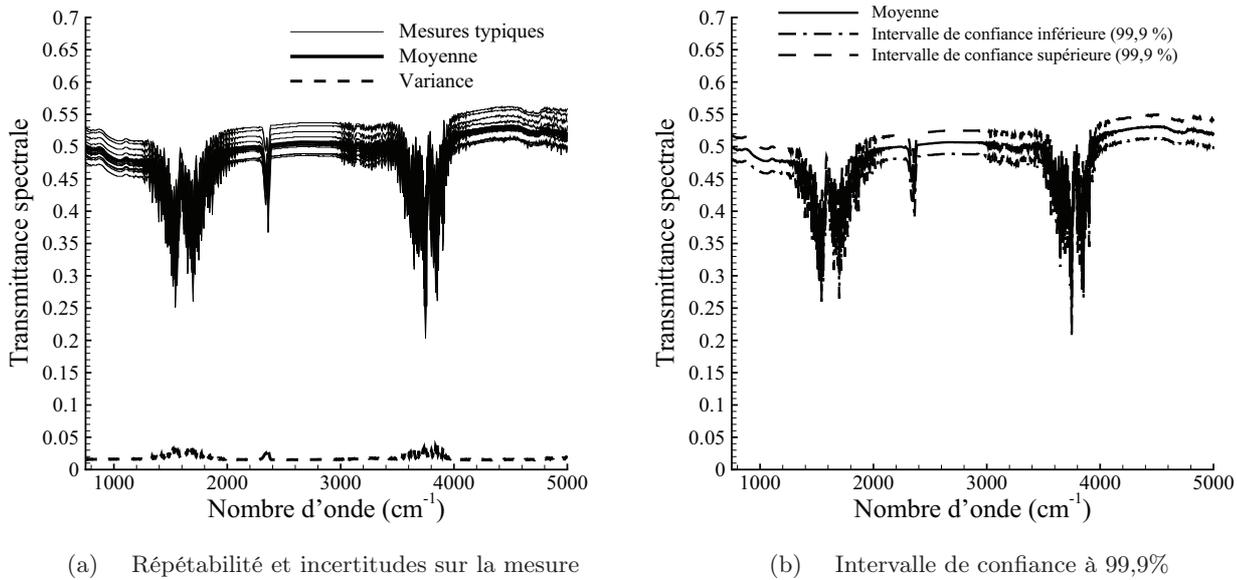


FIGURE 3.4 – Répétabilité : présentation de résultats de transmission répétés sur la même configuration

Le dispositif expérimental servant à la caractérisation spectrale des rideaux d'eau vient d'être détaillé. Le mode opératoire ainsi que les aspects concernant la répétabilité et les incertitudes de mesures ont également été développés. Le banc expérimental permet l'étude de configurations en brouillard d'eau diverses et variées. En effet, des stratégies de pulvérisation aussi bien avec des injections descendantes ou des injections ascendantes sont envisageables. Evaluer l'influence de nombreux paramètres sur la capacité d'atténuation d'un rideau d'eau est également possible.

On pense notamment au nombre de buses associées sur une rampe ainsi qu'à leur espacement, au nombre de rampes ainsi que l'écartement entre elles, à l'orientation des tuyères, à la pression d'alimentation ou à la position de mesure dans le rideau. Différents types de tuyères sont aussi à notre disposition.



# Annexe C - Dispositifs expérimentaux annexes

Cette annexe est dédiée à la présentation de dispositifs expérimentaux utilisés lors de ces travaux. Le premier permet la mesure de la distribution granulométrique du spray. Cette donnée est primordiale car la taille de gouttes influe fortement sur la capacité d'atténuation du rideau (pour évaluer cette influence, on renvoie à l'étude d'ordres de grandeur sur le diamètre des gouttes effectuée dans la section B.2.1 de l'annexe B). La caractérisation granulométrique de la buse (TP400067 de la société Spraying Systems) permettra de connaître la taille de gouttes au sein du spray. Ces données serviront alors de paramètres d'entrée dans la modélisation numérique du rideau.

Le deuxième dispositif est consacré à la visualisation d'impact de gouttes sur une paroi. Une des stratégies étudiée dans ces travaux concerne le spray impactant. La difficulté est alors de connaître précisément le régime d'impact se produisant lorsque la goutte entre en contact avec la paroi. Pour s'affranchir de cette incertitude, un banc expérimental est utilisé et permettra ainsi de connaître le (ou les) régime(s) d'impact de gouttes existant en fonction de nos conditions d'utilisation du spray impactant (taille de gouttes, vitesse incidente, température de paroi).

N'étant utilisés qu'occasionnellement au cours de cette thèse, ces deux dispositifs expérimentaux sont alors présentés de manière succincte. Pour de plus amples informations, on renverra aux travaux spécialisés dans le domaine.

## C.1. Banc expérimental pour la mesure de la distribution granulométrique d'un spray

La technique utilisée pour mesurer la distribution locale en nombre des tailles de gouttes est la granulométrie phase Doppler (PDA). Un schéma de principe du banc expérimental utilisé est présenté sur la figure 1. Le granulomètre Phase Doppler (produit par la société DANTEC) est composé d'un système d'alimentation en eau, d'une sonde d'émission laser, d'une optique de collection du signal et d'une interface numérique permettant d'analyser les mesures. Le dispositif utilisé appartient à l'équipe Métrologie, Fluide et Combustion du LEMTA.

L'alimentation en eau du système est réalisée grâce à un circuit d'eau ouvert. Le contrôle de la pression permet d'obtenir un débit d'eau quasi-constant durant toute la durée de la mesure. Un compresseur est utilisé pour stocker de l'air dans un réservoir tampon muni d'un détendeur. La présence de ce réservoir permet de s'affranchir d'éventuelles fluctuations de pression sur le réseau d'air comprimé. Cet air est introduit dans le réservoir d'eau, ce qui permet d'avoir un écoulement d'eau sous une pression constante. La gamme de pressions utilisée peut s'étendre de 2,5 bars à 6,5 bars (dans nos cas d'étude, nous utilisons une pression d'alimentation de 2,6

bars et 4 bars). Le système d'injection est monté sur un banc de déplacement 3D piloté par un ordinateur (le dispositif d'émission et de réception du signal restent fixes).

La source laser est un laser à argon ionisé, dont seule la raie verte à 514,5 nm est utilisée. Un séparateur optique permet d'obtenir deux faisceaux à 514,5 nm distants de 60 mm et parallèles. Une lentille convergente permet ensuite d'obtenir un système de faisceaux croisés (signalons qu'un des faisceaux passe dans une cellule de Bragg afin de le décaler en fréquence de 40 MHz). Le volume de mesure correspond au croisement des deux lasers. A l'intérieur de ce volume de contrôle, un réseau de franges d'interférence est généré. Lorsqu'une particule sphérique traverse cette zone, elle va diffuser du rayonnement dans toutes les directions, l'intensité de ce rayonnement dépendant de la frange sur laquelle la particule est centrée. En effet, si celle-ci est centrée sur une frange brillante, la particule considérée diffuse beaucoup de lumière alors qu'elle en diffuse peu pour une frange sombre. Des détecteurs vont collecter les signaux lumineux. La traversée de ce réseau de franges va ainsi permettre de mesurer la vitesse des gouttes par analyse de la fréquence Doppler, leur taille s'obtenant par analyse de différence de phase de la lumière diffusée.

Ce banc expérimental fait l'objet d'une description plus détaillée dans les travaux de Delconte [Delconte, 2009] et Castanet [Castanet *et al.*, 2005].

Les résultats obtenus sur la distribution en tailles des gouttes sont présentés dans le paragraphe 4.1.3.

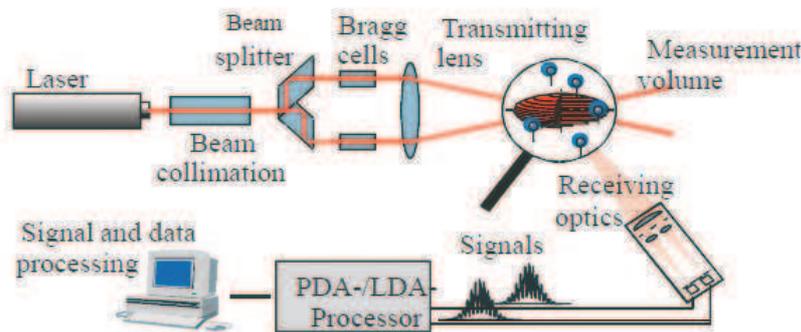


FIGURE 1 – Schéma de principe du banc expérimental pour la mesure de granulométrie (issu d'un cours de G. Castanet sur les "Techniques basées sur la diffusion élastique de la lumière")

## C.2. Banc expérimental pour la visualisation de l'impact d'un train de gouttes sur une paroi

Le banc expérimental, installé au laboratoire LEMTA, va permettre de connaître les régimes d'impact des gouttes sur une paroi lisse à température ambiante (les conditions de température et de rugosité sont prises identiques à nos cas d'étude). Le schéma du dispositif est présenté sur la figure 2. Un injecteur piézo-électrique va permettre de générer un train de gouttes monodisperse. La gamme de diamètres pouvant être étudiée varie de 100  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ . Il est par ailleurs possible d'effectuer des lancers de gouttes sous différents angles en inclinant le générateur de gouttes.

Les impacts de gouttes sont réalisés sur une plaque de Nickel (rappelons que cette dernière est à température ambiante) de dimensions 2 cm x 2 cm x 10 cm. La plaque est polie, ce qui permet de s'affranchir de l'effet de la rugosité sur le régime d'impact.

Une caméra rapide (Photron ultima APX-RS) permet la visualisation de l'impact des gouttes avec une fréquence variant de 3000 images par seconde à pleine résolution (1024\*1024 pixels) à 125000 images par seconde à basse résolution. Un traitement numérique des images permet de remonter aux diamètres des gouttes injectées et à leur vitesse.

Le banc expérimental permet également de visualiser des impacts de gouttes sur paroi chaude (une chauffe de la plaque de Nickel est possible), la thermographie infrarouge assurant l'étude des transferts radiatifs engendrés par l'impact des gouttes. Toutes ces caractéristiques ainsi que l'ensemble de ce dispositif sont très largement détaillés dans les travaux de Lelong [Lelong, 2010].

L'ensemble des résultats concernant les impacts de gouttes sont présentés plus loin dans le paragraphe 5.3.2.

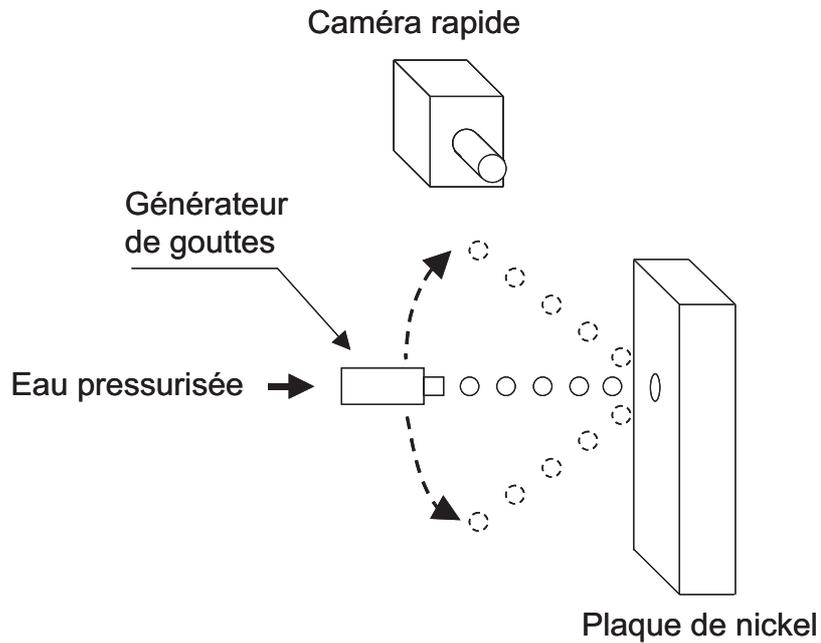


FIGURE 2 – Schéma de principe du banc expérimental pour la visualisation de l'impact d'un train de gouttes sur une paroi



Deuxième partie

Etude de cas



# Introduction de la deuxième partie

Cette partie a pour objectif de comparer, aussi bien numériquement qu'expérimentalement, diverses stratégies de pulvérisation en termes de capacités d'atténuation du rayonnement. Les brouillards d'eau, utilisés ici comme système de protection face à une forte source de chaleur (typiquement un incendie dans des conditions réelles), agissent comme de vrais "boucliers radiatifs" face au rayonnement thermique. Les mesures expérimentales alliées à la modélisation numérique vont permettre de comprendre les différents mécanismes mis en jeu au sein d'un rideau d'eau. L'idée est alors de trouver, en conservant des paramètres d'injection identiques (granulométrie et débit notamment), la configuration la plus efficace.

Plusieurs points vont composer cette deuxième partie. La première étude (chapitre 4) est réalisée pour une configuration de spray unique. Deux stratégies de pulvérisation sont envisagées : une injection descendante où les gouttes sont projetées vers le sol et une injection ascendante où les gouttelettes d'eau sont lancées vers le haut. L'analyse de la dynamique du spray permet de fournir les explications sur les différences observées entre les capacités d'atténuation des deux configurations. Une étude comparative des résultats numériques avec les mesures expérimentales est également effectuée dans un souci de validation.

Dans le but de se rapprocher de configurations plus proches de la réalité, le chapitre 5 propose l'étude de systèmes de rideaux d'eau en rampes. Cette association de points d'injection engendre un recouvrement plus ou moins efficace des sprays permettant une protection de cibles plus étendues. Plusieurs stratégies sont envisagées : descendante, ascendante et impactante, la configuration impactante consistant à diriger le rideau vers la cible à protéger pour combiner l'atténuation par un spray et la protection par un film liquide s'écoulant sur la paroi. La comparaison entre les différents systèmes s'effectue aussi bien au niveau de la dynamique des sprays que des transferts radiatifs à travers ceux-ci. L'influence de certains paramètres d'injection (angles d'injection ou espacement entre tuyères d'une rampe par exemple) est évaluée dans un but d'optimisation de ces systèmes de protection.

Un dernier chapitre met en avant deux études complémentaires : la première concerne une étude de systèmes de double rampe. Un tel dispositif permet d'augmenter l'épaisseur du rideau et ainsi la quantité d'eau au sein de ce dernier. Le deuxième avantage est qu'il est désormais possible de répartir le volume d'eau injecté d'une seule rampe sur les deux rampes de l'installation. Une deuxième étude met en avant différents tests réalisés dans le visible. En effet, dans des conditions réelles (lors d'un incendie par exemple), l'utilisation d'un système de rideaux d'eau ne doit pas engendrer une perte de visibilité trop importante. Le risque d'un manque de visibilité est double. D'un côté, cela rendrait très difficile l'intervention des pompiers sur les lieux du sinistre. D'un autre côté, l'absence de visibilité désorienterait les personnes présentes dans les locaux (tunnel par exemple) et ne faciliterait pas leur évacuation (par leurs propres moyens avant l'arrivée du

personnel d'intervention). La visibilité à travers le brouillard est un paramètre crucial à prendre en compte. Les aspects numériques et expérimentaux dans le domaine du visible sont abordés au cours de cette étude.

## Chapitre 4

# Configurations en spray seul avec la tuyère TP400067

Pour effectuer une étude comparative entre les résultats numériques et expérimentaux, le choix de la tuyère utilisée s'est porté sur une buse de type TP400067 de chez Spraying Systems. Plusieurs raisons ont motivé cette décision. Nous disposons déjà de données sur la dynamique du spray grâce aux travaux de Zimmer à l'Institut Von Karman [Zimmer, 2001] qui avait caractérisé la granulométrie du spray à 20 cm sous la buse d'injection. De plus, il s'agit d'une tuyère à faible débit. Des mesures expérimentales à l'échelle du laboratoire sont donc réalisables, la pression d'alimentation et la consommation d'eau étant restreintes. Signalons que des travaux sur le plan radiatif avec cette buse ont déjà été réalisés au LEMTA par Parent [Parent *et al.*, 2006].

La première partie du chapitre concerne l'estimation expérimentale des différentes caractéristiques de la buse d'injection, à savoir, le débit, les angles d'injection et la granulométrie par une expérimentation de type anémométrie phase doppler.

L'étude qui suit est à la fois numérique et expérimentale et se terminera par la comparaison des deux approches notamment au niveau des transferts radiatifs à travers le spray.

### 4.1 Caractéristiques de la buse d'injection

#### 4.1.1 Estimation du débit d'injection

Numériquement, le débit volumique d'injection  $Q_v$  est calculé par une relation entre la pression relative  $P_r$  et un nombre de débit noté  $F_N$ , caractéristique propre à chaque tuyère et valable dans la gamme de pressions utilisée ici :

$$Q_v = F_N \sqrt{P_r} \quad (4.1)$$

Afin de déterminer le nombre de débit  $F_N$ , les débits ont été mesurés de manière classique en estimant le temps de remplissage d'un récipient gradué. L'opération est répétée plusieurs fois de manière à s'assurer de la validité de la mesure et une moyenne algébrique des résultats obtenus est effectuée. Ce protocole est réalisé pour plusieurs débits d'injection. Le nombre de débit  $F_N$  est déterminé graphiquement et vaut, dans le cas de la tuyère TP400067,  $8,47.10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$ . Des

variations sont toutefois à constater d'une tuyère à l'autre dans la gamme  $\pm 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$ .

Notons que le diamètre de l'orifice de sortie de la buse ( $d_0$ ) vaut 0,53 mm. La vitesse d'éjection peut donc être estimée selon la relation :

$$V_{\text{éjection}} = \frac{4 Q_v}{\pi d_0^2} \quad (4.2)$$

Dans le cas de la buse TP400067 utilisée sous une pression de 4 bars, la vitesse d'éjection des gouttelettes d'eau est évaluée à  $24,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 4.1.2 Estimation des angles d'injection

Une autre donnée nécessaire à la caractérisation d'une buse est la direction d'injection des gouttelettes d'eau. La tuyère considérée ayant une empreinte elliptique, cette direction doit donc être définie par deux angles notés  $\phi_0$  et  $\theta_0$ ,  $\phi_0$  étant le grand angle d'injection et  $\theta_0$  le petit angle.

Les deux angles ont été mesurés à l'aide d'un laser placé successivement à différentes hauteurs dans le spray suivant chacun des deux axes de l'ellipse. Le mode opératoire est présenté sur le schéma de la figure 4.1. Grâce à la diffusion de la lumière par les gouttelettes d'eau, le faisceau lumineux devient alors visible dans la zone de spray. La longueur de ce faisceau est ainsi mesurée pour différentes hauteurs dans le spray et graphiquement, nous pouvons donc remonter aux angles d'injection initiaux. Les résultats obtenus dans le cas d'une tuyère TP400067 utilisée sous une pression d'alimentation de 4 bars sont visualisés sur la figure 4.2. Dans ces conditions d'injection, les angles  $\phi_0$  et  $\theta_0$  valent respectivement  $48^\circ$  et  $18,5^\circ$ . Précisons que ces caractéristiques du spray varient avec la pression d'alimentation.

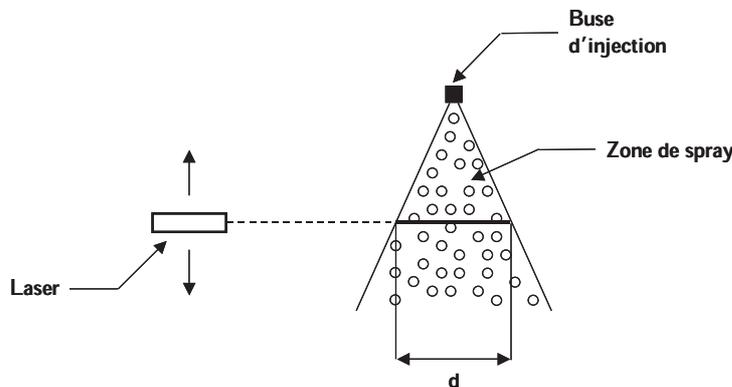


FIGURE 4.1 – Schéma explicatif pour la mesure des angles d'injection

### 4.1.3 Estimation de la granulométrie

L'expérimentation, détaillée dans la section C.1 de l'annexe C, nous a permis de déterminer la granulométrie en différents points de notre spray permettant ainsi un calage de la distribution granulométrique au niveau numérique. La position du volume de mesure dans le spray a été justifiée par plusieurs raisons. Dans un premier temps, pour éviter de se trouver dans le film liquide précédant la formation de gouttelettes d'eau sphériques, la zone où les faisceaux lumineux

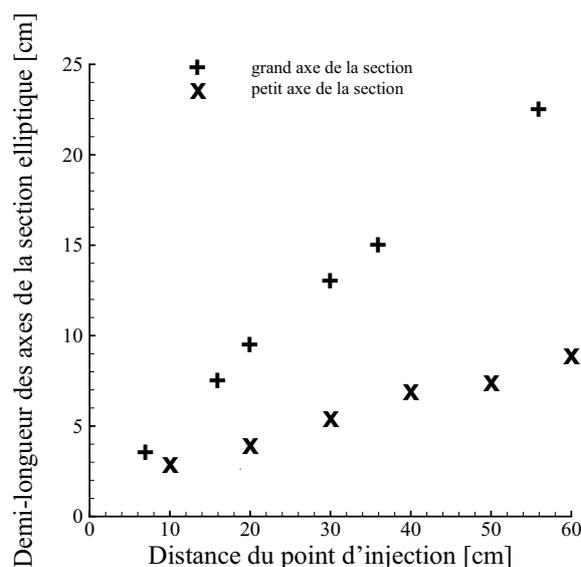


FIGURE 4.2 – Mesures permettant la détermination des angles d’injection pour une tuyère TP400067 utilisée sous une pression d’alimentation de 4 bars

se croisent a été placée à 20 cm du point d’injection. De plus, pour des raisons de réglages du protocole expérimental, les tailles de gouttes mesurées ne pouvaient excéder  $187 \mu m$ , le risque étant d’obtenir des distributions granulométriques erronées. Afin de réduire la taille moyenne des gouttes, le choix s’est donc porté sur des mesures à une pression d’injection de 4 bars en plein centre du spray. A cette position centrale, la présence de petites gouttes est majoritaire (en effet, les petites gouttes sont confinées à l’intérieur du spray par les gouttes de plus gros diamètres comme nous le verrons lors de l’étude numérique dans la section 4.2.3). Par conséquent, la proportion de gouttes ayant une taille supérieure à  $187 \mu m$  dans cette zone est négligeable. La distribution granulométrique obtenue à cette position est représentée suivant un histogramme sur la figure 4.3. La confirmation d’une faible quantité de gouttes au-delà de la limite de diamètre imposée par le dispositif est vérifiée (rappelons que ce résultat est valable pour une position située en plein centre du spray).

Le diamètre de Sauter  $D_{32}$  est défini comme le rapport entre le volume total occupé par les gouttelettes d’eau et la surface totale des particules dans le spray. Il est donné par la relation suivante :

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad (4.3)$$

où  $n_i$  représente un nombre de gouttes de diamètre  $d_i$ .

Expérimentalement, le diamètre de Sauter à 20 cm du point d’injection en plein centre du spray vaut  $100,8 \mu m$ .

Les mesures concernant les caractéristiques de la buse TP400067 sont répertoriées dans le

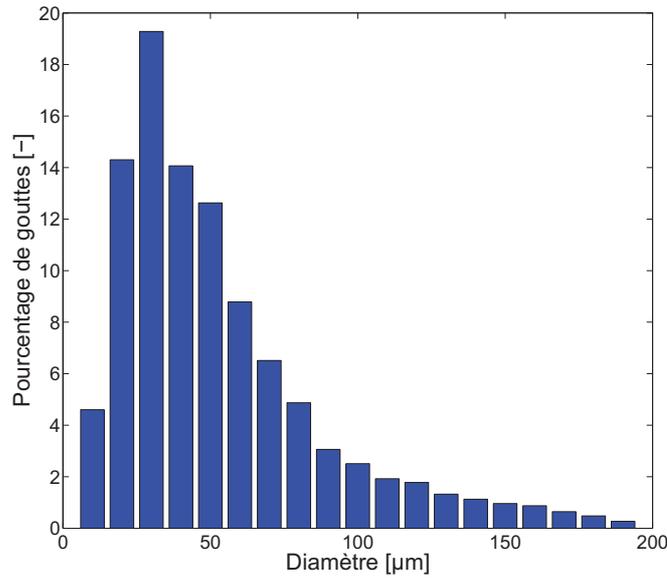


FIGURE 4.3 – Distribution granulométrique en plein centre du spray à 20 cm du point d’injection

tableau 4.1 pour certaines pressions d’alimentation. Le débit d’injection est un paramètre influençant la capacité d’atténuation d’un brouillard. Afin de comparer les efficacités d’un rideau obtenues avec des buses différentes, il est par conséquent intéressant de connaître les débits expérimentaux. Les mesures de débit sur les buses TP1100067 et TG1 ont aussi été réalisées et sont données dans le tableau 4.2.

Pression [bar]	1,5	2,6	4
Débit [L.min <sup>-1</sup> ]	0,20	0,25	0,32
Grand angle d’injection [°]	30,6	40,4	46,8
Petit angle d’injection [°]	14,2	17,4	18,5

TABLE 4.1 – Caractéristiques principales mesurées de la tuyère TP400067 pour différentes pressions d’alimentation

	Pression [bar]		
Tuyère	1,5	2,6	4
TP1100067	0,19	0,25	0,31
TG1	0,55	0,70	0,86

TABLE 4.2 – Débits d’injection mesurés pour les tuyères TP400067 et TG1 pour différentes pressions d’alimentation

Maintenant, le travail numérique consiste à estimer la bonne distribution granulométrique au point d’injection pour retrouver cette valeur du diamètre de Sauter à la position considérée. Dans la simulation, la loi de distribution utilisée est une loi Log-normale déjà rencontrée dans les travaux de Zimmer [Zimmer, 2001] :

$$f_{d_i} = \frac{1}{\delta_{log} d_{log} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \left( \frac{d_i}{d_{log}} \right)}{\delta_{log}} \right)^2 \right] \quad (4.4)$$

Les termes  $d_i$ ,  $d_{log}$  et  $\delta_{log}$  sont les paramètres de la loi Log-normale. Ils représentent respectivement un diamètre, un diamètre moyen et un paramètre de dispersion. Ces paramètres sont fixés à  $123 \mu\text{m}$  pour  $d_{log}$  et à  $0,4$  pour  $\delta_{log}$ , ce qui permet de retrouver une valeur du diamètre de Sauter de  $102,8 \mu\text{m}$  à  $20 \text{ cm}$  du point d'injection (pour rappel, la valeur mesurée est de  $100,8 \mu\text{m}$ ; l'écart nous a semblé suffisamment réduit pour ne pas influencer sur nos résultats). La polydispersion est effectuée sur vingt classes de diamètres compris entre  $20 \mu\text{m}$  et  $300 \mu\text{m}$ . Chacune des classes représente une part identique du débit, à savoir un vingtième du débit dans le cas étudié. Comme nous avons pu le voir dans le paragraphe B.2.2 (annexe B), une étude de sensibilité numérique a été réalisée sur le nombre de classes de gouttes avec des essais comportant également 4 classes et 100 classes.

Le récapitulatif des caractéristiques permettant la modélisation numérique d'un rideau engendré par une tuyère TP400067 est fourni dans le tableau 4.3.

Diamètre de l'orifice de sortie de la buse $d_0$	$5,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Nombre de débit FN	$8,47 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{\frac{1}{2}}$
Pression d'alimentation	4 bars
Grand angle d'injection $\phi_0$	$48^\circ$
Petit angle d'injection $\theta_0$	$18,5^\circ$
Diamètre moyen de la loi granulométrique Log-normale $D_{log}$	$123 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Paramètre de dispersion de la loi Log-normale $\delta_{log}$	0,4
Diamètre inférieur de la distribution granulométrique $d_{inf}$	$20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$
Diamètre supérieur de la distribution granulométrique $d_{sup}$	$300 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

TABLE 4.3 – Paramètres d'entrée pour la simulation d'un rideau avec une tuyère TP400067

## 4.2 Comparaison numérique entre un spray en configuration descendante et un spray en configuration ascendante

L'étude porte sur deux stratégies de pulvérisation différentes : la configuration descendante où les gouttes sont projetées au sol et la configuration ascendante où les particules d'eau sont lancées vers le haut. Chacun des deux cas sera étudié et les situations comparées aussi bien d'un point de vue dynamique que d'un point de vue radiatif. L'analyse se terminera par la confrontation des résultats numériques obtenus aux mesures expérimentales effectuées.

### 4.2.1 Paramètres d'entrée pour le calcul numérique

Le spray est confiné dans une enceinte cubique fermée dont la taille diffère suivant la configuration étudiée. En configuration descendante, les dimensions du domaine numérique sont de  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  alors qu'en spray ascendant ces dimensions sont doublées. Cet agrandissement du domaine a été effectué afin d'éviter des impacts de gouttes sur la paroi supérieure et

des recirculations d'air trop importantes dues aux parois. La figure 4.4 schématise le domaine utilisé dans le cas d'une injection descendante. Deux plans de symétrie permettent de réduire les temps de calcul. Le premier concerne un plan XZ passant par la buse d'injection. Le deuxième est utilisé uniquement dans le calcul sur la dynamique du spray et concerne un plan YZ passant également par la buse d'injection et permettant finalement de ne simuler qu'un quart du spray (une opération de recopiage est effectuée afin d'avoir une simulation complète suivant l'axe  $\vec{e}_x$  nécessaire pour le calcul des transferts radiatifs à travers le spray). Le point d'injection se situe à la position (1,5 m ; 1,5 m ; 1,5 m). Les frontières hors plans de symétrie sont considérées comme des parois. Dans le cas de l'injection ascendante, le schéma de principe est le même sauf que le point d'injection se situe à 30 cm du sol et les gouttes sont lancées vers le haut. Au niveau radiatif, la surface émettrice correspond au corps noir utilisé lors des expérimentations et la surface de réception va se rapporter au spectromètre. Chacune des deux surfaces va être calquée sur les caractéristiques des appareillages utilisés.

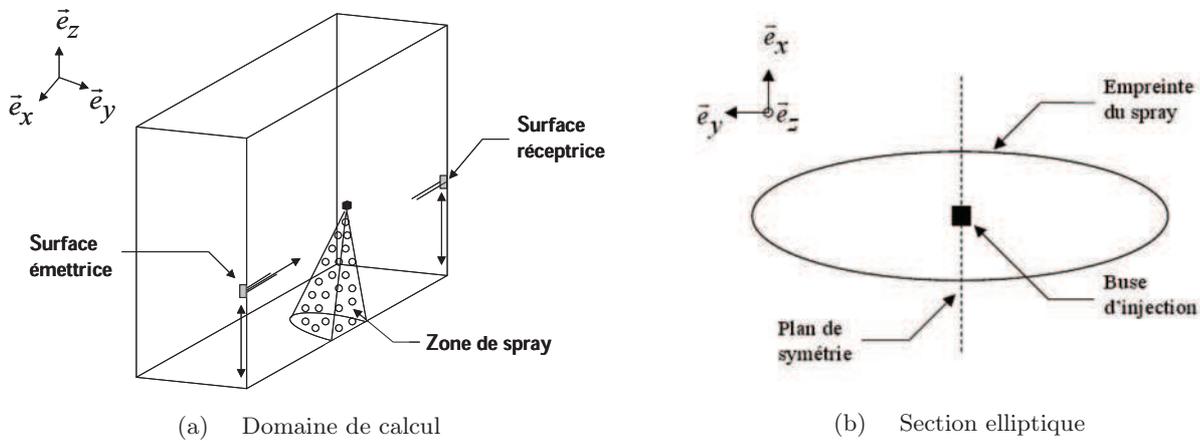


FIGURE 4.4 – Schéma de principe en injection descendante

Un maillage structuré non uniforme, resserré dans la zone de spray et près des parois est utilisé. Il comprend 48 x 24 x 40 cellules pour le cas descendant et 60 x 30 x 50 cellules pour le cas ascendant. Le maillage du domaine dans le cas d'une injection descendante est représenté sur la figure 4.5.

Le spray simulé de section elliptique (figure 4.4(b)) est généré par une tuyère TP400067 sous une pression d'injection de 4 bars avec les caractéristiques données dans la section 4.1.

Les conditions initiales, c'est-à-dire en l'absence de gouttelettes d'eau, sont fixées à 291 K pour la température et 60 % pour l'humidité relative, ce qui correspond à une humidité absolue de 8 g d'eau/kg d'air. Ces conditions sont également fixées aux parois du domaine d'étude.

#### 4.2.2 Propriétés radiatives d'une pulvérisation

Les propriétés radiatives typiques d'une pulvérisation, à savoir le coefficient d'absorption et le coefficient de diffusion, sont présentées sur la figure 4.6 en fonction du nombre d'onde. La configuration utilisée est une pulvérisation unique engendrée par une tuyère TP400067 (les caractéristiques sont données dans le tableau 4.3) sous une pression d'alimentation de 4 bars. Les

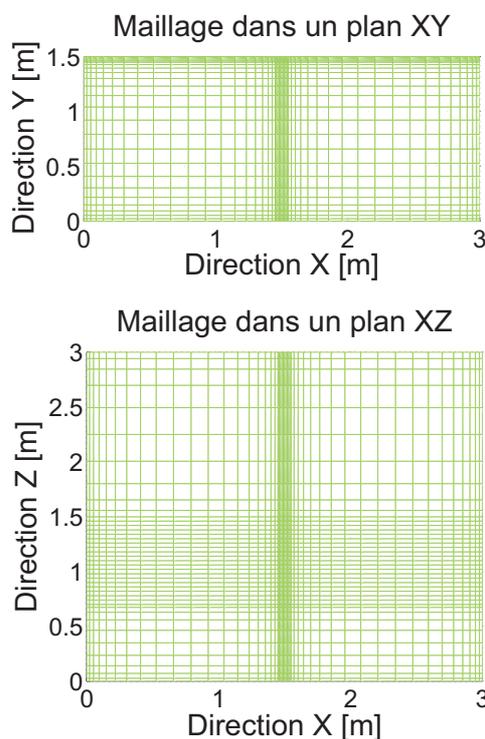


FIGURE 4.5 – Maillage utilisé dans le cas d'un spray descendant

coefficients sont donnés à une position centrale du spray située à 80 cm sous la buse d'injection où la fraction volumique moyenne s'élève à  $8,2 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> d'air et le diamètre de Sauter moyen à 108  $\mu\text{m}$ . Le coefficient d'absorption présenté sur cette figure ne prend pas en compte la contribution de la vapeur d'eau. Plusieurs effets sont à constater suivant la gamme de longueurs d'onde. Pour les petits nombres d'onde inférieurs à  $4000 \text{ cm}^{-1}$  (grandes longueurs d'onde), le phénomène d'absorption et le phénomène de diffusion du rayonnement contribuent chacun à environ 50 % du phénomène d'extinction. Nous pouvons tout de même remarquer dans cette gamme de nombres d'onde une zone à  $2700 \text{ cm}^{-1}$  où la diffusion devient légèrement plus importante que l'absorption. En revanche, pour les grands nombres d'onde supérieurs à  $4000 \text{ cm}^{-1}$  (petites longueurs d'onde), l'extinction est uniquement due au phénomène de diffusion (l'absorption est très faible dans cette gamme). Il reste à étudier la fonction de phase pour évaluer l'influence réelle de la diffusion du rayonnement sur l'efficacité du rideau.

La figure 4.7 donne la fonction de phase pour des conditions identiques à celles présentées précédemment (pour l'obtention des coefficients d'absorption et de diffusion) en fonction de l'angle de diffusion pour une longueur d'onde de 5  $\mu\text{m}$ . La fonction de phase est utilisée sous sa forme cumulée pour éviter d'être tributaire des variations importantes de celle-ci sous sa forme "classique". L'angle de  $0^\circ$  correspond à un angle de diffusion vers l'avant (suivant la direction d'incidence) et l'angle de  $180^\circ$  correspond à de la rétro-diffusion (inversement à la direction d'incidence). Le phénomène de diffusion est fortement anisotrope vers l'avant. En effet, un rayon incident a 50 % de chance d'être diffusé dans un angle inférieur à  $4^\circ$  et 90 % dans un angle inférieur à  $45^\circ$ . Par conséquent, dans les grands nombres d'onde où la diffusion est largement

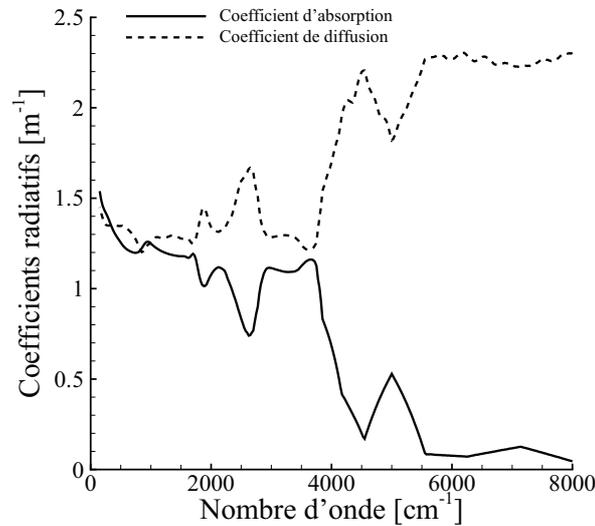


FIGURE 4.6 – Coefficients radiatifs pour une pulvérisation TP400067 sous une pression d'alimentation de 4 bars

majoritaire (figure 4.6), l'efficacité du rideau peut s'en trouver affaiblie du fait d'une diffusion prononcée vers l'avant. De plus, selon la configuration étudiée (expérimentale à échelle du laboratoire ou scénario à échelle réelle), les effets du phénomène de diffusion peuvent jouer de manière non négligeable sur l'efficacité du rideau. En ce qui concerne les mesures expérimentales réalisées dans le cadre de ce travail (le dispositif expérimental est présenté dans le chapitre 3), les surfaces d'émission et de réception du rayonnement sont faibles (l'angle de collecte du rayonnement reçu par le spectromètre est également faible). Dans ce cas, une diffusion du rayonnement, même selon un angle restreint, peut suffire à dévier suffisamment le rayon incident pour l'écarter de la cible (représentée par le spectromètre). La diffusion peut donc s'avérer très efficace. En revanche, pour une configuration plus proche de la réalité où les surfaces de réception et d'émission sont étendues (par ailleurs, la réception est hémisphérique), le renforcement par diffusion va probablement être plus présent mais surtout, une faible déviation ne suffit pas à empêcher le rayonnement d'atteindre la surface cible. Une diminution de l'efficacité du rideau peut en résulter (sur certaines gammes de longueurs d'onde où le phénomène de diffusion est majoritaire).

Les évolutions des coefficients radiatifs et de la fonction de phase présentées sont typiques d'un rideau d'eau. La variation de fraction volumique ou du diamètre engendrera uniquement un changement sur les niveaux obtenus.

Les conséquences de l'évolution de ces propriétés radiatives sur la capacité d'atténuation du brouillard d'eau seront évidemment évaluées par la suite, notamment lors d'études de configurations en rampes dans le chapitre 5.

### 4.2.3 Comparaison sur la dynamique du spray

Les deux stratégies de pulvérisation (injection descendante et injection ascendante) sont tout d'abord comparées au niveau de la dynamique du spray.

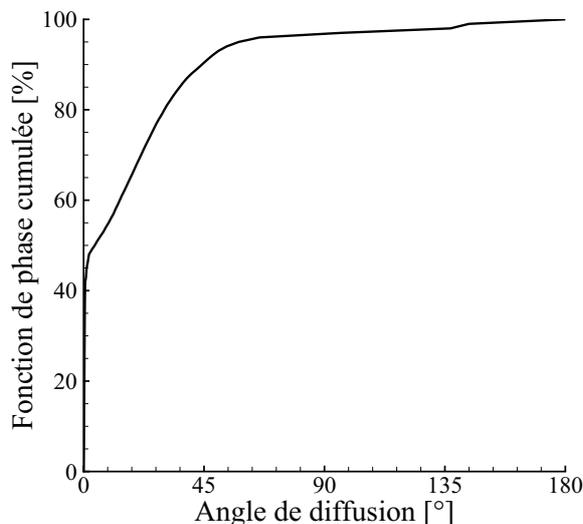


FIGURE 4.7 – Fonction de phase cumulée pour une pulvérisation TP400067 sous une pression d'alimentation de 4 bars pour une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$

### Injection descendante

La forme du spray a été reconstruite en post-traitement grâce à la visualisation de deux classes de gouttes parmi les vingt simulées dans la polydispersion étudiée, à savoir des petites gouttes ayant un diamètre de  $66 \mu\text{m}$  et des grosses gouttes avec un diamètre de  $271 \mu\text{m}$  (ces valeurs représentent respectivement la taille moyenne des gouttes de la plus petite classe et de la plus grande classe de la distribution granulométrique numérique). La figure 4.8 représente les trajectoires de ces deux types de gouttelettes. Divers comportements sont observés. Les grosses gouttes chutent au sol avec des trajectoires monotones sous les seules influences de la gravité et de la force de traînée. Du fait de leur grande inertie, la dispersion turbulente a peu d'effet sur ces gouttes. Elles vont constituer une sorte de cône creux à l'intérieur duquel les petites gouttes vont tomber avec des trajectoires très influencées par les fluctuations dues aux interactions avec la turbulence.

Cette injection de gouttelettes d'eau vers le sol va induire un écoulement d'air très nettement descendant, comme le montre la figure 4.9 où cet écoulement est visualisé dans une section centrale du spray. Les effets dus aux parois de type mur engendrent une recirculation du flux d'air. Sur la figure 4.9 est visible le phénomène d'entraînement de l'air au contact de la paroi inférieure (du sol). Notons que les différentes flèches servant de représentation de l'écoulement sont proportionnelles à la valeur de la vitesse de l'air environnant. De ce fait, la vitesse est, de manière logique, plus forte dans la zone de spray qu'autour de celui-ci, sa valeur maximale étant atteinte à proximité de la buse d'injection, là où le terme source de quantité de mouvement est le plus fort.

L'étude du diamètre de Sauter va appuyer les conclusions notées au niveau de la visualisation des trajectoires. La figure 4.10 représente le diamètre de Sauter  $D_{32}$  à l'intérieur du spray (suivant une coupe dans le plan XZ sur la figure 4.10(a) et une coupe suivant le plan YZ sur la figure 4.10(b)). Nous retrouvons bien sur ces deux visualisations la présence des grosses gouttes à la périphérie du spray et les particules plus petites enfermées au centre de celui-ci. La présence

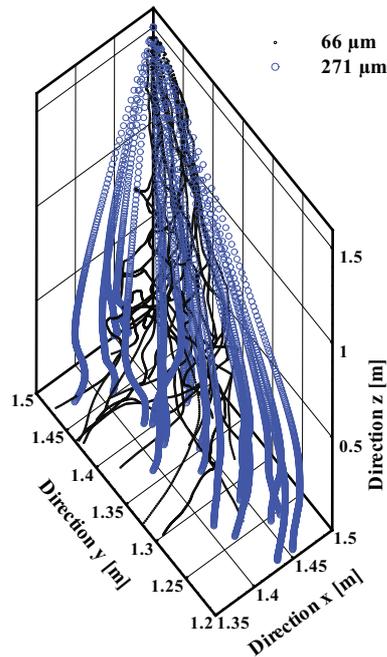


FIGURE 4.8 – Reconstruction du rideau grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes

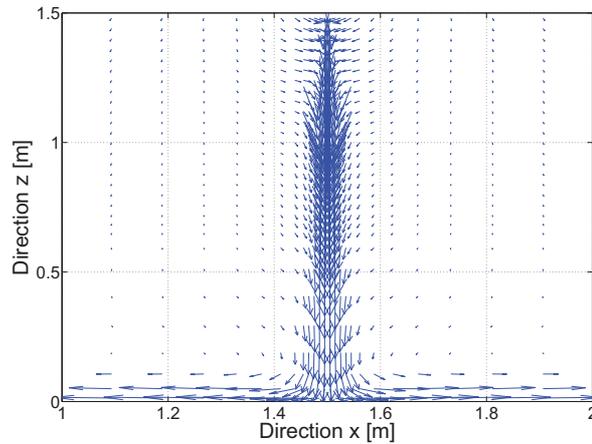


FIGURE 4.9 – Evolution de l'écoulement d'air en configuration descendante

de petites gouttes s'échappant du spray est visible sur la figure 4.10(a), l'explication de ce phénomène venant de l'entraînement de ces petites particules par le flux d'air environnant.

L'évolution du diamètre au centre du spray suivant la hauteur  $z$  est représentée sur la figure 4.11(a). En s'éloignant de l'injection, le diamètre de Sauter présente une phase de décroissance puis il ré-augmente de façon régulière à partir de 30 cm sous la buse d'injection. La valeur atteinte à cette position est d'environ  $90 \mu\text{m}$ . Sur la figure 4.11(b), la variation est établie suivant le grand axe de la section elliptique du spray à deux hauteurs différentes, à savoir 20 cm sous la tuyère ( $z = 1,3 \text{ m}$ ) et 40 cm sous la tuyère ( $z = 1,1 \text{ m}$ ). La même allure de courbe est obtenue dans les deux cas. Une valeur constante du diamètre de Sauter est d'abord observée

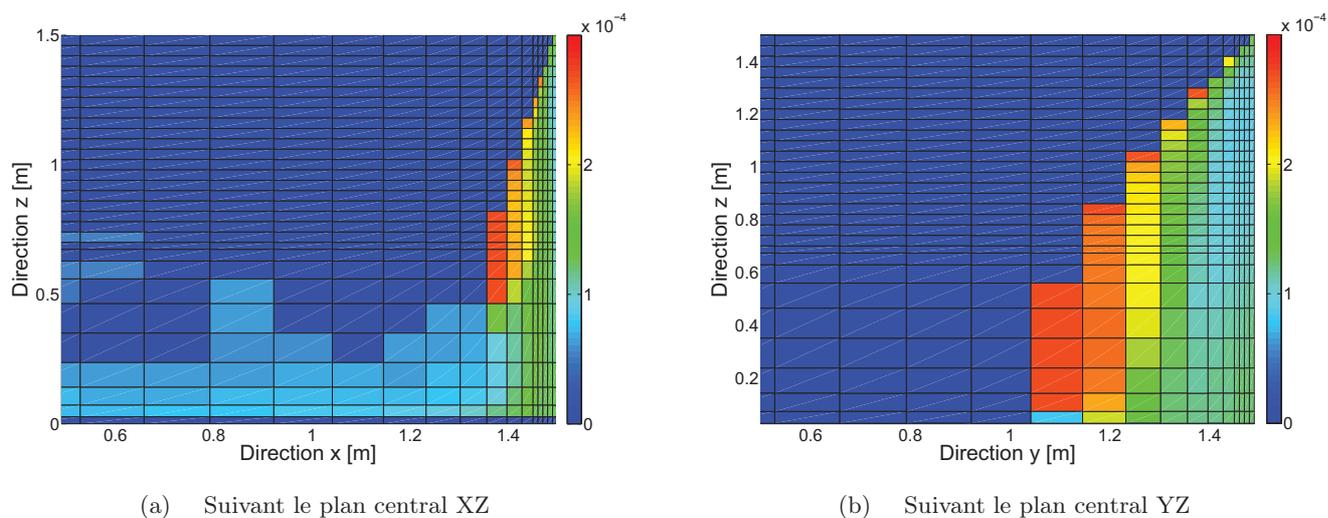


FIGURE 4.10 – Diamètre de Sauter  $D_{32}$  [m]

à partir du centre du spray (environ  $100 \mu\text{m}$  à 20 cm sous le point d'injection et  $92 \mu\text{m}$  à 40 cm), puis ce diamètre augmente rapidement de manière régulière en s'approchant de la périphérie.

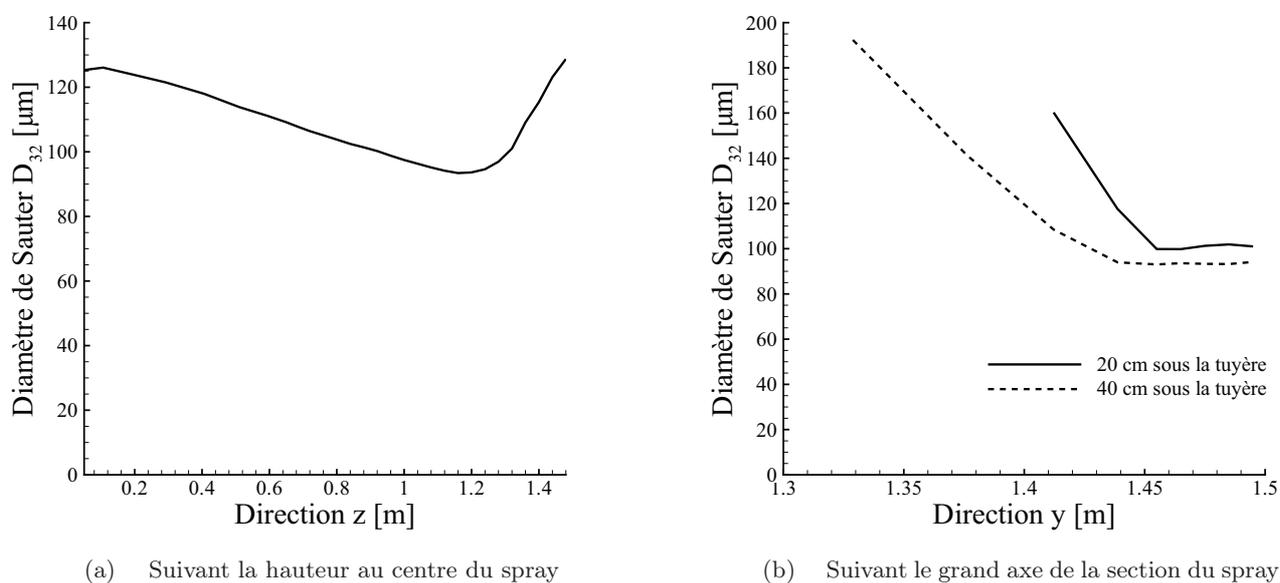


FIGURE 4.11 – Diamètre de Sauter  $D_{32}$  [ $\mu\text{m}$ ] en fonction de la hauteur et selon une direction transversale dans le spray

Nous allons à présent étudier les vitesses des gouttelettes d'eau. La figure 4.12 donne les variations de la vitesse des deux classes de gouttes déjà utilisées précédemment (figure 4.8), d'une part suivant la hauteur en plein centre du spray et d'autre part suivant le grand axe de la

section elliptique. Comme attendu, la vitesse des gouttes est maximale à l'injection ( $z = 1,5$  m) et décroît rapidement sous les effets de la force de traînée. Ce ralentissement est plus ou moins rapide suivant la taille de la goutte. En effet, les petites particules avec leur inertie plus faible ralentissent plus vite que les grosses gouttes. Graphiquement, à 20 cm sous la buse d'injection, les petites gouttes ont déjà perdu 80 % de leur vitesse initiale pour atteindre environ  $5 \text{ m.s}^{-1}$ . Ensuite, la décélération se fait progressivement sur le chemin restant avant d'atteindre le sol. Les grosses gouttes, de leur côté, subissent également une décélération mais beaucoup plus faible du fait de leur grande inertie. Notons que leur vitesse n'atteint par exemple  $5 \text{ m.s}^{-1}$  qu'à 50 cm du sol.

Cette tendance est confirmée par l'étude du temps de séjour des gouttes. Ce temps représente la durée mise par la goutte pour traverser le domaine de calcul en partant du point d'injection jusqu'à sa sortie par contact avec une paroi. Les statistiques ont été effectuées sur un échantillon de 3000 gouttes choisies aléatoirement dans chacune des deux classes étudiées. En moyenne, les particules de  $66 \mu\text{m}$  restent 0,96 seconde dans le domaine alors que les plus grosses gouttes ont un temps de séjour de 0,47 seconde. Du fait d'un très faible temps de résidence, les gouttes vont être très peu soumises au phénomène d'évaporation (causé essentiellement par le gradient d'humidité existant entre l'air et la particule).

La variation de la vitesse des gouttes suivant le grand axe de la section elliptique du spray est visible sur la figure 4.12(b). Deux hauteurs, respectivement à 20 cm du point d'injection ( $z = 1,3$  m) et 40 cm du point d'injection ( $z = 1,1$  m), ont été utilisées. Du centre du spray à sa périphérie, la vitesse des grosses gouttes décroît de manière assez constante. En revanche, en ce qui concerne les petites gouttes, une diminution de la vitesse est d'abord observée puis celle-ci va remonter au fur et à mesure de l'approche de la périphérie. Cette augmentation est essentiellement due au fait que les petites gouttes, moins rapides, vont alors se trouver dans une zone où la présence de particules de plus grand diamètre est majoritaire (figure 4.11(b)). Ces grosses gouttes, plus rapides, vont entraîner les plus petites gouttes. La combinaison de l'ensemble de ces phénomènes va alors engendrer une augmentation de la vitesse des plus petites gouttes suivant le grand axe de la section du spray. Les conclusions obtenues restent valables lorsqu'une autre hauteur est étudiée (à savoir 40 cm). La seule différence concerne la largeur du spray qui est évidemment plus grande lorsqu'on s'éloigne de la buse.

La fraction volumique, grandeur qui correspond à la quantité d'eau en  $\text{m}^3$  contenue dans un  $\text{m}^3$  d'air, est représentée sur la figure 4.13. Les sprays utilisés délivrent de faibles quantités d'eau, de l'ordre de  $10^{-4} \text{ m}^3$  d'eau/ $\text{m}^3$  d'air, ce qui nous permet de justifier l'absence de modèle de collisions de particules dans notre simulation. La fraction volumique est maximale au point d'injection et diminue évidemment au fur et à mesure que le spray s'élargit, la section elliptique de celui-ci augmentant très rapidement dans les trente premiers centimètres à partir de la buse d'injection. Ces représentations donnent également une idée des dimensions du spray, à savoir une empreinte au sol allant jusqu'à environ une trentaine de centimètres suivant le grand axe de l'ellipse et une dizaine de centimètres suivant le petit axe.

L'évolution de la fraction volumique au centre du spray en fonction de la hauteur  $z$  est visible sur la figure 4.14(a). Les dimensions de la visualisation ont été conservées par rapport à l'étude du diamètre de Sauter (figure 4.10). Cette fraction volumique décroît très rapidement à partir du centre du spray jusqu'à une hauteur de 20 cm sous le point d'injection. Comme nous l'avons vu précédemment, cette brusque baisse est majoritairement due à l'expansion du spray. La fraction volumique reste ensuite constante, signe que la section de spray n'évolue quasiment plus. Enfin, une légère diminution est observée avant d'atteindre le sol. Celle-ci s'explique par la recirculation de l'air à la paroi du bas provoquant une déviation de trajectoire des petites gouttes essentielle-

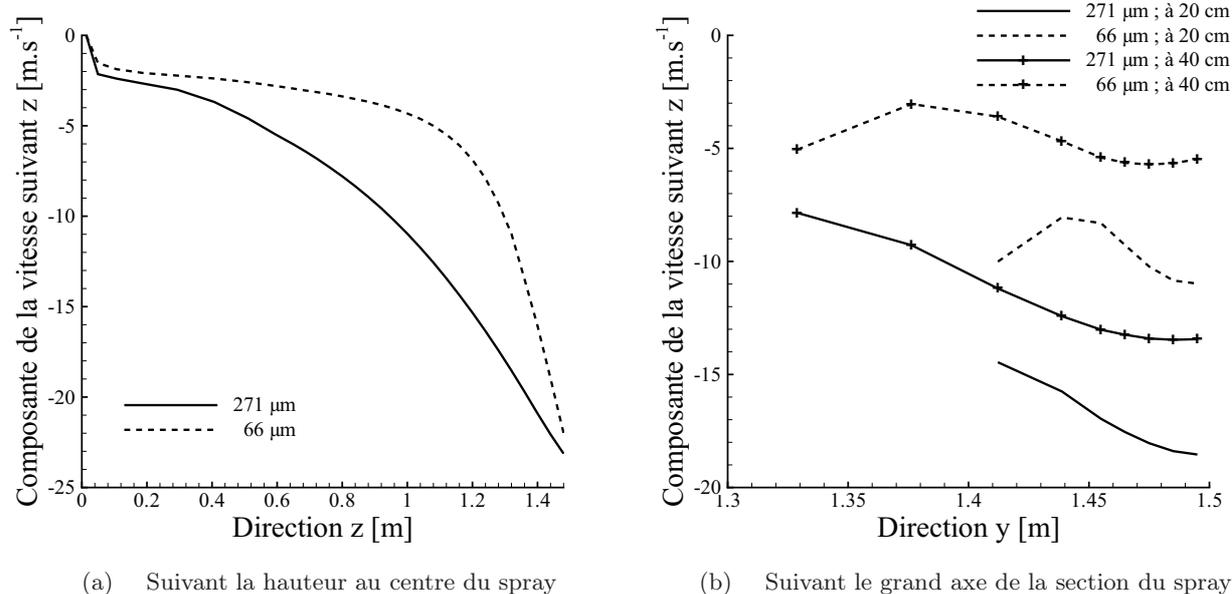


FIGURE 4.12 – Vitesses de deux classes de gouttes

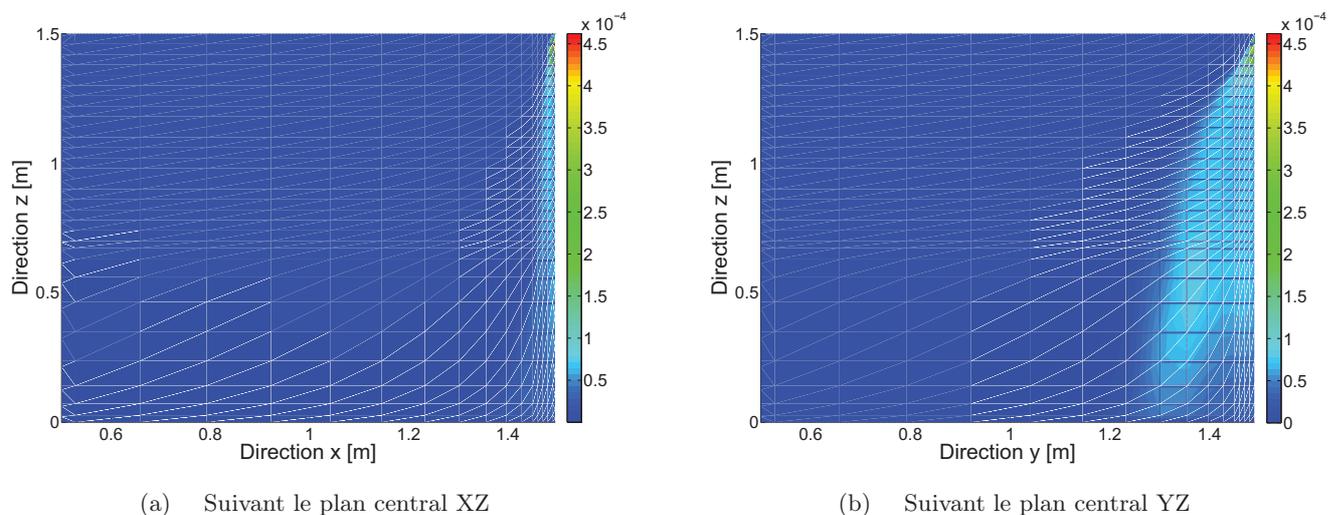


FIGURE 4.13 – Fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  d'air]

ment. Les autres courbes (figure 4.14(b)) concernent également l'étude de la fraction volumique mais cette fois-ci suivant le grand axe de la section du spray. Une légère augmentation de la fraction volumique apparaît en s'éloignant du centre du spray, zone où la présence de grosses gouttes est majoritaire (figures 4.10(b) et 4.11(b)).

La dynamique du spray descendant vient d'être détaillée. Nous allons maintenant effectuer la même étude dans le cas d'une injection ascendante, ce qui va nous permettre d'effectuer les

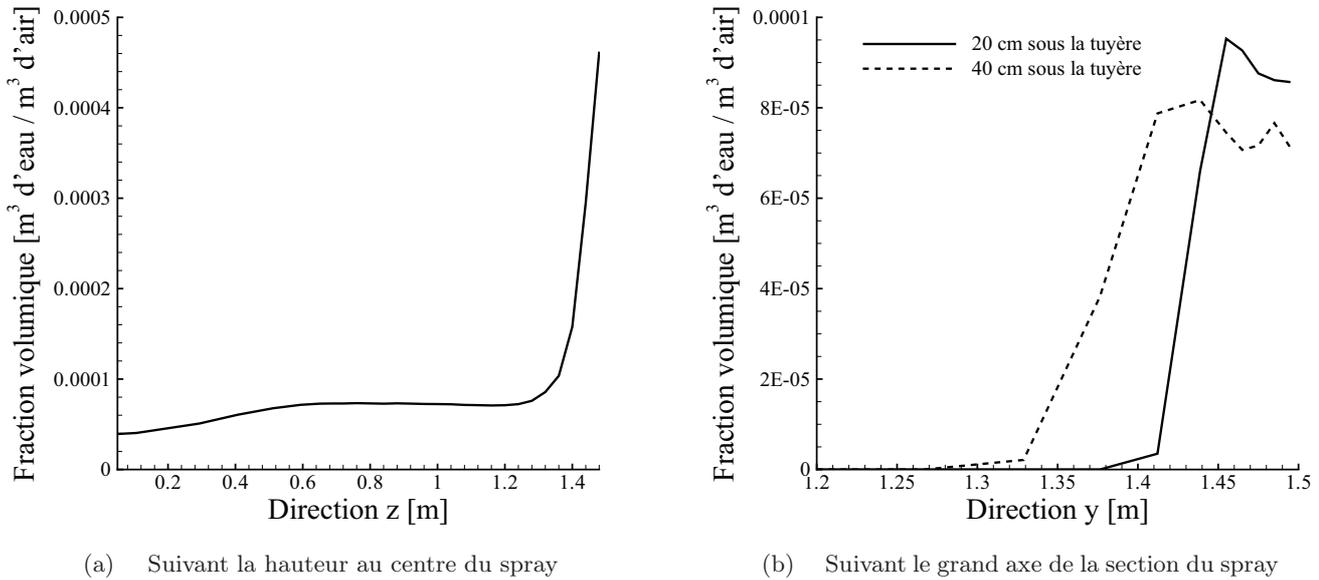


FIGURE 4.14 – Fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  d'air]

premières comparaisons entre les deux configurations.

### Injection ascendante

Le spray est visualisé sur la figure 4.15 grâce aux trajectoires des deux mêmes classes de gouttes que pour le cas descendant. Comme nous pouvions nous y attendre, la forme du spray est fortement modifiée. Ejectées vers le haut depuis un point d'injection situé à 30 centimètres du sol, les gouttes vont successivement se déplacer dans une phase ascendante puis dans une phase descendante. Elles vont alors passer deux fois dans la zone de spray, ce qui contribue à une meilleure atténuation du rayonnement. Des différences semblables au cas de l'injection descendante sont observées sur les trajectoires des particules suivant leur taille. En effet, nous retrouvons les petites gouttes fortement soumises aux effets de la turbulence de l'air, ce qui provoque des trajectoires aléatoires et en général leur sortie de la zone de spray. Les plus grosses gouttes sont toujours moins dépendantes de ce phénomène et suivent alors des trajectoires beaucoup plus régulières. La différence réside dans le fait que cet écoulement s'effectue de manière ascendante puis descendante.

L'écoulement d'air induit au centre du spray va donc être orienté vers le haut, comme le montre la figure 4.16 où ce flux est représenté dans une section centrale du spray. De la même manière qu'en configuration descendante, la vitesse de l'air va être maximale dans la zone de spray à proximité du point d'injection. Des boucles de recirculation de l'air vont être provoquées par la présence des parois. L'écoulement va d'abord être nettement ascendant dans la zone centrale du spray. La retombée des gouttes va provoquer un flux d'air orienté vers le bas qui va ensuite être dirigé vers le brouillard d'eau. Ce phénomène va induire une sorte de "laminage" du spray. Les gouttelettes d'eau, injectées vers le haut vont ralentir sous les effets de la force de traînée et de la gravité. Une fois leur point haut atteint, elles vont alors redescendre dans la

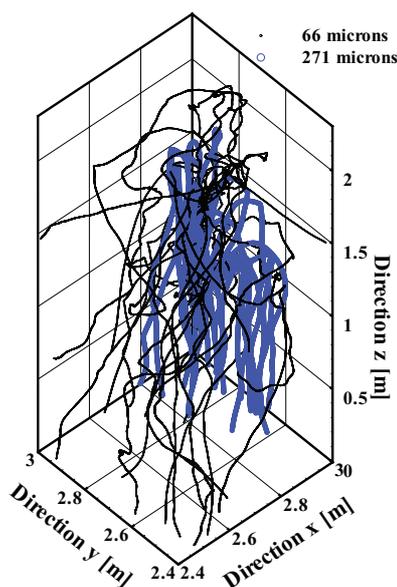


FIGURE 4.15 – Reconstruction du spray grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes

zone de spray à partir d'une vitesse nulle et même dans un air à contre-courant au centre. Le temps de séjour de ces gouttes va se trouver fortement augmenté. En effet, en appliquant les mêmes conditions de calcul que dans le cas du spray descendant, on retrouve alors un temps de résidence de 10,45 secondes en moyenne pour des particules de  $66 \mu\text{m}$  de diamètre, soit environ 10 fois plus que la configuration descendante. Pour les gouttes de  $271 \mu\text{m}$ , le temps de séjour s'élève à 1,58 seconde en moyenne, soit environ 3 fois plus que le cas descendant. Le temps de résidence a fortement augmenté dans la configuration ascendante, ce qui devrait engendrer une meilleure efficacité du spray pour l'atténuation du rayonnement infrarouge.

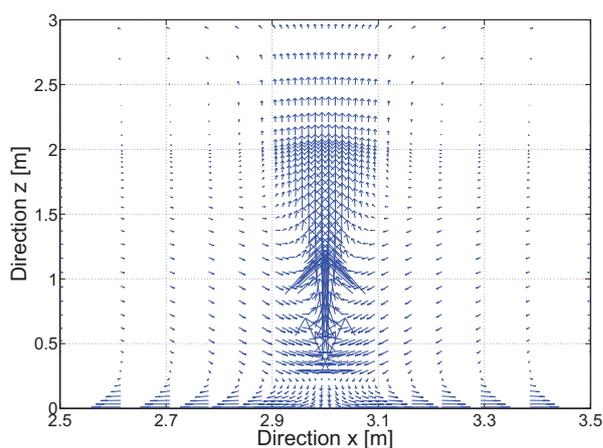


FIGURE 4.16 – Evolution de l'écoulement d'air en configuration ascendante

L'étude du diamètre de Sauter suivant deux plans situés au centre du spray (figure 4.17) montre une répartition assez homogène de celui-ci dans la zone de spray (la valeur du  $D_{32}$  étant

de  $150 \mu\text{m}$  environ). Nous remarquons également une accumulation de petites gouttes dans une zone située aux alentours de 20 cm au-dessus du point d'injection. Celles-ci sont également présentes dans tout le domaine (hors de la zone de spray), ce qui confirme les conclusions émanant de l'étude des trajectoires disant que des petites gouttes s'échappent du centre du brouillard d'eau (figure 4.15). Notons que l'étude de la fraction volumique montrera que ces petites gouttes ne sont toutefois présentes qu'en très faibles quantités à l'extérieur du spray (figure 4.20).

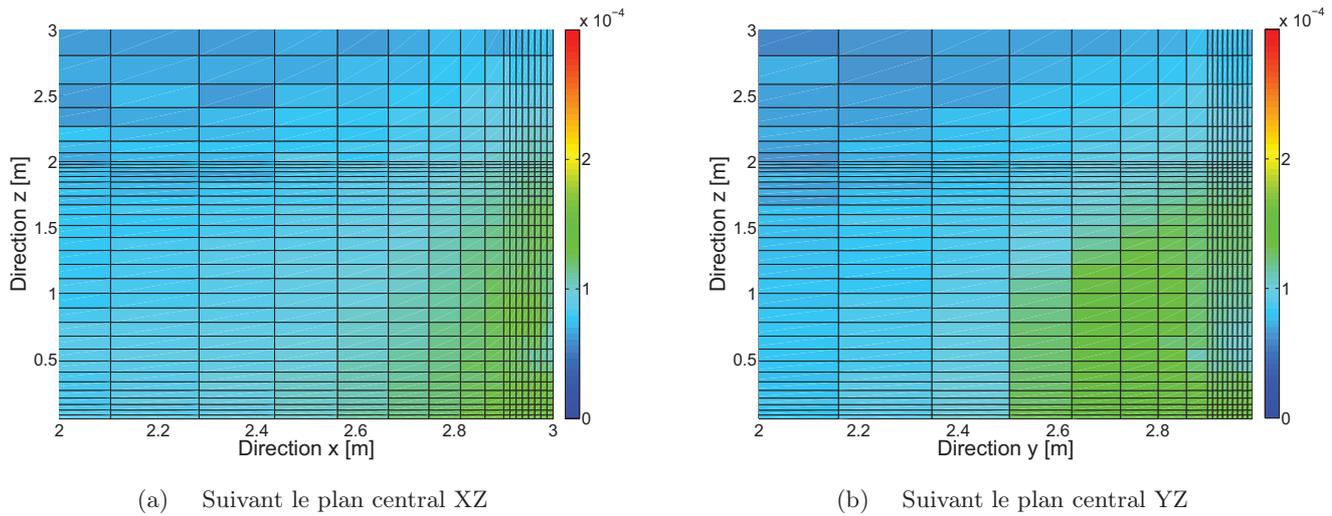
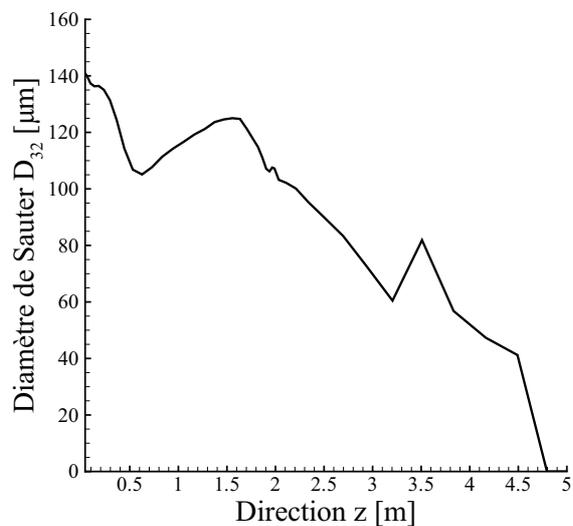


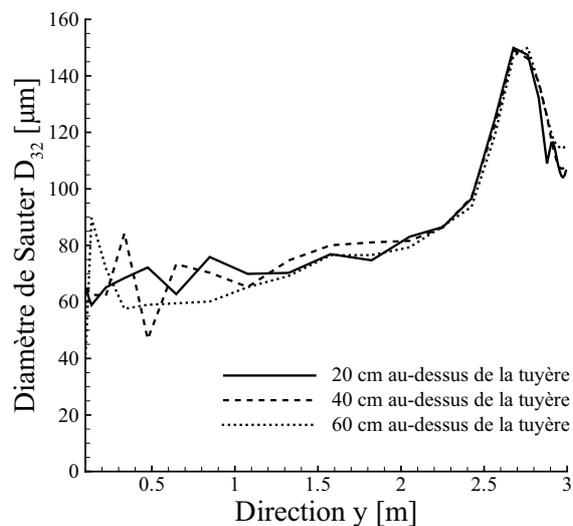
FIGURE 4.17 – Diamètre de Sauter  $D_{32}$  [ $\mu\text{m}$ ]

Les visualisations de paramètres en plein centre du spray ou suivant un axe de la section elliptique du spray sont plus difficiles à exploiter en injection ascendante du fait du double passage des gouttes dans le spray. Toutefois, une légère diminution du diamètre est observée durant les premiers centimètres du brouillard (figure 4.18(a)), expliquée par le ralentissement plus rapide des petites gouttes par rapport aux plus grosses. Puis, le diamètre augmente jusqu'à environ 1,3 m du point d'injection où nous retrouvons une présence des grosses gouttes plus importante. Comme nous pouvons également le voir sur la visualisation des trajectoires (figure 4.15), au-delà de cette distance, les gouttelettes de grands diamètres se font de plus en plus rares, d'où la diminution progressive du diamètre de Sauter. Son évolution suivant le grand axe de la section elliptique du spray est présentée sur la figure 4.18(b). Pour les trois hauteurs étudiées, la même allure de courbe est observée. Une forte augmentation du diamètre intervient d'abord en s'éloignant du centre du spray. Puis, à partir de 30 cm du point d'injection, le diamètre va diminuer jusqu'à atteindre la périphérie du brouillard d'eau.

Passons maintenant à l'étude des vitesses des deux classes de gouttes, d'une part suivant la hauteur en plein centre du spray (figure 4.19(a)) et d'autre part suivant le grand axe de la section elliptique (figure 4.19(b)). Suivant la hauteur  $z$ , une décroissance rapide de la vitesse intervient après l'injection des gouttes. En effet, comme nous venons de le voir, les gouttes sont rapidement freinées sous les effets de la force de traînée et de la gravité. Notons que dans cette configuration ascendante, l'évolution de la vitesse des particules est semblable quel que soit le diamètre de la goutte. Suivant le grand axe de la section elliptique du spray, les vitesses ont tendance à diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de son centre. De plus, pour un même diamètre de gouttes,



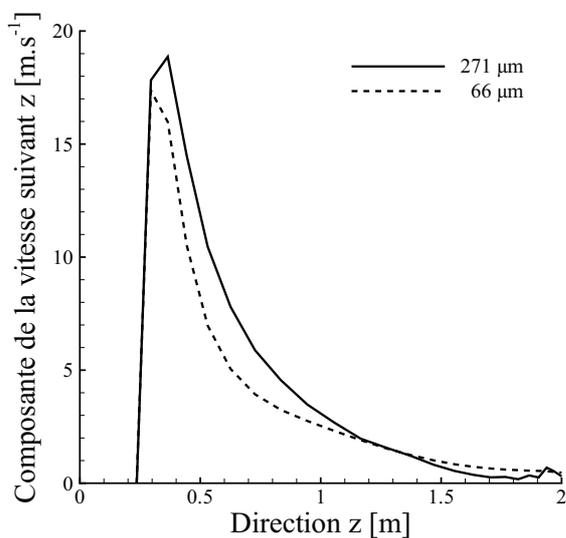
(a) Suivant la hauteur au centre du spray



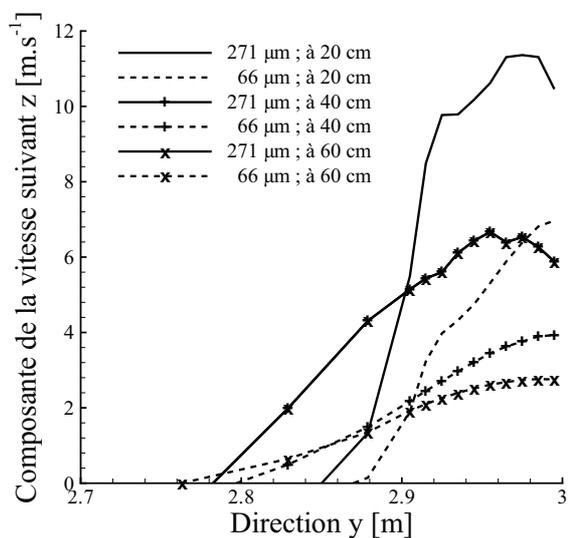
(b) Suivant le grand axe de la section du spray

FIGURE 4.18 – Diamètre de Sauter  $D_{32}$

la vitesse va logiquement diminuer lorsque la hauteur dans le brouillard augmente.



(a) Suivant la hauteur au centre du spray



(b) Suivant le grand axe de la section du spray

FIGURE 4.19 – Vitesses de deux classes de gouttes

La fraction volumique est représentée sur la figure 4.20 dans deux sections centrales du spray (suivant le plan XZ et suivant le plan YZ). Dans la zone de spray, la population de gouttes

semble plus élevée que dans le cas descendant. En effet, la fraction volumique est plus conséquente au cœur du spray et cette grandeur diminue lorsqu'on atteint la périphérie du brouillard. Sur ces représentations, les conséquences de l'effet de "laminage", phénomène dû aux boucles de recirculations de l'air environnant, sont observables. En effet, nous pouvons remarquer que cette particularité induit une légère tendance à ramener les gouttes vers le centre du spray. Un agrandissement du domaine de calcul (au départ, les dimensions du domaine était de 4 m x 2 m x 4 m) n'a eu aucune influence sur la réduction de ce phénomène. Notons que la taille du spray obtenue est plus large que dans la configuration descendante (figure 4.13).

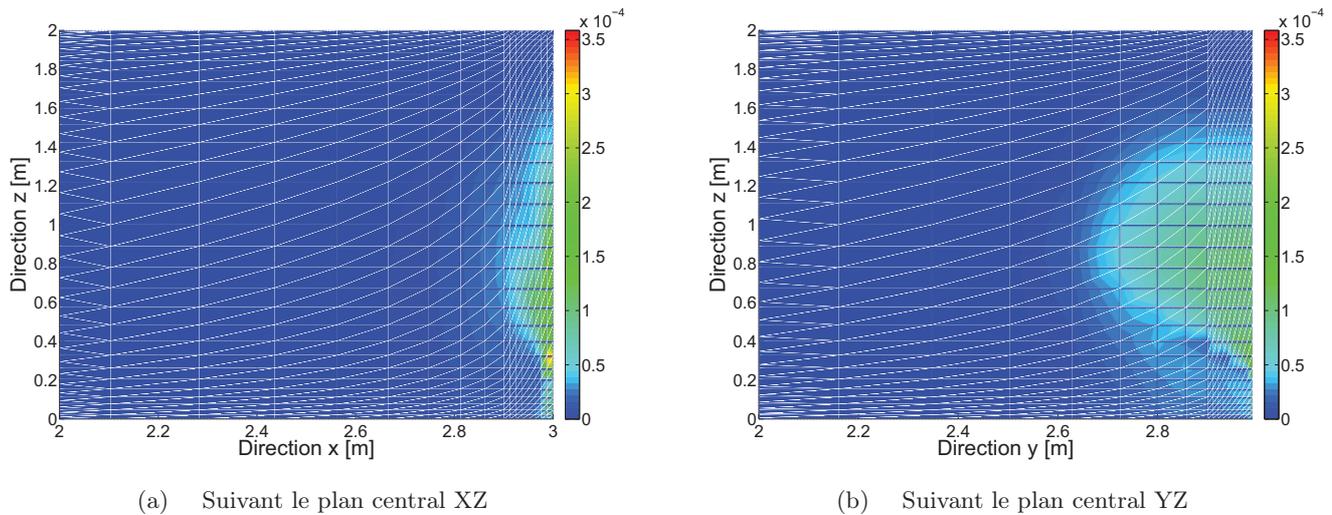


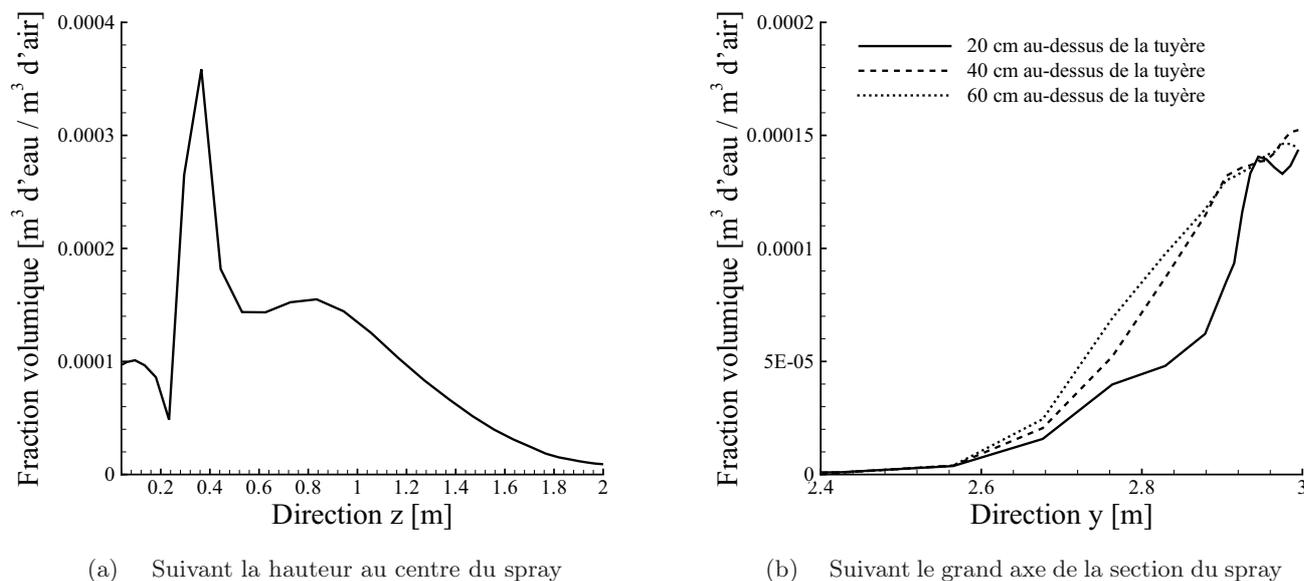
FIGURE 4.20 – Fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  d'air]

L'évolution de la fraction volumique au centre du spray en fonction de la hauteur  $z$  est visible sur la figure 4.21(a). Nous observons d'abord une forte augmentation de la fraction volumique dans les dix premiers centimètres du spray pouvant s'expliquer par cet effet de "laminage" qui ramène des gouttelettes d'eau dans cette zone. Puis la quantité d'eau locale diminue fortement et perd plus de la moitié de sa valeur maximale. A 20 cm de la buse d'injection, cette fraction volumique va commencer à baisser progressivement jusqu'à la hauteur de 2 m, hauteur maximale du spray. Suivant le grand axe de la section elliptique du spray (figure 4.21(b)), la fraction volumique diminue en s'éloignant du centre du brouillard. A 20 cm, la diminution est plus rapide qu'aux deux autres hauteurs étudiées (à savoir 40 cm et 60 cm). Pour celles-ci, l'allure de la courbe obtenue est semblable, ce qui signifie que la largeur du spray va être quasi-identique.

L'étude de la dynamique du spray ascendant vient d'être réalisée. La comparaison effectuée avec les résultats issus de la configuration descendante montre que l'injection des gouttelettes vers le haut devrait être plus efficace en terme d'atténuation du rayonnement infrarouge.

#### 4.2.4 Comparaison sur les transferts radiatifs

La comparaison entre les deux configurations d'injection va maintenant se faire au niveau des transferts radiatifs se déroulant à travers le spray.

FIGURE 4.21 – Fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  d'air]

### Diffusion du rayonnement

Une première comparaison est réalisée sur la figure 4.22 où les interactions du spray avec le rayonnement sont représentées. Chaque cercle présent dans la zone de brouillard correspond à la localisation d'un événement de diffusion pour un quanta (les autres cercles en dehors de la zone de spray correspondent majoritairement aux quanta quittant le domaine). Pour une meilleure visualisation du spray, la source émettrice a été étendue sur toute la hauteur du brouillard, ce qui explique la présence d'un rectangle noir sur la surface en  $x = 3$  m pour le spray descendant (et  $x = 6$  m pour le spray ascendant). Cette zone correspond aux quanta transmis à travers le spray et quittant le domaine. En dehors de cette surface, les autres cercles sont représentatifs de quanta qui ont subi un événement de diffusion les déviant plus fortement de leur direction initiale. Notons que la simulation pour obtenir cette figure a été réalisée à une longueur d'onde de  $2 \mu\text{m}$  où la diffusion est dominante. Cette représentation est une alternative pour visualiser le spray à travers l'impact qu'il engendre d'un point de vue radiatif.

Les mêmes conditions de lancer des quanta ont été appliquées dans les deux cas (nombre de quanta lancés, angles d'émission et de réception, surfaces d'émission et de réception, longueur d'onde). Le nombre d'événements de diffusion est plus important dans le cas ascendant (figure 4.22), signe que les interactions gouttes-rayonnement sont plus nombreuses (on peut donc légitimement s'attendre à une meilleure efficacité). La zone d'interaction avec le rayonnement est plus large en configuration ascendante. D'ailleurs, les événements de sortie en dehors du rectangle de réception sont beaucoup plus nombreux en spray ascendant, signe encore d'une efficacité plus importante dans ce cas. Nous pouvons alors nous attendre à une meilleure atténuation du rayonnement dans le cas de la stratégie de pulvérisation ascendante.

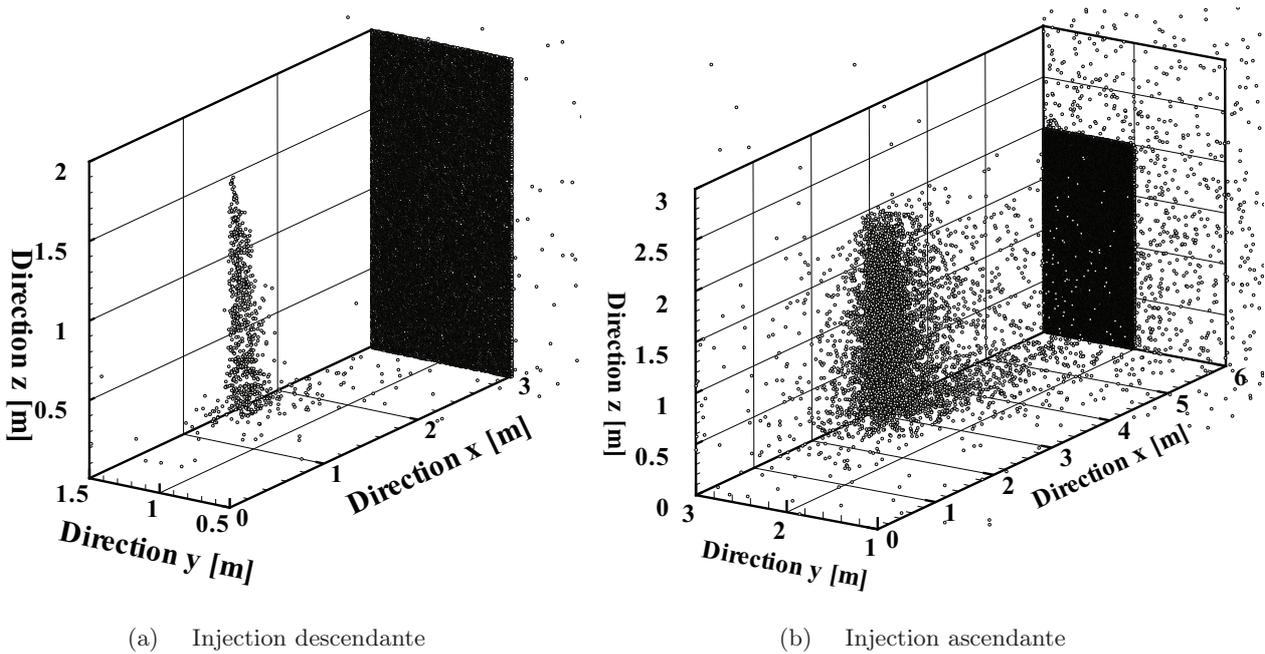


FIGURE 4.22 – Visualisation des événements de diffusion et de sortie des quanta

### Épaisseur optique

L'étude de l'épaisseur optique va confirmer les meilleures performances d'un spray ascendant. Elle permet de visualiser la zone où le spray va interagir avec le rayonnement. Ce paramètre est basé sur le coefficient d'extinction  $\beta$  et est défini par la relation suivante :

$$\tau = \int_0^x \beta(x') dx' \quad (4.5)$$

Dans les deux configurations étudiées, cette épaisseur optique est estimée de manière cumulative suivant l'axe de lancer des quanta (c'est-à-dire l'axe des  $x$  croissants) en plein centre du spray. Elle est évaluée à différentes hauteurs dans le spray à une longueur d'onde de  $2 \mu\text{m}$  et elle est représentée sur la figure 4.23. Dans les deux cas, la rapide augmentation désigne l'endroit où le rayonnement incident va "croiser" le spray, ce qui donne une indication sur la taille du brouillard. D'ailleurs, la zone de croissance est beaucoup plus large en configuration ascendante. A 20 cm de l'injection, la différence entre le spray descendant et ascendant équivaut à un facteur supérieur à 4 en faveur du cas ascendant. Cet écart est une conséquence du comportement des gouttes. En effet, comme nous l'avons expliqué dans la section 4.2.3, la dynamique du brouillard engendre un temps de séjour des gouttes dans la zone de spray plus important dans le cas ascendant, ce qui va contribuer à une meilleure efficacité dans cette configuration. Nous pouvons également remarquer qu'à une distance de 140 cm au-dessus du point d'injection (1,7 m du sol), le niveau atteint est encore supérieur au niveau maximum obtenu pour le spray descendant.

Étudions maintenant la façon dont l'épaisseur optique varie avec la hauteur dans chacune des deux configurations. Dans le cas du spray descendant, peu de différences existent entre les épaisseurs optiques calculées à 20 cm, 40 cm, 60 cm et 80 cm du point d'injection. Nous pouvons tout de même noter que le niveau maximal est atteint à 40 cm de la buse. Dans la configuration ascendante, les différences d'épaisseur optique suivant la hauteur dans le spray sont flagrantes,

le niveau maximal étant atteint à 40 cm au-dessus du point d'injection. En comparant avec le cas descendant, les valeurs obtenues restent toujours plus élevées.

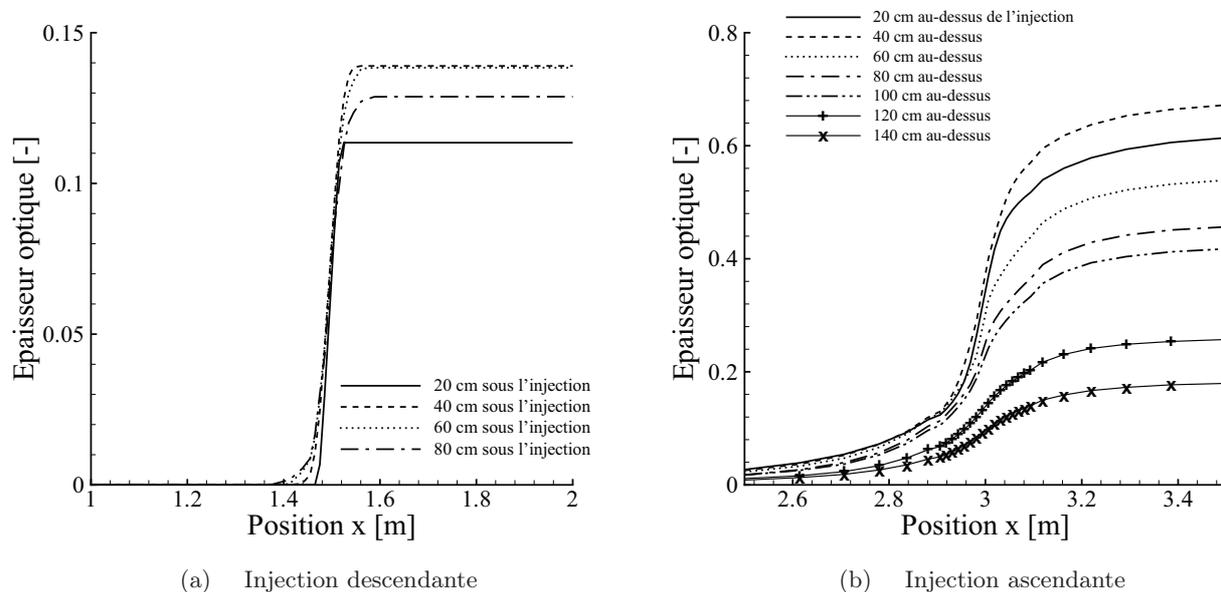


FIGURE 4.23 – Épaisseur optique

### Transmittance spectrale

Nous allons à présent comparer les transmissions spectrales dans l'infrarouge obtenues dans les deux configurations. Les transferts radiatifs se font suivant le petit axe de la section elliptique du spray. Les paramètres d'entrée du code de calcul numérique ont été calqués sur les conditions expérimentales (la source de rayonnement utilisée est l'Infraline, section 3.1). Afin de réduire les temps de calcul, l'angle maximal d'émission des quanta a été fixé à  $20^\circ$  (l'étude de sensibilité justifiant ce choix est effectuée dans la section B.1.2 de l'annexe B). Cet angle a été fixé lors du calcul sur la configuration descendante. Il permet de cibler le lancement des quanta seulement sur la zone de spray (en dehors de cette zone, les quanta ne peuvent être diffusés et ne peuvent donc pas atteindre la surface de réception située juste en face). Pour avoir les mêmes conditions dans les deux cas, le même angle a été conservé dans le cas du spray ascendant. La figure 4.24 représente les transmissions spectrales obtenues à 80 cm du point d'injection en fonction du nombre d'onde dans les deux stratégies de pulvérisation. La variation quasi-monotone des courbes est une conséquence de l'atténuation peu variable des gouttes avec le nombre d'onde. Les deux pics présents près de  $1500\text{ cm}^{-1}$  et près de  $3800\text{ cm}^{-1}$  sont dus à la vapeur d'eau. Signalons que les bandes de vapeur sont plus marquées dans le cas du spray ascendant du fait d'une plus grande évaporation et par conséquent une production de vapeur d'eau plus élevée. La pente observée sur les courbes de transmissions est due à une modification du caractère anisotrope de la diffusion quand le nombre d'onde augmente. En effet, le paramètre de taille des gouttes augmente avec le nombre d'onde, ce qui s'accompagne d'une augmentation de l'anisotropie de la diffusion (la fonction de phase devient plus pointue et favorise la diffusion vers l'avant). Ce phénomène est plus marqué dans le cas du spray ascendant car le rôle de la diffusion y est plus important du fait

d'un temps de séjour des gouttelettes d'eau plus élevé. Ces courbes apportent la confirmation des suppositions avancées lors des paragraphes précédents : la transmission est beaucoup plus faible dans le cas du spray en configuration ascendante. En comparant en terme d'atténuation, celle déduite pour l'injection ascendante à 80 cm de la buse est quasiment 3 fois plus grande que celle du spray descendant dans les mêmes conditions. Conformément aux conclusions développées sur la dynamique du spray, l'efficacité du brouillard est meilleure en spray ascendant.

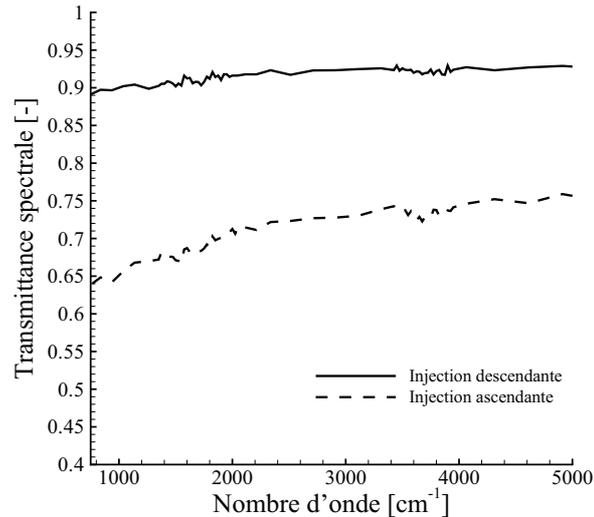


FIGURE 4.24 – Comparaison des transmissions spectrales à 80 cm du point d'injection en configuration descendante et ascendante

Dans chacune des deux configurations, le spray a été caractérisé grâce aux transmissions spectrales à différentes hauteurs du point d'injection sur la figure 4.25. La source d'émission et la zone de réception restent toujours placées dans l'axe central du brouillard. Les distances données en légende représentent la position de mesure à partir de la buse d'injection (dans le cas du spray descendant, nous serons placés sous la tuyère et dans le cas du spray ascendant, nous serons au-dessus). Comme nous pouvions nous y attendre, les variations observées sont similaires à celles obtenues lors de l'étude de l'épaisseur optique. Dans le cas du spray descendant, la transmission spectrale évolue peu en fonction de la hauteur. Cette tendance est confirmée par l'étude de la dynamique du spray. En effet, la fraction volumique (figure 4.14(a)) et le diamètre de Sauter (figure 4.11(a)) varient peu dans cette zone. En terme d'atténuation, la valeur moyenne obtenue est d'environ 10 %. La baisse du diamètre de Sauter, visible dans cette zone (figure 4.11(a)) favorise généralement une meilleure atténuation du rayonnement mais la trop forte baisse de la fraction volumique (figure 4.14(a)) ne permet pas de profiter de ce phénomène. Le spray en configuration descendante possède une structure homogène au niveau de la dynamique, permettant ainsi une interaction avec le rayonnement constante (pour des mesures centrées dans le spray).

Dans le cas ascendant, le niveau de transmission est très variable suivant la hauteur d'étude dans le spray. L'atténuation maximale est atteinte pour une hauteur de 40 cm au-dessus du point d'injection et elle a une valeur d'environ 35 %. Ce niveau diminue progressivement au fur et à mesure que nous montons dans le brouillard. Ce résultat est en accord avec la dynamique du spray. En effet, à 40 cm de la buse, nous avons un pic de fraction volumique (figure 4.21(a)) et une baisse du diamètre de Sauter (figure 4.18(a)). Au-delà de 40 cm de la tuyère, la fraction vo-

lumique diminue progressivement et le diamètre de Sauter augmente (jusqu'à 1,3 m de la buse), ce qui ne favorise pas les phénomènes d'interaction des gouttes avec le rayonnement. Tout ceci explique l'augmentation de la transmission spectrale à partir de 40 cm au dessus de la tuyère. Nous pouvons tout de même remarquer que le niveau d'atténuation à 140 cm de la buse dans le cas du spray ascendant est toujours inférieur à la valeur maximale atteinte dans la configuration descendante. L'intérêt du spray ascendant en tant que bouclier radiatif est de nouveau démontré.

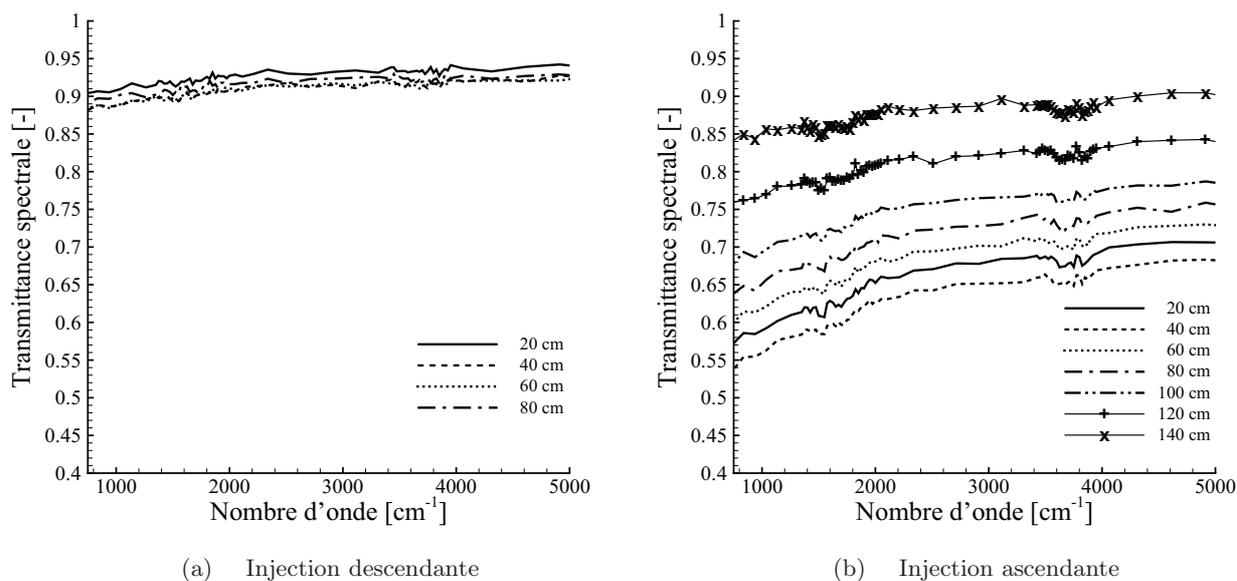


FIGURE 4.25 – Transmissions spectrales calculées à différentes hauteurs

La capacité du spray ascendant à mieux atténuer le rayonnement infrarouge que l'injection descendante a été confirmée numériquement, les conditions d'injection étant gardées constantes dans les deux configurations. La comparaison entre les deux cas a été effectuée dans un premier temps au niveau de la dynamique du spray puis au niveau du rayonnement. D'ailleurs, un fort lien a été mis en évidence entre les transferts radiatifs et la dynamique du brouillard d'eau. Il apparaît clairement que la direction d'injection ascendante des gouttelettes d'eau conduit à une meilleure utilisation du spray en tant que bouclier radiatif.

### 4.3 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

Les résultats numériques sont à présent confrontés à des mesures expérimentales. Le dispositif utilisé a été détaillé dans la section 3.1. L'ensemble des mesures données au cours de ce paragraphe a été obtenu en utilisant l'Infraline comme source de rayonnement. La figure 4.26 présente une comparaison numérique et expérimentale entre les configurations descendante et ascendante pour une position située à 80 cm du point d'injection suivant l'axe central du spray. Les différents symboles correspondent aux données de transmission obtenues par la caméra infrarouge pour trois nombres d'ondes distincts (figure 3.2). D'un point de vue numérique, les conclusions ont

déjà été apportées dans la section 4.2.

Dans le cas descendant, les résultats numériques et expérimentaux sont en parfait accord. En revanche, une différence non négligeable existe pour le spray ascendant. Dans le cas descendant, notre méthode nous a garanti l'obtention de la bonne granulométrie tandis que le débit (donc la quantité d'eau) est une donnée issue de la mesure ; l'accord était donc attendu. L'écart en ascendant est probablement imputable à une prévision discutable de la granulométrie. En effet, la même granulométrie a été injectée numériquement en descendant et en ascendant alors qu'on peut penser que l'on a en fait, en réalité, un fractionnement différent du film liquide lors d'une stratégie ascendante (engendrant la formation de gouttes selon une distribution différente). Ce fractionnement effectué dans une direction inverse à la force gravitationnelle va engendrer des gouttes plus grosses dans une dynamique moins rapide. Il serait intéressant d'effectuer des mesures granulométriques d'un spray en configuration ascendante. Pour des raisons de dimensions du dispositif de mesure de la granulométrie, seule la distribution en taille de gouttes du spray en configuration descendante a été mesurée. C'est pourquoi numériquement, la même distribution a été utilisée dans les deux configurations. Par conséquent, la simulation dans le cas ascendant prend en considération des gouttes probablement plus petites que dans la réalité, d'où la différence entre les transmissions.

Au niveau expérimental, la différence entre l'injection descendante et ascendante est confirmée. Les bandes de vapeur d'eau sont plus marquées que sur les courbes numériques. L'amplitude de ces pics est d'ailleurs difficilement comparable en raison d'une résolution spectrale différente entre numérique ( $25 \text{ cm}^{-1}$  pour les bandes de vapeur d'eau) et expérimental ( $4 \text{ cm}^{-1}$ ). De plus, nous n'avons pas connaissance du taux d'humidité régnant dans la salle d'expérimentations, d'où des conditions initiales sans spray différentes de l'expérimental. L'atténuation due à la vapeur d'eau est également plus marquée dans le cas ascendant (phénomène déjà observé d'un point de vue numérique dans le paragraphe 4.2.4), en raison d'une évaporation plus importante provoquée par un temps de séjour des gouttelettes d'eau dans le milieu plus conséquent.

La pente des courbes de transmission est plutôt bien prédite par le calcul numérique. La présence d'une inclinaison plus marquée au niveau de la configuration ascendante, due au phénomène de renforcement par diffusion, est également bien représentée. Notons tout de même une différence plus marquée dans les grands nombres d'onde où le rôle des petites gouttes dans la diffusion est plus important.

Les données de transmissions obtenues par caméra infrarouge (symboles + et ×) correspondent bien aux données obtenues par le spectromètre. Il y a globalement bonne concordance entre toutes les techniques d'investigation proposées.

Sur la figure 4.27 sont comparées les données de transmissions expérimentales et numériques pour l'injection descendante à différentes hauteurs. Un très bon accord existe toujours entre les deux méthodes, signe d'une simulation correcte de la dynamique du rideau dans son ensemble.

Les mesures de transmissions spectrales pour l'injection ascendante à différentes hauteurs dans le spray sont représentées sur la figure 4.28(a). Une nette différence (environ 10%) existe entre les transmissions expérimentales et numériques. L'explication, déjà formulée précédemment, proviendrait d'un fractionnement en gouttes différent en configuration ascendante. La distribution granulométrique injectée n'est probablement pas réaliste et la prédiction des tailles de gouttes est globalement trop faible, d'où une atténuation surestimée. Nous verrons au chapitre 5 que nous avons vérifié la validité de cette explication en rampes. Au niveau expérimental, les valeurs de transmissions obtenues à différentes hauteurs sont assez proches les unes des autres (excepté à 120 cm du point d'injection) avec une valeur moyenne tournant autour de 76%. En revanche, le brouillard simulé numériquement semble moins homogène. En effet, les transmis-

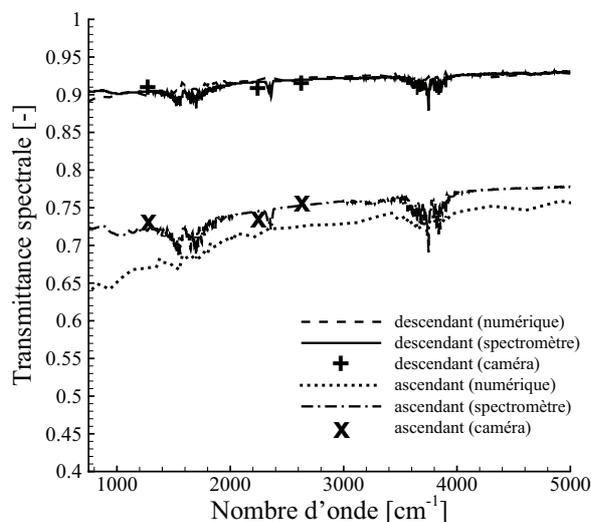


FIGURE 4.26 – Comparaison des transmissions spectrales numériques et expérimentales à 80 cm du point d'injection

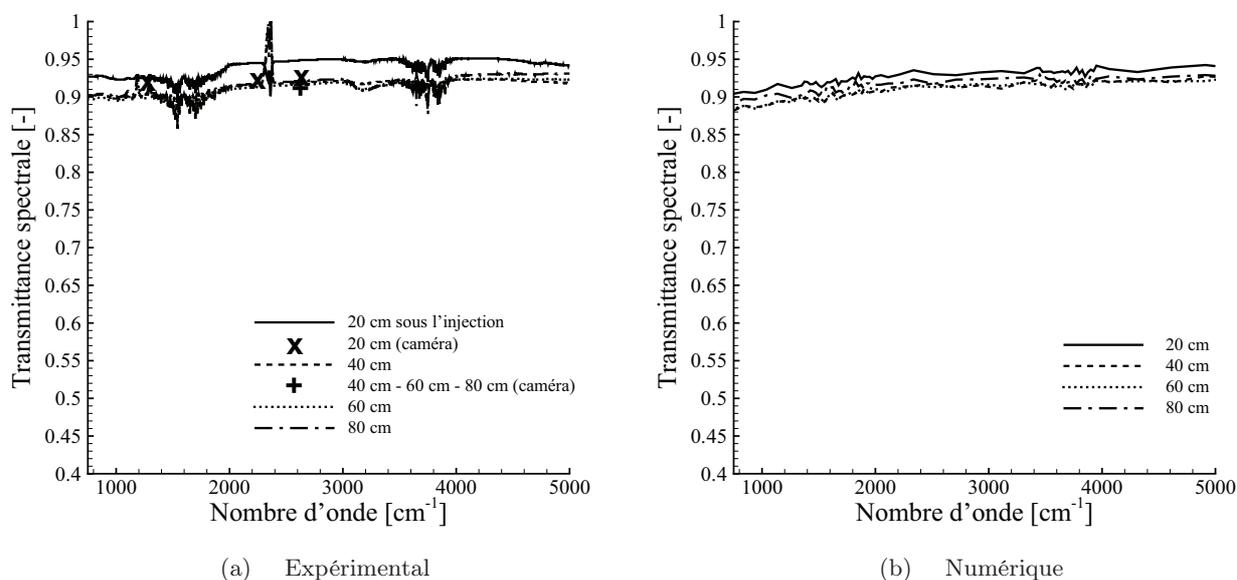


FIGURE 4.27 – Transmissions spectrales à différentes hauteurs pour l'injection descendante

sions s'échelonnent entre 63% en moyenne à 40 cm de la buse et 75% à une position de 100 cm au-dessus de la tuyère. Ensuite, celui-ci remonte progressivement jusqu'à 120 cm de la buse. La pente des courbes de transmissions est plus forte dans la prédiction numérique, signe d'une présence de petites gouttes plus importante que dans la réalité.

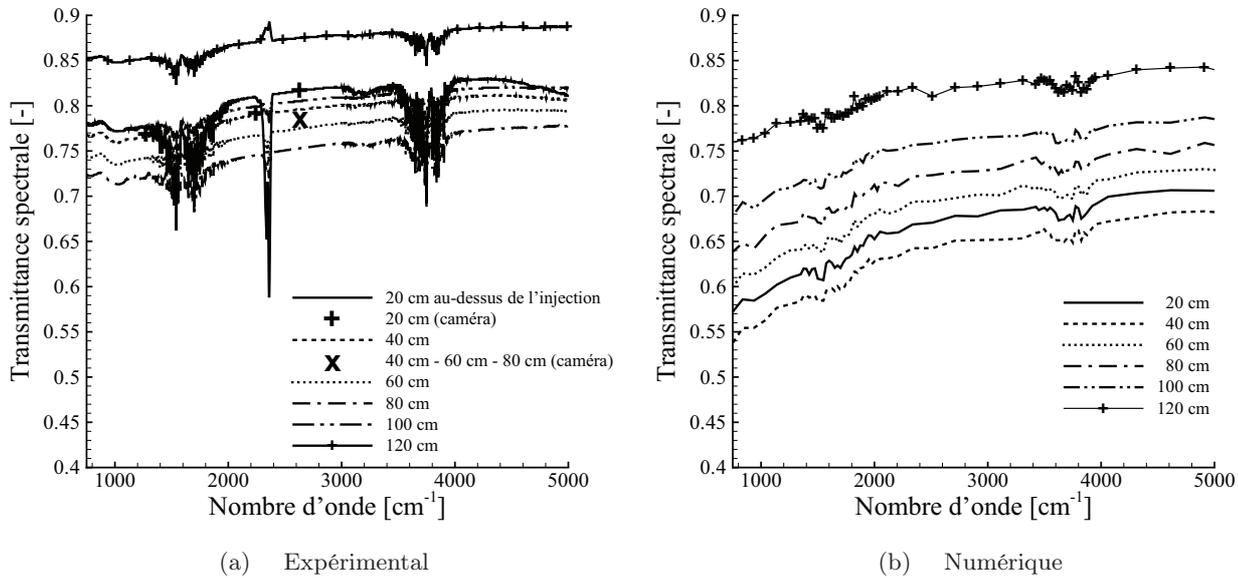


FIGURE 4.28 – Transmissions spectrales à différentes hauteurs pour l’injection ascendante

### 4.3.1 Bilan

Ce chapitre a permis de comparer deux stratégies de pulvérisation, descendante et ascendante, d’un point de vue numérique et expérimental. La capacité d’atténuation du brouillard lorsque les gouttes sont éjectées vers le haut est bien meilleure que dans une configuration descendante classique (un facteur 3 existe en terme d’atténuation en faveur de la configuration ascendante). Dans le cas descendant où nous maîtrisons bien la distribution granulométrique à injecter, un très bon accord a été trouvé entre les transmissions spectrales numériques et expérimentales permettant ainsi la validation de notre code de calcul. En revanche, des différences existent dans le cas ascendant. Celles-ci sont à priori dues à un fractionnement des gouttelettes d’eau s’effectuant dans une dynamique plus lente engendrant ainsi une distribution granulométrique différente (pour des raisons déjà explicitées, la distribution granulométrique n’a pas été mesurée en injection ascendante). Dans chacun des cas, un fort lien entre la dynamique du spray et les transferts radiatifs a été mis en évidence. Dans le chapitre suivant, afin de se rapprocher de situations plus réelles, les rideaux d’eau générés par des buses placées en rampes sont étudiés.

## Chapitre 5

# Configurations en rampes

Une configuration de brouillard d'eau en rampe consiste à associer plusieurs tuyères d'injection afin d'obtenir un véritable rideau de protection face au rayonnement thermique issu d'une forte source de chaleur. L'avantage d'un tel dispositif, comparé à une injection unique, réside dans le recouvrement des différents sprays de la rampe engendrant ainsi une quantité d'eau au cœur du rideau plus importante. Plusieurs stratégies de pulvérisation en rampes sont étudiées lors de ce chapitre.

Dans un premier temps, les rampes munies d'injections en configuration descendante sont analysées. Le dispositif expérimental mis en place permettant l'étude de ce système de protection, une comparaison avec les résultats numériques issus de la modélisation est effectuée. L'influence de certains paramètres, notamment l'angle d'injection et l'espacement entre les buses, fournit des pistes d'optimisation de ces systèmes de protection. Enfin, pour se rapprocher de situations plus réelles d'un point de vue radiatif (jusqu'alors, les dispositifs étudiés se trouvaient dans des configurations en situation de transmission directe), les différentes stratégies de pulvérisation sont étudiées dans le cas d'un scénario de source étendue du type panneau rayonnant.

La deuxième section de ce chapitre est consacrée à l'étude de rampes munies de pulvérisations ascendantes, les gouttes étant alors injectées vers le haut. Les analyses dynamiques et radiatives permettent de comprendre les améliorations au niveau de la capacité d'atténuation (en comparant au cas descendant) apportées par ce genre de systèmes. Les études réalisées sont similaires à celles effectuées dans le cas descendant (influence de l'angle d'injection, de l'espacement entre tuyères, scénario radiatif de type panneau rayonnant).

La dernière configuration en rampes concerne une stratégie dite "impactante" qui consiste à diriger le rideau d'eau vers la cible à protéger. Plusieurs régimes d'impact existent selon la taille des gouttes injectées, leurs vitesses ou encore le type de paroi utilisée et sa température. La première étape constitue donc en une étude, à la fois numérique et expérimentale, des différents régimes d'impact rencontrés en conservant les mêmes conditions d'injection que pour le cas descendant et ascendant. Puis, une étude radiative va permettre d'estimer la capacité d'atténuation d'un tel dispositif.

Finalement, une comparaison est réalisée entre les trois stratégies dans des conditions d'injection identiques. Cette étude permet alors de dégager les meilleures configurations possibles pour un système de protection contre une forte source de chaleur.

## 5.1 Rampes descendantes

### 5.1.1 Cas de référence

La configuration de référence choisie comprend une rampe de tuyères TP400067 (les caractéristiques de cette buse d'injection sont présentées dans le tableau 4.3), espacées de 10 cm et utilisées sous une pression d'alimentation de 4 bars. Les raisons concernant le choix de la buse et de la pression on déjà été exposées dans le chapitre 4.

#### Présentation du cas de référence

Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans le chapitre 3. Brièvement, la rampe est constituée de sept tuyères TP400067. L'émission du rayonnement est réalisée par un corps noir de dimensions 30 cm par 35 cm chauffé à 773 K. Un spectromètre à transformée de Fourier, placé en face du corps noir, analyse le signal reçu. Une mesure de transmission spectrale peut être déduite grâce à deux acquisitions : une en présence du rideau et une autre sans activation de la rampe. Une illustration de la rampe a déjà été présentée sur la figure 3.1.

Numériquement, l'étude de systèmes en rampes est avantageuse car le problème présente plusieurs plans de symétrie permettant ainsi de diminuer fortement le nombre de mailles du domaine (provoquant par la même occasion une baisse des temps de calcul par rapport à une simulation en spray unique, section 4.2.3). La figure 5.1 schématise le domaine numérique utilisé. Deux plans de symétries sont pris en compte (plans XZ), l'un passant par la buse d'injection, l'autre se trouvant au milieu de la distance séparant deux buses consécutives. Du point de vue de la dynamique du spray, un autre plan de symétrie existe ; celui-ci concerne un plan YZ passant également par la tuyère et permettant ainsi de ne simuler qu'un quart du problème (une opération de recopiage est effectuée afin d'avoir une simulation complète du domaine suivant l'axe  $\vec{e}_x$  nécessaire pour le calcul des transferts radiatifs à travers le rideau d'eau). Les autres frontières du domaine sont considérées comme des parois. Les dimensions du domaine pour le cas de référence en rampe descendante sont alors de 3 m x 0,05 m x 3 m. Un maillage structuré et non uniforme, resserré dans la zone de spray et près des parois et comprenant 48 x 5 x 40 cellules, est utilisé (figure 5.2). Le point d'injection se situe aux coordonnées (1,5 m ; 0,05 m ; 1,5 m). Le spray simulé est généré sous une pression d'alimentation de 4 bars par une tuyère TP400067 (pour des raisons de mesures de granulométrie du spray présentées dans le paragraphe 4.1.3, cette pression a été définie comme notre pression de référence). Initialement, le domaine est à une température de 291 K et une humidité de 60 % (8 g d'eau/kg d'air). Afin de reproduire numériquement l'ensemble de la rampe expérimentale, un procédé de recopiage des différentes caractéristiques du spray est effectué. En ce qui concerne les transferts radiatifs à travers le rideau d'eau, la surface émettrice est identique au corps noir étendu utilisé expérimentalement alors que la zone de réception est calquée sur les caractéristiques du spectromètre (voir chapitre 3).

#### Analyse des résultats

Tout d'abord, l'association de plusieurs pulvérisations en rampe permet de former un rideau plus efficace contre le rayonnement infrarouge grâce à une augmentation de la quantité d'eau par rapport à une injection en spray unique étudié dans le chapitre 4. Par conséquent, obtenir une meilleure atténuation dans le cas de la rampe est logique. Les niveaux de transmissions obtenus pour les deux configurations sont présentés en fonction du nombre d'onde sur la figure 5.3. La mesure est effectuée à une position de 80 cm du point d'injection. Dans ce cas précis, l'atténuation

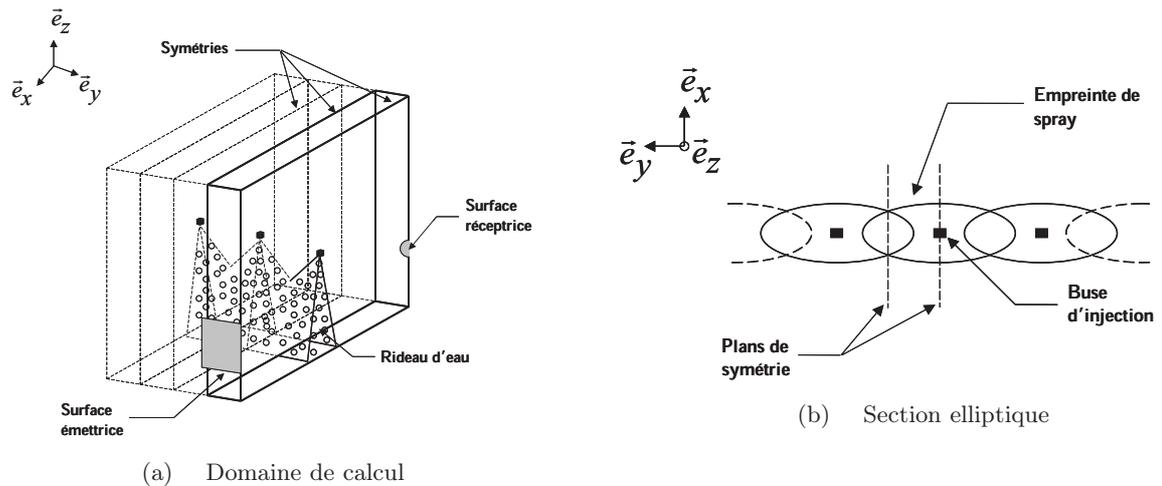


FIGURE 5.1 – Schéma de principe dans une configuration en rampe descendante

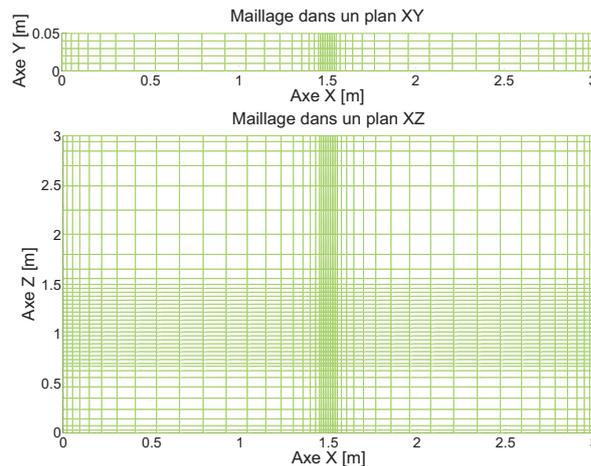


FIGURE 5.2 – Maillage utilisé dans le cas d'une rampe descendante

est doublée en faveur de la configuration en rampe. Comme cela a déjà été expliqué lors de l'étude en spray seul, la variation quasi-monotone des courbes est due à l'atténuation régulière par les gouttes tandis que la vapeur d'eau produit des pics d'absorption dans des gammes de longueurs d'onde spécifiques.

Les courbes numériques ont été superposées aux données de transmissions expérimentales. Nous obtenons un bon accord entre les deux méthodes permettant ainsi de valider l'utilisation du code de simulation dans une configuration d'injection en rampe, l'écart entre numérique et expérimental étant acceptable. Travailler dans un domaine de calcul réduit et procéder à un recopiage permet une simulation correcte d'un rideau d'eau dans une configuration en rampe (en attestent les courbes de transmittances des figures 5.3 et 5.8(b)) avec un gain considérable en temps de calcul. L'analyse plus en détail des transmittances spectrales montrent une légère différence au niveau de la reproduction numérique de la pente des courbes. La granulométrie injectée étant correcte, comme le montrent les courbes obtenues en spray seul, la différence provient d'une dynamique légèrement différente au sein du spray. Une transmission inférieure

et une pente de la courbe plus marquée sont les signes d'une présence de petites gouttes plus importante dans la zone de spray visée. Quant aux bandes de vapeur d'eau, leurs simulations sont correctes. Toutefois, leurs amplitudes varient du fait d'une résolution différente que ce soit en expérimental ( $4 \text{ cm}^{-1}$  pour le spectromètre) ou en numérique ( $25 \text{ cm}^{-1}$ ).

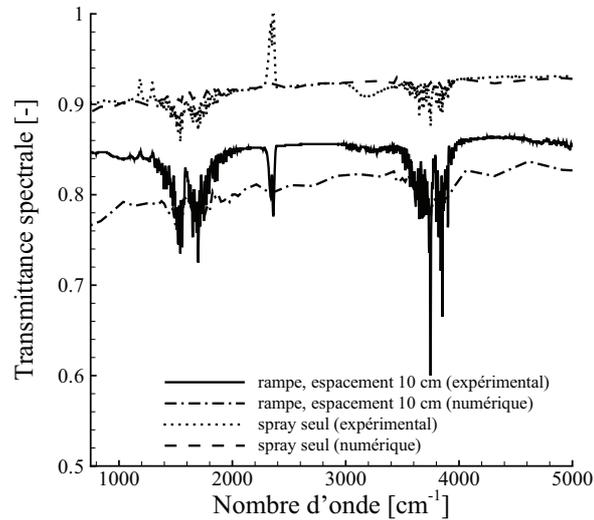


FIGURE 5.3 – Comparaison des transmittances spectrales entre un spray unique et une rampe à 80 cm du point d'injection

Le gain en atténuation lors de l'association de plusieurs injections s'explique grâce à l'étude numérique de la dynamique des gouttes. Comme nous avons pu le constater lors du chapitre précédent, deux principales caractéristiques du spray influencent fortement son efficacité face au rayonnement : la fraction volumique en eau et le diamètre des gouttes. Sur les figures 5.4 et 5.5 sont représentées respectivement la fraction volumique et le diamètre de Sauter dans plusieurs coupes du rideau (plans XY) à différentes distances du point d'injection (une coupe proche de l'injection, un autre à mi-hauteur et une dernière proche de la paroi inférieure). Ces visualisations permettent de rendre compte de l'épaisseur du rideau faisant barrière au rayonnement (rappelons que celui-ci se propage suivant la direction  $x$ ). Comme attendu, la fraction volumique est plus forte que dans le cas d'un spray unique (de l'ordre de 2 à 3 fois supérieure suivant les zones). Logiquement, le rideau s'élargit au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection avec une fraction volumique plus importante au centre de celui-ci. Remarquons tout de même une particularité intéressante de la configuration en rampe : la fraction volumique est plus élevée dans la zone située entre deux buses consécutives, là où le recouvrement entre sprays intervient (signalons que cela ne correspond pas au maximum de fraction volumique dans le rideau. Il se situe évidemment à l'injection comme nous le verrons par la suite sur la figure 5.12). On soupçonne que cette accumulation est une conséquence numérique d'un cas lancé avec toutes les symétries qui "brident" le spray dans un domaine réduit. Il est probable que des variations locales ou temporelles entre buses induisent une rupture de cette symétrie et une plus grande homogénéité (au-delà du travail réalisé ici, cela pourrait être l'objet de tests et comparaisons supplémentaires). En ce qui concerne les diamètres de gouttes, la composition du rideau est similaire à celui d'un spray unique. En effet, les petites gouttes se retrouvent piégées au centre du brouillard par les plus grosses particules, localisées par conséquent à la périphérie du rideau.

Nous pouvons remarquer que des petites gouttes sont présentes dans l'ensemble du domaine, signe que quelques particules s'échappent de notre spray et suivent le champ d'écoulement fluide. La fraction volumique dans ces zones hors spray est négligeable (même quasi-inexistante au vu des figures 5.4). Notons également qu'en se rapprochant du sol, une homogénéisation du diamètre est observée.

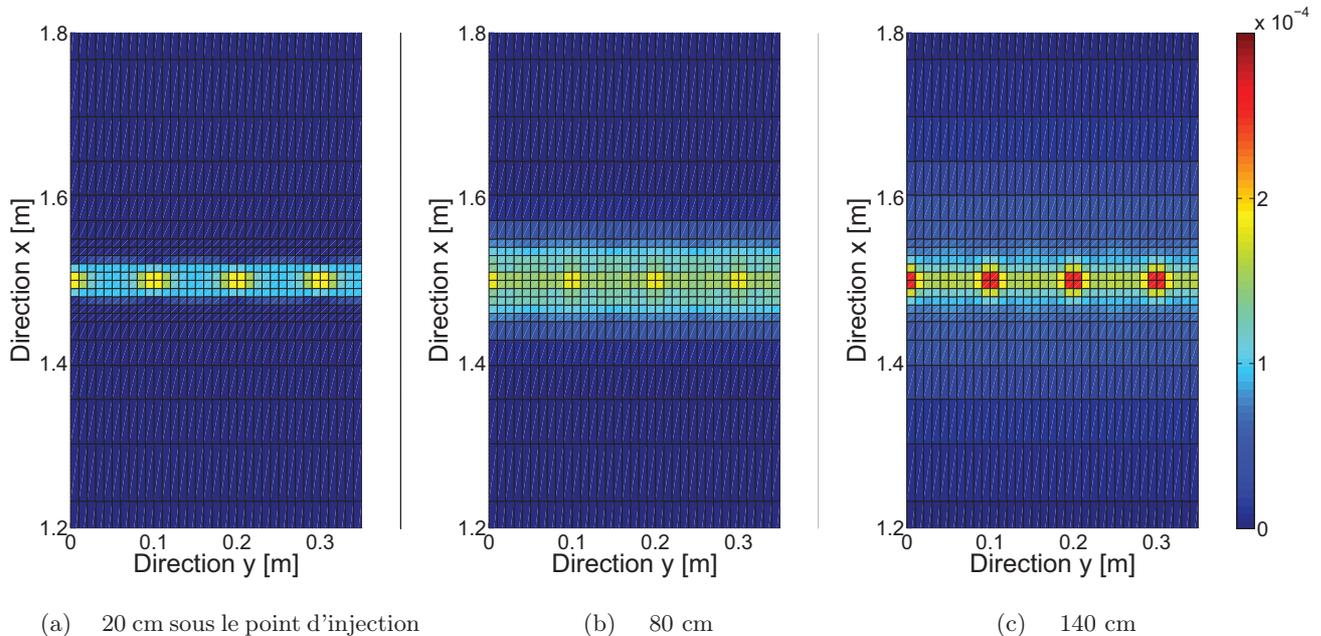


FIGURE 5.4 – Evolution de la fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau /  $\text{m}^3$  d'air] dans plusieurs sections du rideau

Les conclusions sur la répartition des gouttes en sein du rideau se retrouvent évidemment au niveau de l'étude de leurs trajectoires sur la figure 5.6. Les deux classes utilisées correspondent à des diamètres de  $66 \mu\text{m}$  et  $271 \mu\text{m}$  (elles représentent les particules les plus petites et les plus grosses de la polydispersion simulée). L'ensemble des gouttes tombent au sol avec des trajectoires monotones sous les effets de la gravité et de la force de traînée. La dispersion turbulente a peu d'influence sur les particules quelle que soit leur taille. Les grosses gouttes possèdent une forte inertie et vont donc se retrouver rapidement au sol. Le comportement des petites particules contraste avec celui qu'elles avaient en spray unique (figure 4.8). En effet, leurs trajectoires sont beaucoup plus directes. L'explication provient de la turbulence du fluide qui influence le mouvement des gouttes. La prise en compte de ce phénomène se base sur le calcul d'une vitesse instantanée du fluide résultant de la somme d'une vitesse moyenne et d'une fluctuation (section 1.2). L'énergie cinétique turbulente a été évaluée et elle est similaire dans les deux cas. Par conséquent, la turbulence a la même influence en spray seul et en rampe. En revanche, la vitesse moyenne de la phase continue est plus importante dans le cas d'un rideau généré par une rampe, comme le montre la figure 5.7(a) où la composante suivant  $z$  de la vitesse de l'air est représentée en fonction de la hauteur au centre du spray. Dans la zone du rideau, cette vitesse peut être doublée en faveur du cas en rampe (du fait de l'interaction entre les flux d'air générés par les différentes injections). Remarquons également un maximum de vitesse près de l'injection là où les gouttes sont les plus rapides. Par conséquent, les trajectoires des petites gouttes deviennent

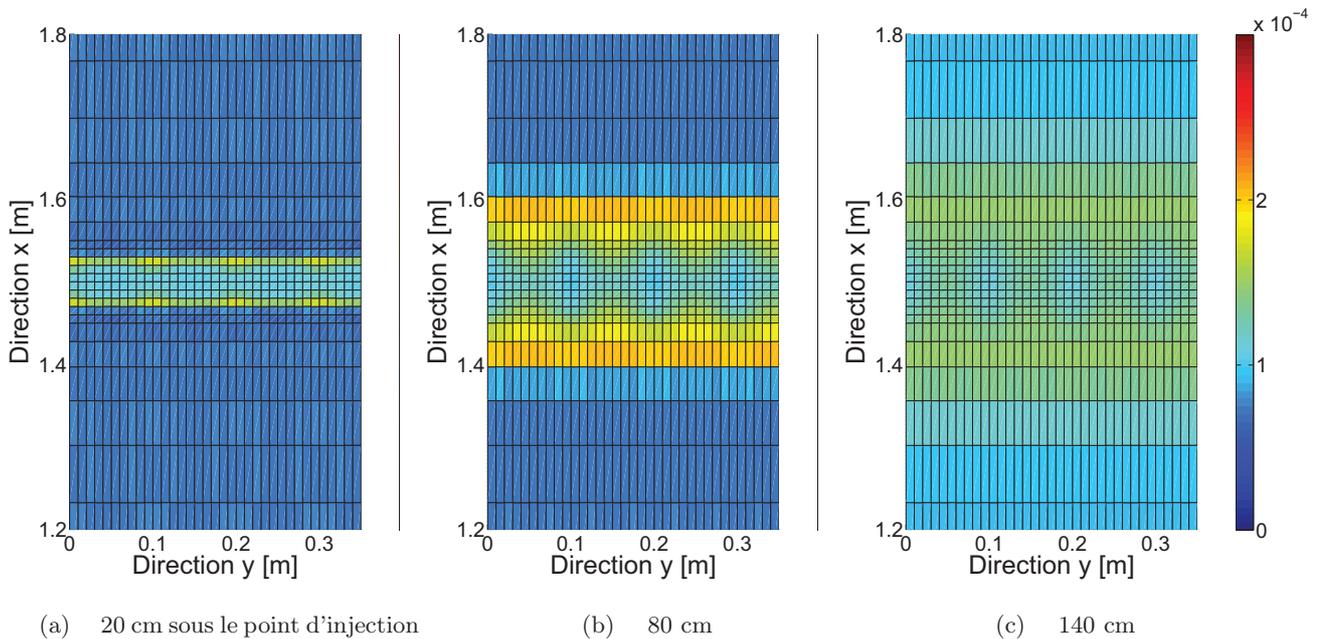


FIGURE 5.5 – Evolution du diamètre de Sauter (m) dans plusieurs sections du rideau

plus directes que dans le cas du spray unique.

Une visualisation plus générale de l'écoulement d'air est donnée dans un plan vertical du spray sur la figure 5.7(b). Le flux d'air a évidemment une direction descendante et le maximum situé près de l'injection est retrouvé (la taille des flèches utilisées est proportionnelle à la valeur de la vitesse de l'air). Les effets dus aux parois sont visibles et engendrent des boucles de recirculations d'air dans le domaine, plus ou moins importantes selon la configuration simulée.

L'étude du temps de séjour des gouttes dans le domaine vient appuyer les conclusions déjà établies. En suivant la même méthode que dans le cas du spray unique (voir paragraphe 4.2.3), les temps de séjour obtenus dans le cas de la rampe en configuration descendante s'élèvent à 0,88 seconde pour des gouttes de  $66 \mu\text{m}$  et 0,26 seconde pour des gouttes de  $271 \mu\text{m}$ . Une baisse du temps de résidence des particules est observée par rapport au spray seul. Si celle-ci reste faible dans le cas de gouttes de petites tailles (de l'ordre de 10%), la diminution devient importante pour les particules de  $271 \mu\text{m}$  (de l'ordre de 50%). Cette baisse, attendue au vu de l'étude de la vitesse de l'air et des trajectoires, est une conséquence directe de l'association de plusieurs tuyères et n'est évidemment pas bénéfique pour l'atténuation du rayonnement.

Les transmissions spectrales présentées pour cette comparaison proviennent de mesures effectuées localement (à 80 cm du point d'injection). Afin de cartographier le brouillard et d'avoir des données de transmissions dans l'ensemble de la zone du rideau, différents scans (suivant la hauteur sous une buse d'injection et dans une direction transversale) sont présentés.

L'évolution de la transmission suivant la hauteur est donnée sur la figure 5.8, d'une part en termes de transmissions spectrales et d'autre part en termes de transmissions totales ou représentatives (concept qui va être défini ci-dessous). Le calcul de la transmission totale est basé sur

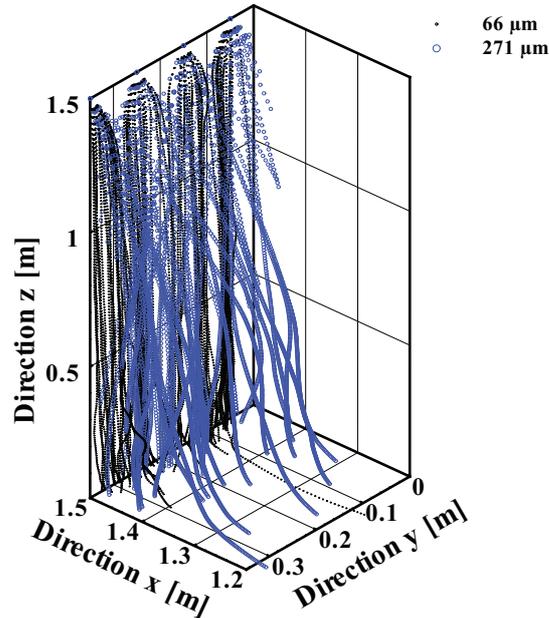


FIGURE 5.6 – Reconstruction du rideau grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes

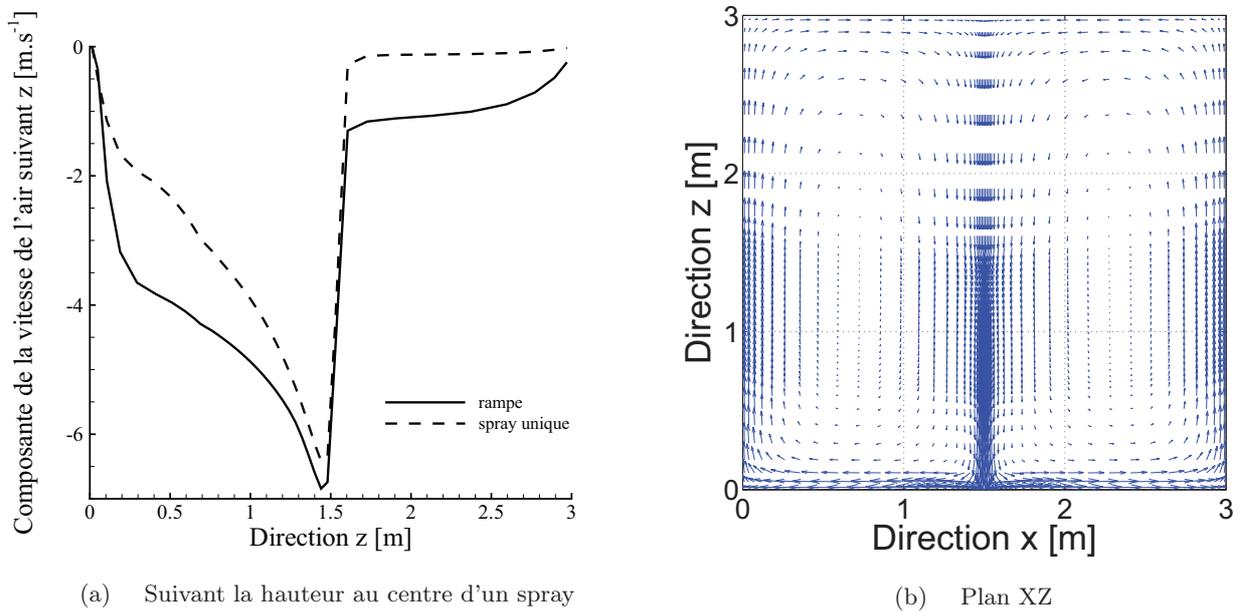


FIGURE 5.7 – Evolution de l'écoulement d'air

l'équation 3.2 (rappelons que pour calculer ce paramètre, il est nécessaire d'intégrer la transmission spectrale). Numériquement, afin de réduire considérablement les temps de calcul en évitant la détermination de la transmittance sur l'ensemble de la gamme de longueurs d'onde (71 bandes composent cette gamme allant de 2 μm à 14 μm, paragraphe 2.1.3), le choix s'est donc porté sur

l'évaluation d'une transmission "représentative" à une longueur d'onde spécifique de  $5 \mu\text{m}$ . Cette transmission représentative permet ainsi d'obtenir une bonne approximation de la transmittance totale. On peut d'ailleurs observer sur la figure 5.9 que la position de cette longueur d'onde varie peu suivant les configurations (l'intersection entre les transmittances totales représentées par les lignes horizontales sur la figure et les transmittances spectrales se fait toujours aux alentours de  $2000 \text{ cm}^{-1}$ ). Pour valider cette hypothèse de travail, l'écart relatif entre la transmittance totale et représentative est visualisé sur la figure 5.10 pour différents cas de simulation numérique : spray seul en configuration descendante, spray seul en configuration ascendante et rampe descendante (buse TP400067 utilisée avec une pression d'injection de 4 bars). L'écart entre les valeurs obtenues dans les deux méthodes est très faible (toujours inférieur à 1,5 %) justifiant pleinement la bonne approximation apportée par cette transmission représentative. Par conséquent, celle-ci sera largement utilisée par la suite dans les simulations numériques compte tenu du gain en temps de calcul résultant.

Revenons à présent à l'étude des courbes de la figure 5.8. La transmission diminue (l'atténuation augmente) quand on s'éloigne du point d'injection. La rampe étant placée à 1,50 m du sol, l'atténuation est donc légèrement meilleure vers le bas du rideau. Les transmissions représentatives sont présentées sur le graphique afin de rendre compte de la bonne aptitude du code à simuler le rideau (jusqu'à maintenant, la comparaison n'avait été effectuée qu'à 80 cm du point d'injection). Un bon accord est obtenu entre les deux méthodes, l'écart entre numérique et expérimental restant acceptable. Le ralentissement des gouttes sous l'effet de la traînée en liaison avec un temps de séjour qui augmente explique le phénomène de diminution de la transmission.

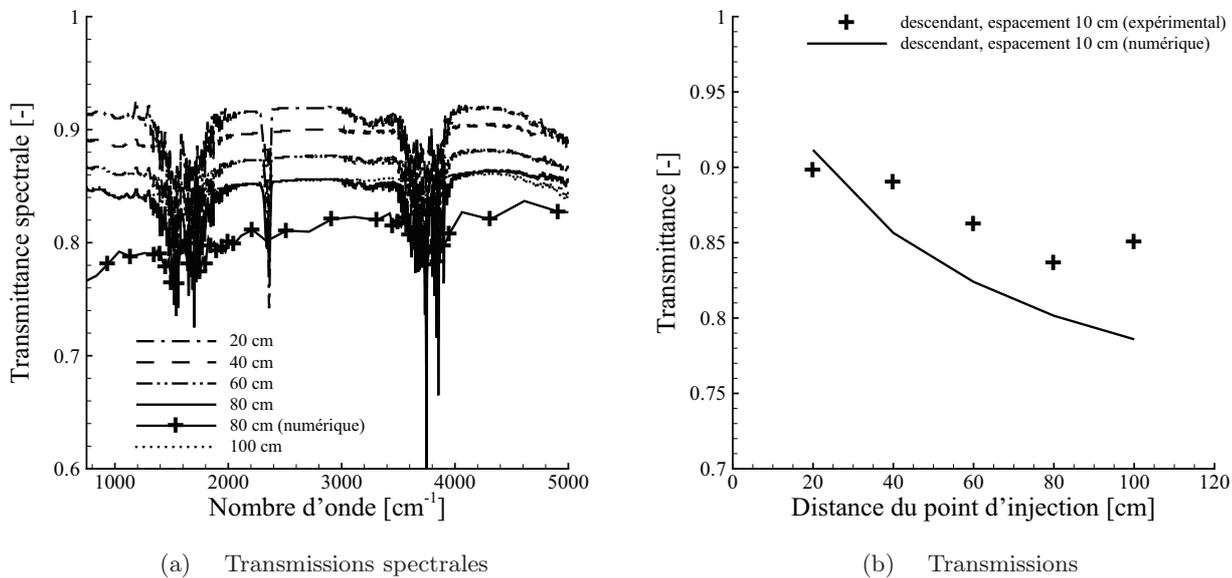


FIGURE 5.8 – Evolution de la transmission en fonction de la hauteur dans le rideau

La décélération des gouttes est visualisée sur la figure 5.11 où la composante de la vitesse suivant  $z$  des deux classes de gouttes précédemment utilisées est tracée en fonction de la hauteur dans le rideau (le résultat est donné au centre du rideau sous la buse d'injection). L'allure des courbes est identique à celle exposée lors de l'étude du spray unique (figure 4.12(a)) amenant par

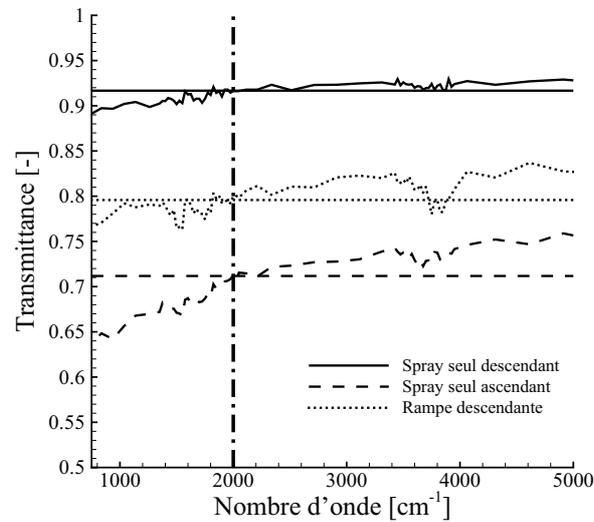


FIGURE 5.9 – Comparaison entre les transmittances spectrales et totales

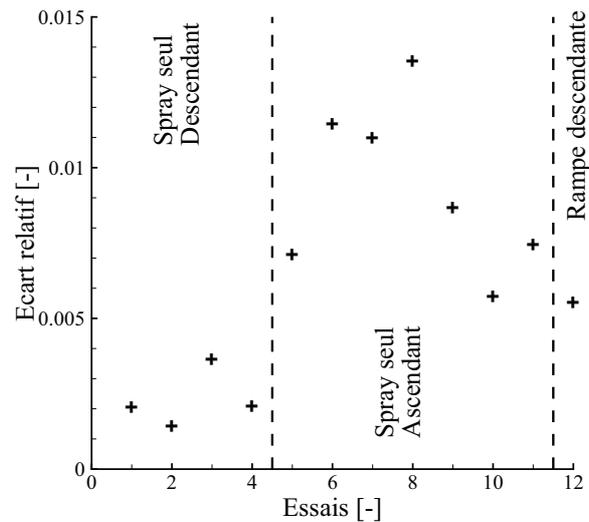


FIGURE 5.10 – Ecart relatif entre transmittances totales et représentatives

conséquent aux mêmes conclusions. Comme attendu, l'association de plusieurs buses engendre une dynamique différente qui tend à augmenter la vitesse des gouttes dans le rideau (au cœur du spray, la différence de vitesse des gouttes entre une rampe et une injection unique est de l'ordre de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ ). Brièvement, les petites gouttes vont être rapidement freinées du fait de leur faible inertie comparées aux gouttes de plus grandes tailles (donc avec une inertie plus forte). Cette diminution de la vitesse engendre alors une fraction volumique légèrement plus importante dans la partie basse du rideau (figure 5.12), expliquant par ailleurs la baisse de la transmission suivant cet axe vertical.

Dans une direction transversale au sens d'écoulement, la capacité du rideau à atténuer le

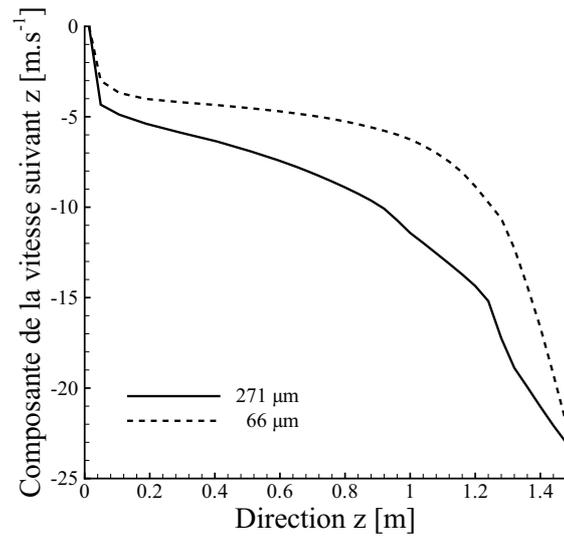


FIGURE 5.11 – Vitesse de deux classes de gouttes suivant la hauteur au centre du rideau (sous la buse d’injection)

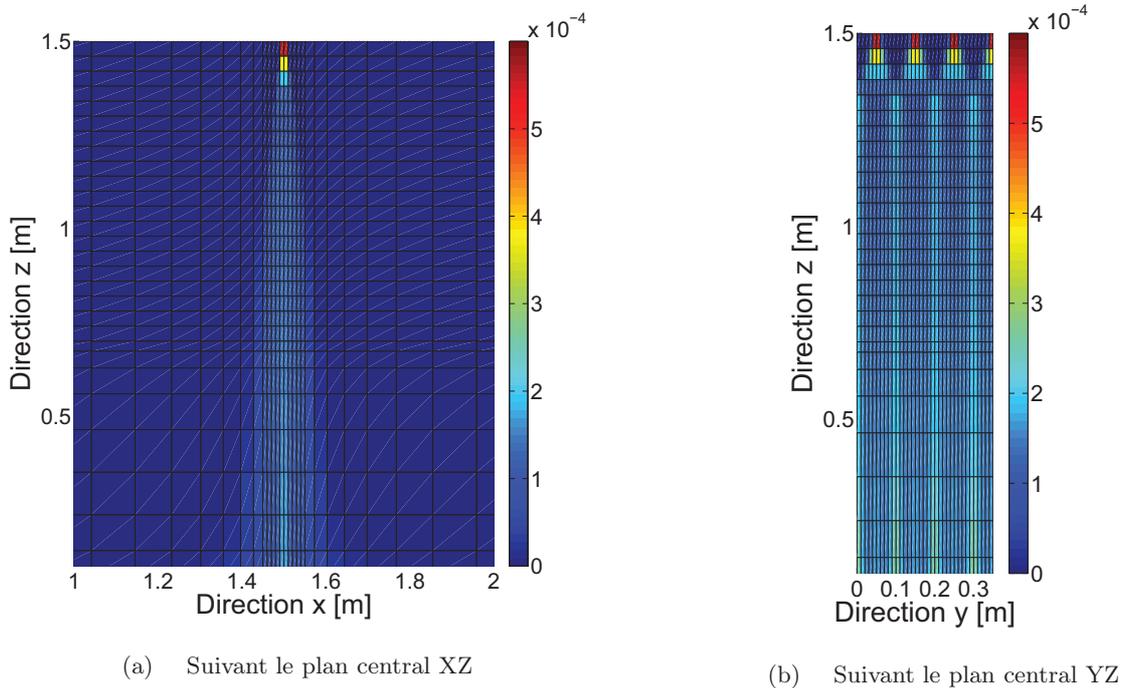


FIGURE 5.12 – Fraction volumique [m<sup>3</sup> d’eau / m<sup>3</sup> d’air]

rayonnement est relativement homogène et confirme les niveaux observés précédemment. La figure 5.13 où la transmission totale est tracée suivant deux lignes horizontales respectivement à 40 cm et à 80 cm sous la rampe de pulvérisation illustre bien ce phénomène. Les mesures

ont été effectuées à des positions situées sous les buses d'injection et au milieu de deux buses consécutives. On gardera à l'esprit une atténuation meilleure à une position plus basse dans le rideau. Ces conclusions sont confirmées par la visualisation de l'épaisseur optique cumulée (suivant l'axe  $x$ ) "représentative" (c'est-à-dire pour une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$ ) dans un plan YZ (figure 5.14). Cette donnée fournit une indication sur la capacité d'atténuation du rideau (elle ne rend pas compte des diffusions multiples qui se déroulent au sein du brouillard contrairement à la transmission). Les évolutions de cette épaisseur optique sont sensiblement les mêmes que celles de la transmittance, à savoir une augmentation en descendant dans le rideau et une faible variation dans une direction transversale à l'écoulement. On peut remarquer une forte augmentation de l'épaisseur optique cumulée près du sol due à l'accumulation de gouttes dans cette zone (essentiellement des gouttes de petites tailles). En effet, rappelons que ces gouttes de faible inertie vont suivre les mouvements de l'air environnant, celui-ci s'échappant au contact avec la paroi inférieure (figure 5.7).

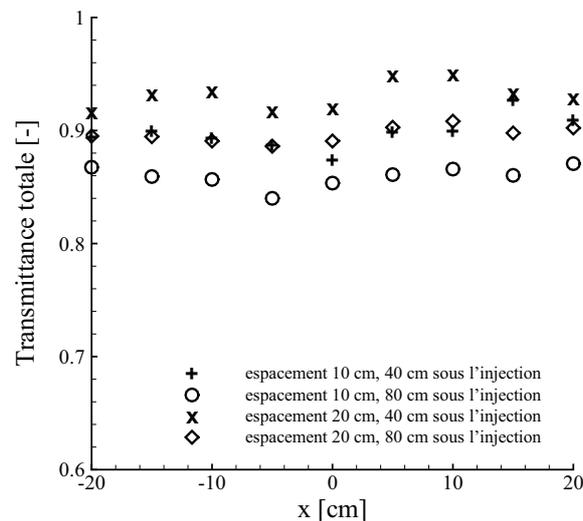


FIGURE 5.13 – Evolution de la transmission totale dans une direction transversale à l'écoulement

#### Bilan sur l'étude de cas :

Associer plusieurs injections afin d'obtenir une configuration en rampe permet donc d'améliorer l'efficacité du rideau en comparaison avec l'utilisation d'un seul spray. Cette disposition permet ainsi d'obtenir un véritable "bouclier radiatif" face au rayonnement issu d'une forte source de chaleur. La principale qualité de cette configuration est le recouvrement des différents sprays permettant ainsi d'avoir une fraction volumique importante au sein du rideau. Cette augmentation est prépondérante comparée à la baisse du temps de séjour des gouttes au sein du brouillard. Un deuxième avantage de cette configuration est l'homogénéité du spray dans la direction transversale permettant ainsi, suivant la longueur de la rampe utilisée, la protection d'une zone plus étendue. Toutefois, les niveaux de transmissions obtenus, bien qu'inférieurs à ceux d'une injection unique, restent encore élevés pour prétendre à une protection efficace. D'un point de vue numérique, la comparaison avec les résultats expérimentaux montrent un accord satisfaisant et

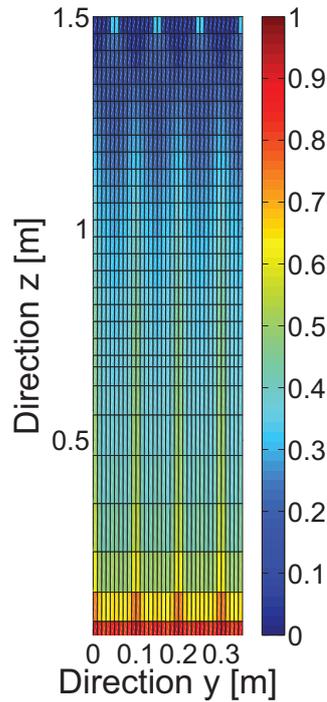


FIGURE 5.14 – Evolution dans un plan vertical de l'épaisseur optique cumulée

prouvent la capacité du code de calcul à simuler une association de plusieurs tuyères en rampe.

Différentes études de sensibilité sur les caractéristiques de la rampe sont maintenant entreprises afin d'évaluer leurs effets sur les transferts radiatifs à travers les rideaux générés.

### 5.1.2 Paramètres influents

Les effets étudiés sur la transmission du rayonnement sont relatifs à une modification de l'angle d'injection, de l'espacement entre les tuyères de la rampe ou de la pression d'injection. Le banc expérimental mis en place (dispositif détaillé dans le chapitre 3) va permettre de caractériser l'atténuation du rayonnement thermique en variant ces paramètres. Différents types de buses (TP400067, TP1100067 et TG1 dont les caractéristiques sont données dans la section 3.1) sont étudiés permettant ainsi de comparer plusieurs géométries de spray. Seuls quelques essais ont été réalisés en rampes avec la buse TG1 pour des raisons de débits peu adaptés pour notre dispositif expérimental. Les résultats sont présentés de manière à illustrer les niveaux d'atténuation qu'il est possible d'atteindre quand le débit d'injection est plus élevé. L'ensemble des résultats expérimentaux obtenu est donné avec un intervalle de confiance de 2 % (voir section B.2.1 de l'annexe B).

#### Espacement entre buses et angle d'injection

La transmittance spectrale est d'abord tracée en fonction du nombre d'onde sur la figure 5.15 pour un spray unique et deux configurations en rampes (7 tuyères composent chacune des rampes) avec un espacement entre buses différent (10 cm et 20 cm). Pour chacune des trois configurations, deux types de tuyères sont utilisés se différenciant par leurs angles d'injection respectifs (40°

pour la tuyère TP400067 et  $110^\circ$  pour la tuyère TP1100067). Rappelons que la rampe avec des injections descendantes dont les tuyères sont espacées de 10 cm correspond au cas de référence étudié précédemment. La granulométrie de la buse TP1100067 n'a pas pu être mesurée pour des raisons de dimensionnement du dispositif expérimental (l'injection se fait dans un angle trop ouvert). La pression d'alimentation en eau est de 4 bars (pour des raisons de mesures de granulométrie du spray à cette pression présenté dans le paragraphe 4.1.3, cette pression a été définie comme notre pression de référence) et la mesure est effectuée à une position de 80 cm du point d'injection (en dessous du spray unique ou de l'un des sprays générés par la rampe). L'allure générale des courbes de transmittances spectrales est identique à celle déjà rencontrée précédemment. En toute logique, la transmission diminue lorsque le nombre de buses augmente (donc la quantité d'eau injectée augmente). En revanche, multiplier la quantité d'eau injectée par deux en réduisant par exemple la distance entre buses par ce même facteur (puisque chaque buse produit le même débit) ne double évidemment pas le potentiel d'atténuation du rideau. Par exemple, l'atténuation obtenue pour un brouillard généré par des tuyères TP400067 espacées de 20 cm s'élève à 11 % alors que dans le cas d'un espacement de 10 cm, elle est seulement de 15 %. Pour des tuyères TP1100067, l'atténuation s'élève à 20 % pour un espacement de 20 cm et à 24 % pour un espacement de 10 cm.

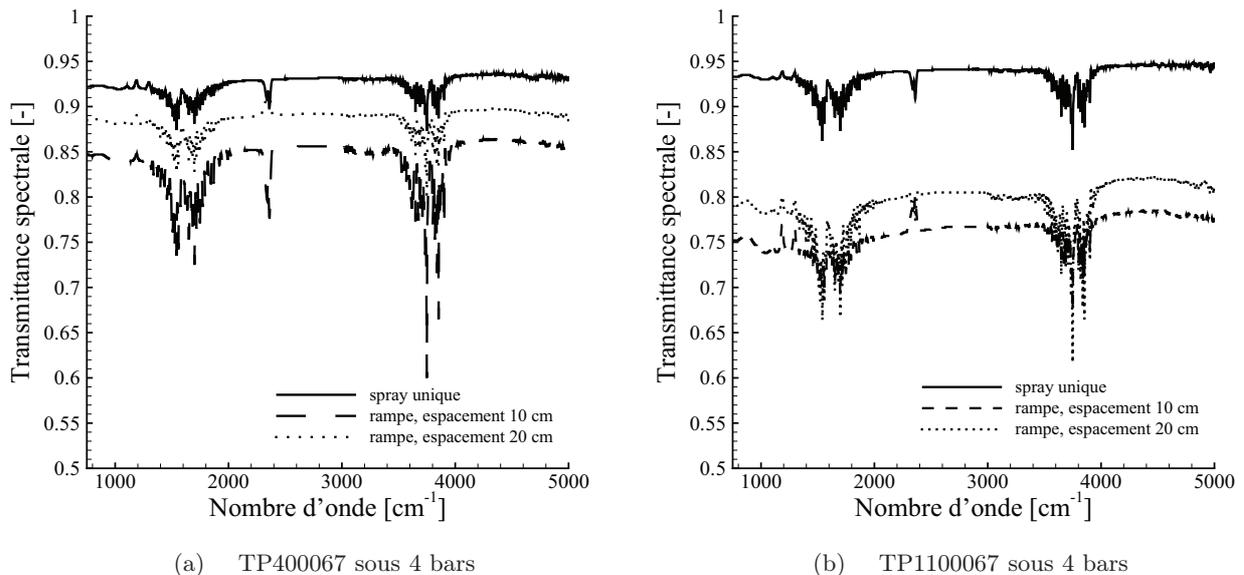


FIGURE 5.15 – Comparaison des transmittances spectrales entre spray unique et rampes pour une injection descendante à 80 cm sous la buse

L'explication provient d'effets couplés entre le rayonnement et la dynamique des sprays. En effet, l'augmentation du débit s'accompagne d'une vitesse locale supérieure pour les gouttes au détriment du temps de séjour. Cet effet est visible sur la figure 5.16 où la composante de la vitesse suivant  $z$  de deux classes de gouttes est représentée en fonction de la hauteur dans le spray pour plusieurs systèmes en rampes avec différents espacements entre tuyères (10 cm, 20 cm et 30 cm). Un système de rampe avec un écartement entre points d'injection de 30 cm a même été simulé. Les résultats concernant la dynamique du spray de ce système sont également rapportés dans ce paragraphe. L'évolution du temps de séjour (tableau 5.1) concorde également

avec les observations effectuées. En effet, le temps de séjour d'une goutte de  $66 \mu\text{m}$  (pour une configuration avec un espacement de 20 cm entre les tuyères) s'élève en moyenne à 0,97 seconde soit une augmentation d'environ 10 % par rapport à notre configuration de référence. La différence est plus prononcée dans le cas d'un écartement de 30 cm où le temps de résidence est doublé par rapport au cas 10 cm. Pour les grosses gouttes ( $271 \mu\text{m}$ ), l'influence sur le temps de séjour est moins marquée (notamment dans un système avec un écartement de 30 cm entre les points d'injection). En revanche, un espacement plus faible entre les sprays va permettre d'avoir un recouvrement plus important, menant ainsi à une fraction volumique (ou une quantité d'eau) supérieure par mètre linéaire de buse, comme observé sur la figure 5.17(a). Cette représentation illustre la quantité d'eau cumulée dans une section du maillage rapportée à la hauteur de la cellule (à cause du maillage non uniforme suivant cette direction, on divise la quantité d'eau par la hauteur de la cellule). Grâce à cette grandeur cumulée, on s'affranchit d'une visualisation locale de la quantité d'eau (et indirectement des gouttes). Le résultat est présenté par mètre linéaire de rampe. La quantité d'eau est toujours supérieure pour une rampe dont les injections sont espacées de 10 cm. Toutefois, ce volume d'eau n'est pas doublé (ou triplé) comme pourrait le laisser penser le doublement (ou le facteur trois) de la densité de tuyères (la figure 5.17(b) donne le rapport des quantités d'eau obtenues entre les trois configurations en fonction de la hauteur). La quantité d'eau augmente en s'éloignant du point d'injection, ce qui s'explique notamment par le fort ralentissement des gouttes dans les premiers centimètres du rideau (figure 5.16). Dans l'exemple présenté sur la figure 5.15, remarquons qu'une quantité d'eau injectée doublée va seulement améliorer l'atténuation du rideau d'eau de 4 %.

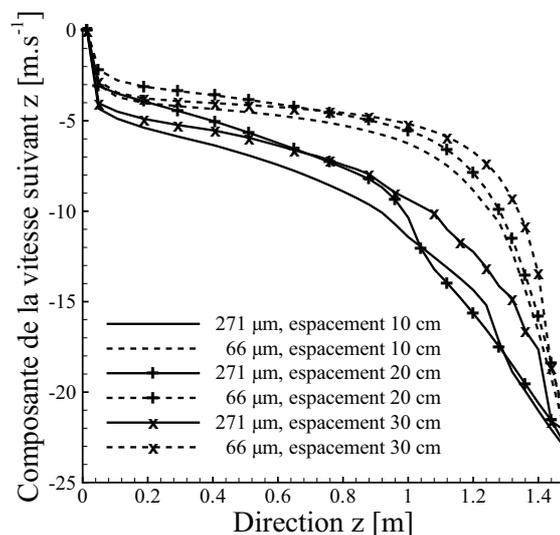


FIGURE 5.16 – Evolution de la vitesse de deux classes de gouttes pour des systèmes de rampes avec des espacements entre buses différents

En ce qui concerne l'angle d'ouverture du cône d'injection, son augmentation permet d'améliorer l'efficacité du rideau d'eau. Là encore la dynamique des gouttes explique le phénomène : l'injection sur un angle moins ouvert projette plus rapidement les gouttes vers le sol, entraînant un temps de séjour plus faible et par conséquent une moins bonne capacité d'atténuation. Le calcul numérique permet même d'aller plus loin que l'expérimental en offrant la possibilité de

Espacements entre buses			
Diamètre	10 cm	20 cm	30 cm
66 $\mu\text{m}$	0,88	0,97	1,73
271 $\mu\text{m}$	0,26	0,31	0,34

TABLE 5.1 – Temps de séjour (s) des gouttes pour des rampes avec différents espacements entre tuyères

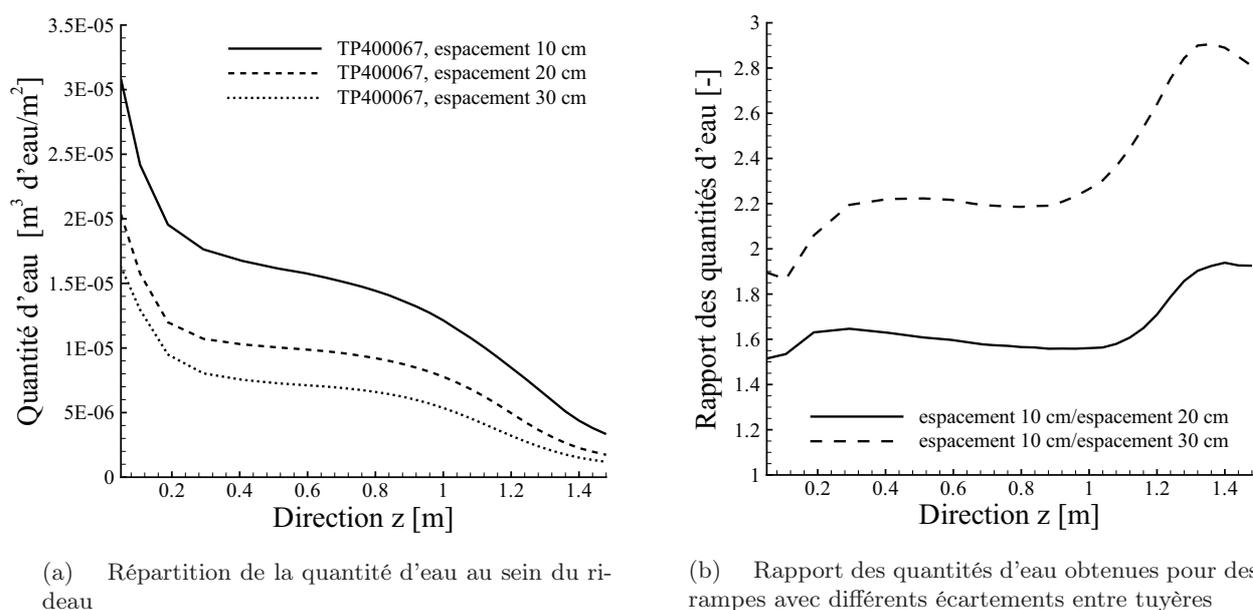


FIGURE 5.17 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur

simuler des sprays avec des angles d'injection divers (tout en gardant tous les paramètres du spray constants notamment la granulométrie) afin d'évaluer les différences engendrées sur les caractéristiques du rideau. Pour plusieurs angles d'injection, les temps de séjour obtenus sur deux classes de gouttes (66  $\mu\text{m}$  et 271  $\mu\text{m}$ ) sont donnés dans le tableau 5.2 et permettent de confirmer la tendance annoncée (l'augmentation du temps de séjour reste tout de même faible mais elle est réelle). En ce qui concerne les vitesses (figure 5.18) des gouttes, elles sont, comme attendu, plus faibles lorsque l'angle d'injection augmente, entraînant par conséquent une fraction volumique légèrement supérieure. La quantité d'eau au sein du spray s'en trouve alors légèrement meilleure également (figure 5.19). Le dernier paramètre jouant un rôle crucial dans l'évolution de l'atténuation du rayonnement est le diamètre des gouttes. Bien que la granulométrie n'ait pas pu être mesurée pour la tuyère TP1100067, les résultats expérimentaux obtenus amènent à penser que le diamètre de Sauter moyen est plus faible pour cette buse. En effet, en spray unique, la transmission obtenue par des sprays générés par les deux types de buses est équivalente malgré un débit similaire dans les deux cas alors que l'injection avec un angle plus ouvert va engendrer une fraction volumique locale plus faible. Malgré tout, la transmission obtenue est la même, signe que la granulométrie est donc mieux adaptée pour atténuer le rayonnement. En rampe, la pente

des courbes est plus marquée lorsque des tuyères TP1100067 sont utilisées, ce qui confirme aussi la présence de gouttes de plus petites tailles dans ce cas. Finalement, dans une configuration en rampe en injection descendante, un élargissement de l'angle d'injection des gouttes est bénéfique pour la capacité d'atténuation. Dans le cas de tuyères TP1100067, la différence d'atténuation entre spray unique et rampe équivaut à un facteur maximal de 4 (pour un espacement de 10 cm entre les buses) alors que ce facteur n'est seulement que de 2 quand les tuyères TP400067 sont utilisées (avec également un espacement de 10 cm entre les buses).

	Angle d'injection		
Diamètre	40°	110°	180°
66 $\mu\text{m}$	0,88	0,92	0,96
271 $\mu\text{m}$	0,26	0,28	0,30

TABLE 5.2 – Temps de séjour (s) des gouttes pour des pulvérisations avec différents angles d'injection

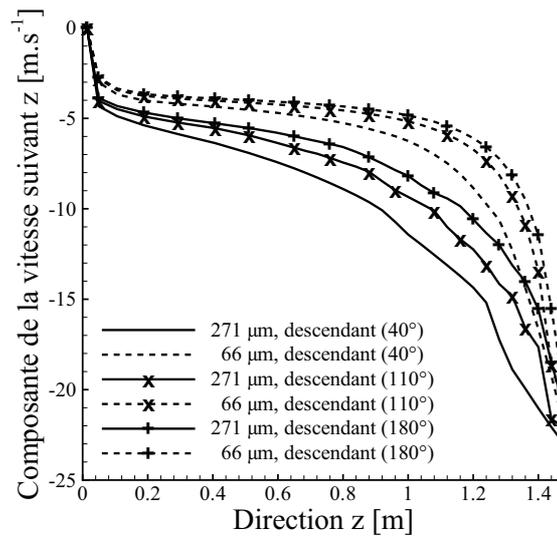


FIGURE 5.18 – Evolution de la vitesse de deux classes de gouttes pour des systèmes de rampes avec des angles d'injection différents

Afin d'évaluer l'homogénéité du rideau, des mesures de transmissions sont effectuées expérimentalement à différentes positions dans le brouillard. En pratique, le principe consiste à aligner le spectromètre et le corps noir sur différentes zones du spray : suivant un axe vertical sous la buse d'injection centrale de la rampe (figure 5.20) et suivant plusieurs directions perpendiculaires à cet axe (à 40 cm et 80 cm du point d'injection) pour des mesures se déroulant sous les tuyères et entre celles-ci (figure 5.21). Les résultats sont rapportés en termes de transmissions totales. La pression d'injection utilisée est toujours de 4 bars. Selon l'axe vertical, comme attendu, la transmission diminue (l'atténuation augmente) quand on s'éloigne du point d'injection. Le ralentissement des gouttes (entraînant une augmentation du temps de séjour) sous l'effet de la traînée (figure 5.16) explique ce phénomène, engendrant ainsi une quantité d'eau plus élevée dans le bas

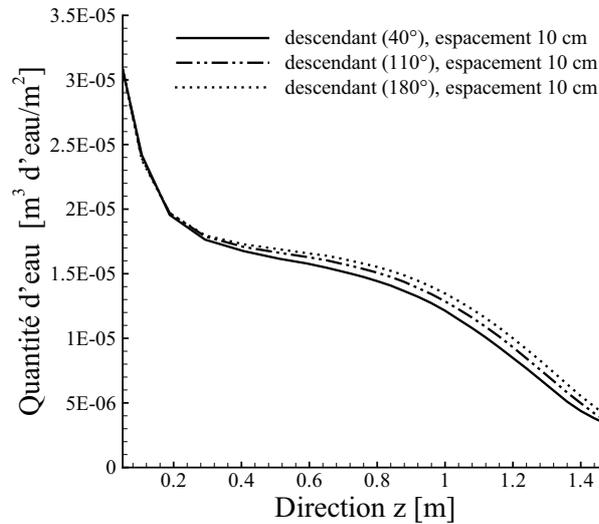


FIGURE 5.19 – Evolution de la quantité d’eau en fonction de la hauteur pour différents systèmes en rampes avec des angles d’injection différents

du rideau (figure 5.17). Au niveau de l’espacement entre buses et de l’angle d’injection, comme déjà vu précédemment, l’augmentation de l’angle d’ouverture améliore la capacité d’atténuation tout comme un espacement réduit (gardons à l’esprit que le gain n’est pas aussi bon que pourrait le laisser penser le doublement du débit).

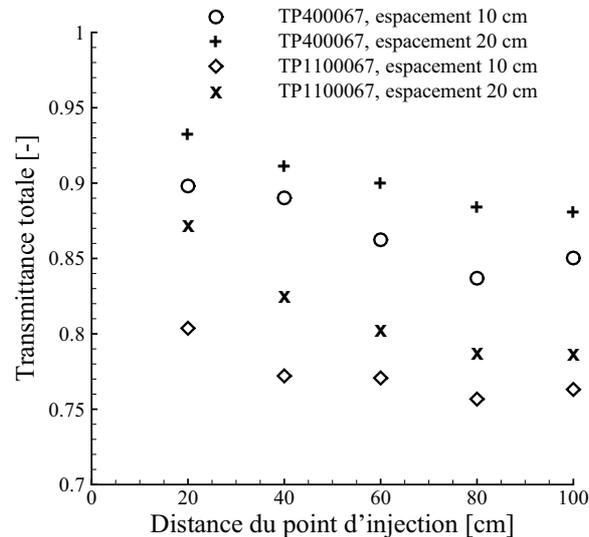


FIGURE 5.20 – Evolution de la transmission totale en fonction de la hauteur selon un axe vertical sous une buse d’injection

Les variations de transmissions suivant la direction transversale montrent une capacité relativement homogène du rideau à atténuer le rayonnement et confirment les niveaux d’atténuation

déjà observés. Les conclusions sont les mêmes que précédemment : l'atténuation est globalement meilleure pour un angle d'injection plus ouvert et un espacement entre buses plus petit. Notons une légère différence de transmission entre les deux hauteurs d'étude (celle-ci est plus faible à 80 cm qu'à 40 cm) pour la rampe munie de tuyères TP400067, différence quasi-inexistante en ce qui concerne l'injection avec des buses TP1100067. L'angle étant plus ouvert, le recouvrement entre les sprays s'effectue donc plus rapidement dans le rideau, d'où un brouillard plus homogène.

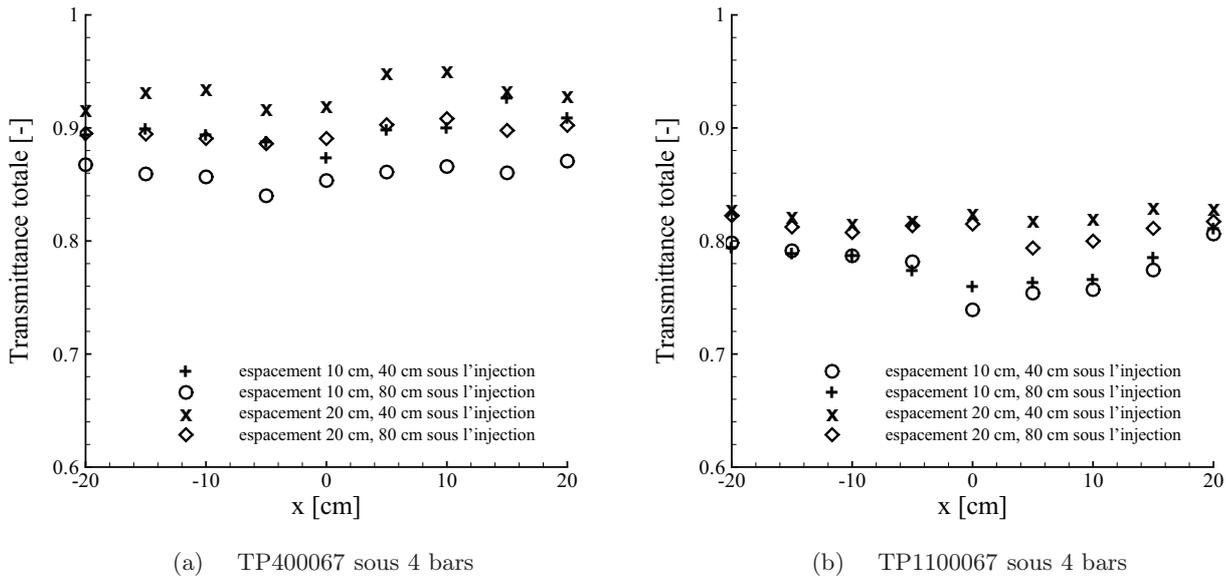


FIGURE 5.21 – Evolution transversale de la transmission totale

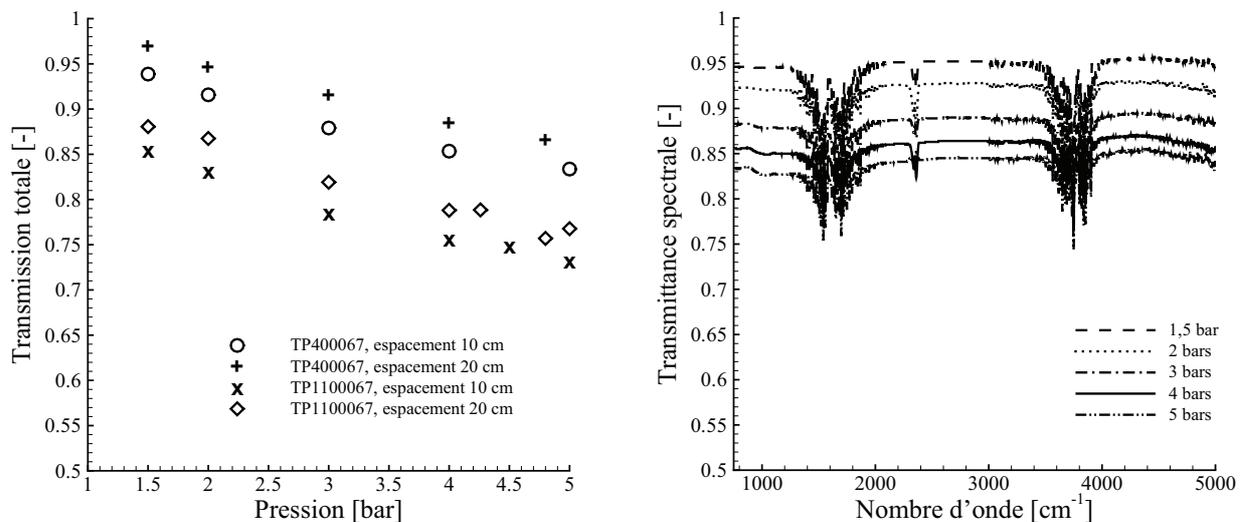
Bilan :

L'espacement entre les buses d'une rampe et l'angle d'injection constituent des paramètres importants dans l'optique d'une optimisation des rideaux d'eau. Diminuer l'espacement entre les buses améliore bien évidemment la capacité d'atténuation du brouillard grâce à l'augmentation de la quantité d'eau. Toutefois, doubler le volume d'eau (en passant d'un espacement entre buse de 20 cm à 10 cm par exemple) ne multiplie pas l'atténuation par deux. Le niveau d'atténuation obtenu est moindre, l'explication provenant d'effets couplés entre la dynamique du spray et les transferts radiatifs. Du point de vue de l'angle d'injection, son augmentation provoque une légère amélioration de l'efficacité du rideau.

**Influence de la pression**

La sensibilité des rideaux d'eau (générés par des tuyères TP400067 ou TP1100067) à la pression d'injection est illustrée sur la figure 5.22(a) en terme de transmission totale. Ces mesures ont toutes été réalisées à 80 cm sous le point d'injection (en-dessous d'une des tuyères de la rampe) pour une association de sprays avec les deux types de buses, espacées à la fois de 10 cm et de 20 cm. La pression d'injection maximale pouvant être atteinte sur le banc expérimental mis en place est de 5 bars. Pour chacun des cas considérés, la transmission diminue (l'atténuation croît)

quand la pression augmente. Là encore, l'explication provient de la dynamique des gouttes ; une augmentation de la pression provoque d'une part un débit plus important et par conséquent une quantité d'eau plus élevée et d'autre part une diminution de la taille des gouttes. Cette tendance est confirmée par des mesures expérimentales de granulométrie réalisées pour une pression d'injection autre que celle choisie comme référence. Le diamètre moyen obtenu à une position de 20 cm sous la tuyère s'élève à  $115,3 \mu\text{m}$  pour une pression de 2,6 bars et à  $100,8 \mu\text{m}$  pour une pression de 4 bars. Toutefois, la vitesse des gouttes va également croître engendrant une baisse du temps de séjour, non bénéfique pour une meilleure atténuation (dans le cas de pressions faibles, l'effet d'une augmentation de la quantité d'eau est prépondérant par rapport à celui causé par la baisse du temps de séjour). Ceci amène à penser qu'une pression limite existe au-delà de laquelle l'efficacité du rideau ne va plus augmenter (l'effet engendré par la diminution du temps de séjour deviendra alors prépondérant par rapport à celui causé par une augmentation de la quantité d'eau), comme mentionné dans les travaux de Parent [Parent *et al.*, 2006]. Sur la figure 5.22(b) sont présentées les transmittances spectrales obtenues dans le cas d'une rampe TP400067 avec un espacement entre tuyères de 10 cm pour différentes pressions d'alimentation. Les niveaux d'atténuation déjà observés sur la figure 5.22(a) sont retrouvés. Les mêmes conclusions que celles établies au paragraphe précédent peuvent être formulées, à savoir que la capacité d'atténuation est meilleure avec un angle de cône d'injection plus ouvert et un espacement plus faible entre les buses.



(a) Transmission totale en fonction de la pression pour les 4 cas étudiés

(b) Transmission spectrale dans le cas d'une rampe TP400067 (espacement 10 cm entre buses)

FIGURE 5.22 – Evolution de la transmission en fonction de la pression pour des rideaux générés par deux types de buses

### Orientation des tuyères

Dans l'ensemble des études réalisées, aussi bien numériquement qu'expérimentalement, la propagation du rayonnement à travers le rideau s'effectue toujours suivant le petit axe de la

section elliptique du spray (plusieurs schémas de cette configuration sont présentés sur les figures 5.1). Dans cette section, nous nous proposons d'évaluer expérimentalement l'efficacité d'un rideau dont les buses d'injection ont subi une rotation de  $90^\circ$ . La direction d'injection est toujours descendante. En revanche, la propagation du rayonnement va s'effectuer suivant le grand axe de la section elliptique du spray. Le schéma de principe de cette configuration expérimentale est présenté sur la figure 5.23.

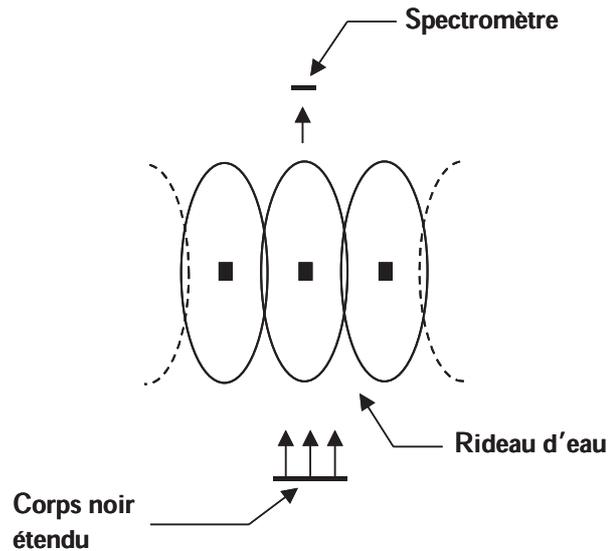


FIGURE 5.23 – Schéma de principe d'une configuration où la propagation du rayonnement se fait selon le grand axe de la section elliptique

Des mesures de transmissions spectrales ont été réalisées à différentes hauteurs dans le spray (suivant un axe vertical situé sous la buse d'injection). La transmission totale déduite de ces mesures est représentée en fonction de la hauteur sur la figure 5.24. Les résultats obtenus pour le cas de référence sont ajoutés sur le graphique afin de pouvoir comparer les deux configurations. L'allure générale de la courbe est similaire dans les deux cas. La capacité d'atténuation du rideau augmente en s'éloignant de la buse d'injection. La dynamique des gouttelettes d'eau, dont l'étude a largement été détaillée dans la section 5.1.1, est à l'origine de ce phénomène. Dans la partie haute du rideau (entre le point d'injection et 30 cm sous celui-ci), la configuration "classique" (cas de référence), possède une capacité d'atténuation légèrement meilleure que dans le cas d'un changement d'orientation des tuyères. Cette différence s'explique par le recouvrement des sprays dans cette zone. En effet, l'angle d'injection suivant cette direction étant très faible (environ  $16^\circ$  dans le cas étudié ici contre  $48^\circ$  pour le cas de référence), le recouvrement entre sprays va par conséquent se réaliser plus bas dans le rideau. En revanche, en-dessous de cette limite (de 30 cm sous le point d'injection jusqu'au sol), la transmission est plus faible pour la configuration de rampe présentée dans ce paragraphe. Le recouvrement entre sprays étant à présent établi, la quantité d'eau traversée est alors plus importante lorsque les buses sont orientées à  $90^\circ$  (schéma 5.23), la propagation du rayonnement s'effectuant selon le grand axe de la section elliptique. Toutefois, ces mesures ont été réalisées à différentes hauteurs sous la buse d'injection. Afin d'évaluer l'homogénéité du rideau, plusieurs balayages suivant une direction transversale à l'écoulement sont effectués.

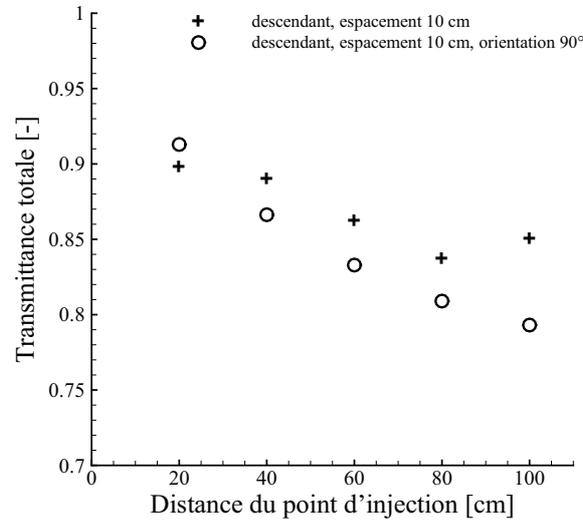


FIGURE 5.24 – Evolution de la transmission totale en fonction de la hauteur pour des orientations différentes des tuyères

La figure 5.25 présente les résultats obtenus suite à des mesures réalisées suivant une direction transversale à l'écoulement à des hauteurs de 40 cm et 80 cm. Les symboles correspondent aux différents points de mesure. La présence des lignes pointillées est juste fournie à titre indicatif pour favoriser la visualisation (aucune mesure n'a été effectuée entre ces points). En ce qui concerne un espacement entre tuyères de 10 cm (figure 5.25(a)), le rideau connaît quelques variations d'efficacité à une hauteur de 40 cm sous la buse d'injection (5 % d'écart maximum sur la transmission entre les différents points de mesures), comme en attestent les courbes de transmittances totales. Par contre, la capacité d'atténuation du rideau est parfaitement constante à 80 cm sous la rampe. Ces différences sont principalement dues à un recouvrement entre les sprays qui intervient plus bas dans le rideau. Augmenter l'espacement entre les tuyères de la rampe va évidemment engendrer un recouvrement encore plus tardif dans le brouillard considéré. Les courbes de transmittances totales de la figure 5.25(b) obtenues pour une configuration avec une distance de 20 cm entre deux tuyères consécutives appuient cette idée. En effet, des variations de transmissions de l'ordre de 15 % maximum sont à constater entre les différents points de mesure, rendant le rideau totalement inhomogène suivant une direction transversale (même à une hauteur de 80 cm sous la buse d'injection où nous nous trouvons environ à mi-hauteur dans le rideau). Il est intéressant de remarquer qu'à certaines positions, la configuration étudiée devient moins efficace que le cas de référence (section 5.1.1). Du fait d'une variation trop importante de la capacité d'atténuation à certaines positions dans le rideau, il est préférable d'opter pour des rampes engendrant un recouvrement entre sprays homogène et efficace.

### Quelques essais réalisés avec la tuyère TG1

Le débit (environ trois fois supérieur à celui des deux autres types de buses) et la forme géométrique (empreinte de spray circulaire) de la tuyère TG1 diffèrent complètement des deux autres types de buses, les mesures de transmission réalisées avec cette rampe sont présentées à

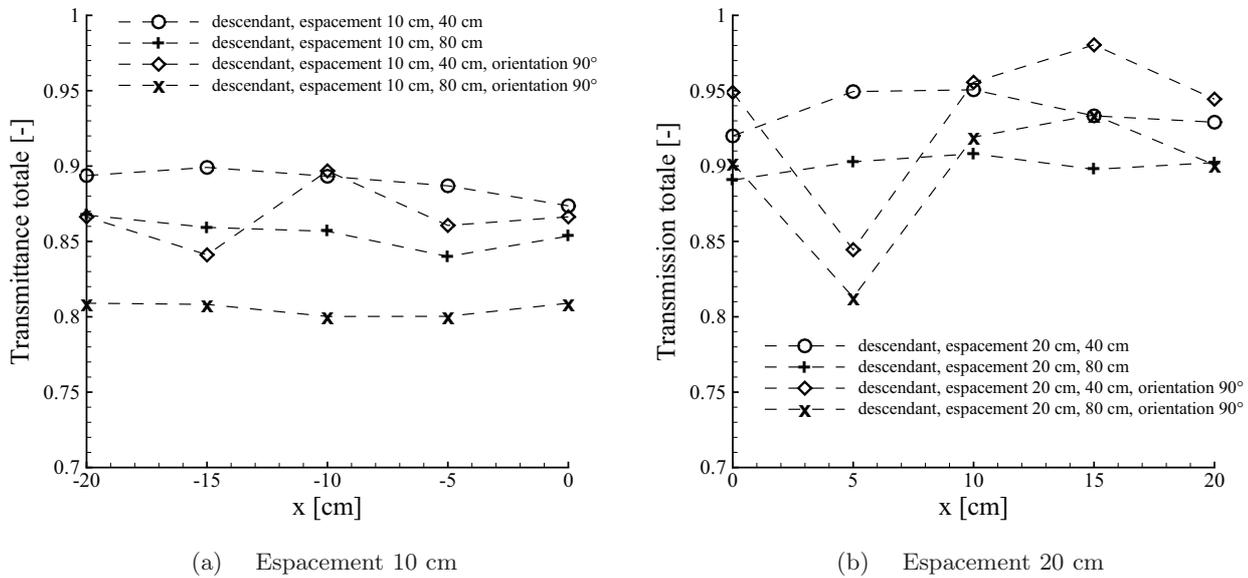


FIGURE 5.25 – Evolution transversale de la transmission totale pour des orientations différentes des tuyères

part dans cette section. L'évolution de la transmission en fonction de la pression d'injection est tracée sur la figure 5.26(a) à une position de 80 cm sous la buse centrale de rampe. De manière logique, le rideau possède une meilleure capacité d'atténuation lorsque la pression augmente. Les explications proviennent toujours de la dynamique des sprays et sont fournies dans la section 5.1.2. Le débit étant plus grand, les transmissions mesurées sont largement en-dessous de celles obtenues avec les deux autres tuyères. Par exemple, à une position de 80 cm sous une buse d'injection, pour une pression d'alimentation de 4 bars et pour des tuyères espacées de 10 cm, la transmission atteint environ 65 % pour la TG1, 77 % pour la TP1100067 et 88 % pour la TP400067. Toutefois, rappelons que les niveaux mesurés avec la tuyère TG1 sont obtenus avec un débit environ trois fois supérieur à celui des deux autres buses. Remarquons également que la différence entre les deux espacements s'accroît au fur et à mesure que la pression augmente.

L'évolution de la transmission suivant une ligne verticale sous la buse d'injection est présentée sur la figure 5.26(b). De la même manière que pour les deux autres types de buses, la capacité d'atténuation du rideau augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. Notons tout de même que la variation est plus marquée par rapport à celles des autres tuyères (voir figure 5.20), ce qui est certainement dû à la géométrie et granulométrie différentes du spray provoquant un changement dans la dynamique des gouttes injectées.

### 5.1.3 Scénario avec un panneau rayonnant

Jusqu'à maintenant, les différents cas étudiés considéraient tous des surfaces d'émission et de réception du rayonnement réduites afin de reproduire numériquement les conditions expérimentales (les surfaces correspondaient au corps noir et au spectromètre utilisés expérimentalement, section 3.1). Ce choix s'est justifié par la nécessité de comparer le code de simulation numérique

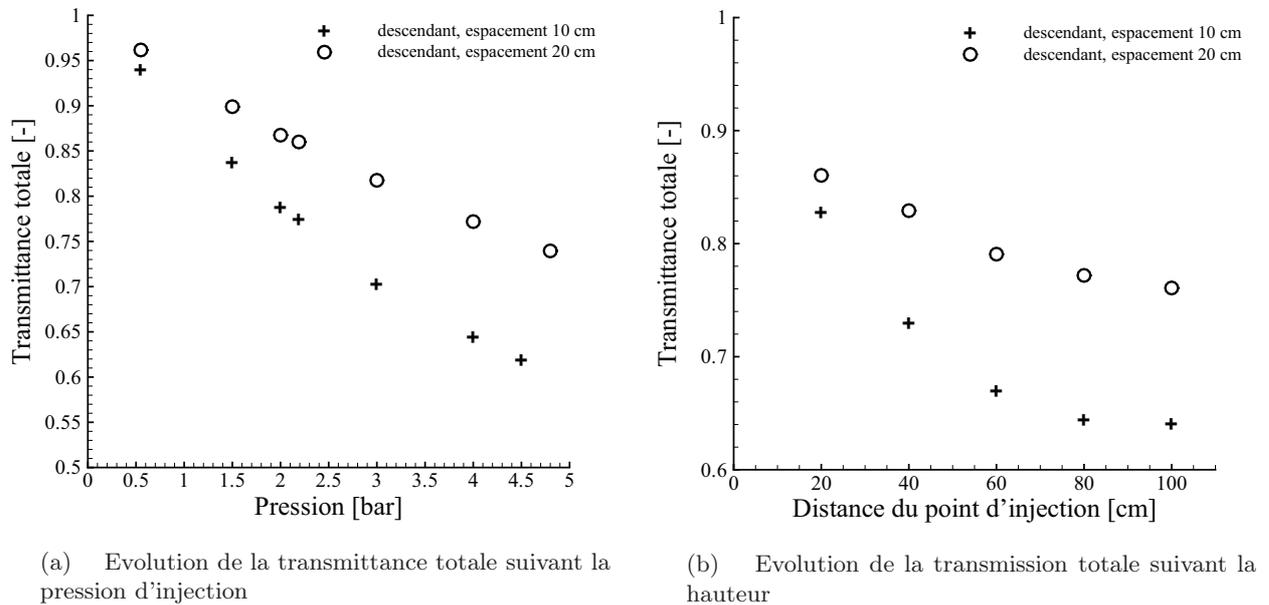


FIGURE 5.26 – Etude de la transmission du rayonnement pour une rampe munie de tuyères TG1

aux mesures expérimentales. Evidemment, ces conditions à échelle du laboratoire ne sont pas représentatives de cas plus réels considérant par exemple un incendie et une cible à protéger. Par conséquent, afin de se rapprocher numériquement de dimensions plus proches de la réalité, une étude est menée en considérant un panneau rayonnant et une surface de réception étendus.

### Cas de référence

La simulation sur la dynamique du spray reste inchangée (les détails sont donnés dans le paragraphe 5.1.1). Brièvement, le calcul numérique est toujours effectué dans un domaine réduit présentant plusieurs plans de symétrie (figure 5.27). Les caractéristiques de la tuyère TP400067 (mesurées expérimentalement et présentées dans le tableau 4.3) définissent les paramètres d'entrée de la buse d'injection. La pression d'alimentation est toujours de 4 bars.

En ce qui concerne la simulation des transferts radiatifs à travers le rideau d'eau, la source de rayonnement définie correspond à un panneau rayonnant ayant les caractéristiques d'un corps noir à une température de 1000 K (1000 K - 1200 K, ordre de grandeur de température du feu) et s'étendant sur toute la hauteur et la largeur du brouillard (figure 5.27(a)). La zone de réception, de mêmes dimensions que la surface d'émission (0,05 m x 1,5 m), est située en face de la source de rayonnement à une distance de trois mètres. Dans l'ensemble des simulations numériques, l'émission et la réception du rayonnement sont hémisphériques. Une coupe transversale du domaine est présentée sur la figure 5.27(b). Les résultats numériques présentés en termes de transmissions sont obtenus en utilisant un critère de convergence de 1 % sur la simulation des flux radiatifs reçus avec et sans spray (l'étude sur le critère de convergence est présentée dans la section B.1.1 de l'annexe B).

L'évolution de la transmittance spectrale en fonction du nombre d'onde (figure 5.28) présente

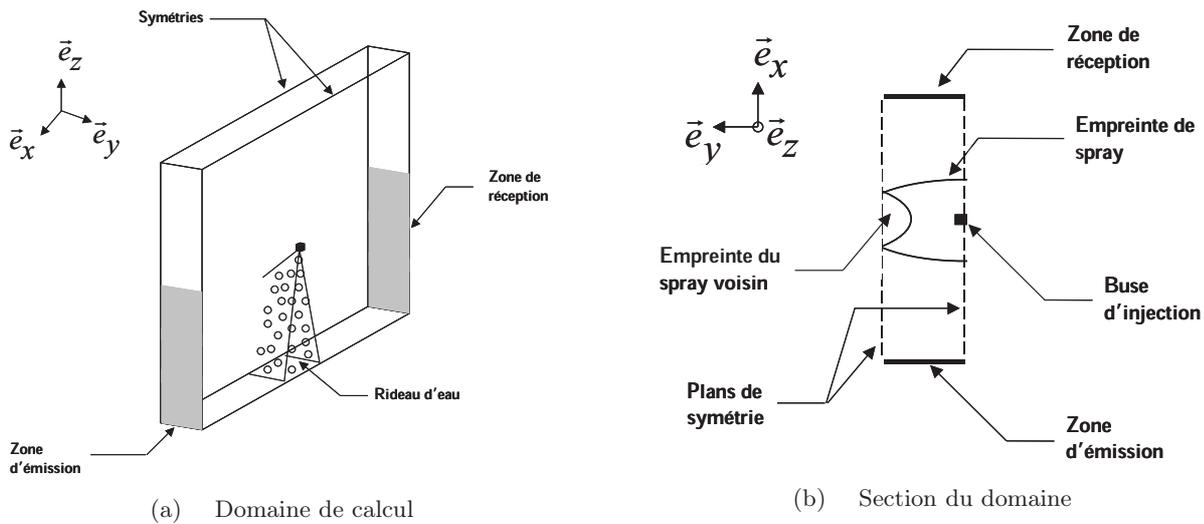


FIGURE 5.27 – Schéma de principe dans une configuration en rampe descendante

des différences majeures avec celles calculées (ou mesurées) en utilisant des surfaces d'émission et de réception du rayonnement réduites (figure 5.3 et figure 5.8(a)). En effet, dans la gamme de nombres d'onde où seules les gouttes sont responsables de la capacité d'atténuation du rideau (hors bandes de vapeur d'eau), les courbes de transmissions obtenues mettent en évidence des variations liées à l'évolution des propriétés radiatives des gouttelettes d'eau (paragraphe 4.2.2). Ces évolutions caractéristiques sont évidemment à mettre en comparaison avec les études radiatives menées jusqu'alors où les transmissions étaient quasi-monotones dans les zones hors bandes de vapeur d'eau. Dans ces gammes de nombres d'onde où la transmittance connaît une forte augmentation (au-delà de  $4000\text{ cm}^{-1}$ ), le coefficient de diffusion connaît une croissance alors que dans le même temps, le coefficient d'absorption présente une diminution (figure 4.6). Rappelons que la diffusion est fortement anisotrope vers l'avant (figure 4.7). Par conséquent, lorsque la surface de réception (cible à protéger en configuration réelle) est petite (en configuration expérimentale, elle correspondait à un cercle de 2,2 cm de diamètre), la diffusion du rayonnement permet d'écarter le rayon incident de la cible, ce qui a pour effet de diminuer le flux reçu et la transmission. En revanche, lorsque les surfaces de réception et d'émission sont étendues, ces mêmes rayons diffusés (selon un faible angle) ne vont plus être suffisamment déviés pour s'écarter de la cible engendrant ainsi une augmentation de la transmission. Dans ce cas précis, la diffusion du fait de son anisotropie vers l'avant devient évidemment moins efficace, ce qui provoque une diminution de la capacité d'atténuation du rideau comme le montrent les variations des courbes de transmissions de la figure 5.28. Pour les grands nombres d'onde, la transmission atteint jusqu'à 93 %, soit une perte d'environ 15 % par rapport au niveau moyen qui se situait à 80 % (dans la gamme de nombres d'onde inférieurs à  $4000\text{ cm}^{-1}$  dans le cas où le calcul est effectué à 80 cm du point d'injection). Dans une application du type panneau rayonnant, il apparaît alors que seule l'absorption explique les niveaux d'atténuation obtenus (à l'exception du phénomène de rétro-diffusion, minoritaire dans nos cas d'étude).

L'allure des transmittances spectrales est identique quelle que soit la hauteur considérée dans le rideau. Elles diffèrent uniquement par les niveaux de transmission atteints. Une capacité d'atténuation meilleure en bas du rideau est observée sur la figure 5.28. Les bandes de vapeur d'eau sont toujours présentes dans les gammes de nombres d'onde qui les caractérisent (près de 1500

$\text{cm}^{-1}$  et près de  $3800 \text{ cm}^{-1}$ ).

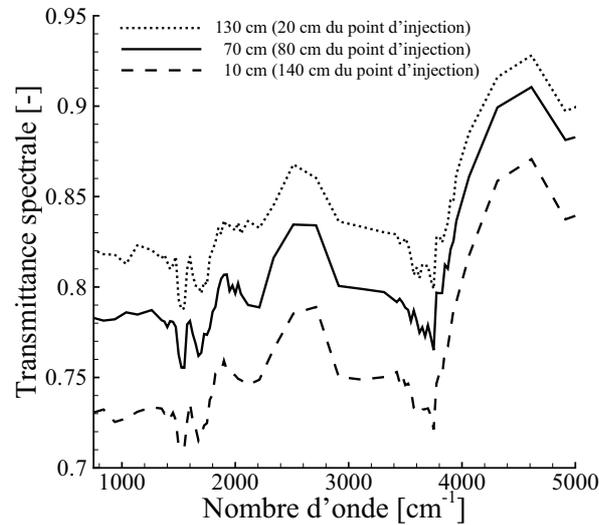


FIGURE 5.28 – Evolution de la transmittance spectrale à différentes hauteurs dans le rideau

Compte tenu des fortes variations de la transmission spectrale, l'approximation de la transmittance totale par la transmittance représentative (obtenue à une unique longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$ ) n'est plus valable (l'écart relatif entre la transmittance totale et représentative atteint alors 15 % pour différentes configurations de rampes munies de pulvérisations descendantes ou ascendantes). Par conséquent, la transmittance totale sera utilisée dans le cas d'un scénario radiatif de sources étendues du type panneau rayonnant.

La transmission totale est d'abord représentée dans un plan vertical (plan XY) sur la figure 5.29. Comme dans le cas de surfaces rayonnantes réduites (section 5.1.1), la transmission décroît en descendant dans le rideau. La capacité d'atténuation est donc meilleure en bas du brouillard. En revanche, dans une direction transversale à l'écoulement (suivant la direction y), la transmission est quasi-invariante. Ces évolutions s'expliquent grâce à la dynamique du spray et ont déjà été analysées dans la section 5.1.1. Brièvement, la rapide décélération des gouttelettes d'eau sous les effets de la traînée (figure 5.11), induisant un temps de séjour qui augmente, provoque une fraction volumique légèrement supérieure en s'éloignant du point d'injection (figure 5.12), d'où une efficacité du rideau supérieure. Dans une direction transversale, l'homogénéité de la capacité d'atténuation du rideau est en accord avec l'invariance de l'épaisseur optique cumulée (figure 5.14) suivant cet axe.

Du fait de l'invariance de la transmission dans une direction transversale et afin d'effectuer des comparaisons plus aisées entre différentes configurations de pulvérisations, nous avons choisi de représenter la transmission totale suivant un axe vertical situé sous la buse d'injection (figure 5.30). L'évolution est évidemment identique à la représentation plan de la figure 5.29. Nous pouvons tout de même remarquer une différence de 10 % entre la transmittance obtenue près de l'injection et en bas du rideau.

Différentes configurations de rampes avec des injections descendantes vont à présent être

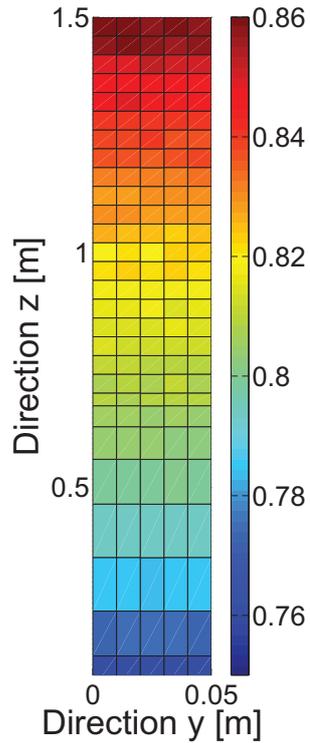


FIGURE 5.29 – Evolution dans un plan vertical de la transmittance totale

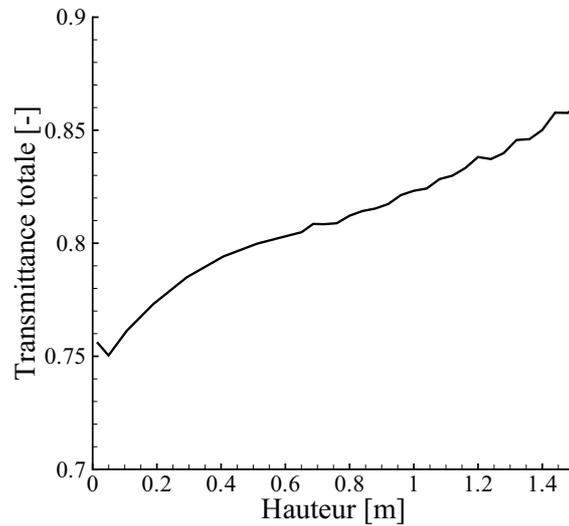


FIGURE 5.30 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau

soumises à un panneau rayonnant. Les effets engendrés sur la capacité d'atténuation du rideau dus à un changement d'angle d'injection, d'espacement entre les tuyères ou de positionnement de la rampe sont évalués. Il est important de signaler que pour l'ensemble de ces études la

granulométrie reste identique. Les résultats obtenus sont présentés en termes de transmissions totales.

### Variation de l'angle d'injection

Les effets d'une variation de l'angle d'injection sur l'efficacité du rideau sont visualisés sur la figure 5.31 où la transmission totale est donnée en fonction de la hauteur dans le spray. Comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe 5.1.2 lors de l'étude dans une configuration radiative à échelle réduite (les surfaces d'émission et de réception du rayonnement étant restreintes), une injection sur un angle plus ouvert diminue légèrement la transmission du rayonnement à travers le rideau. L'analyse de la dynamique du spray fournit les raisons de ces évolutions et a été également détaillée dans le paragraphe 5.1.2. Avec un angle d'injection plus ouvert, les gouttelettes d'eau vont être projetées vers le sol dans une dynamique plus lente, engendrant ainsi une vitesse (figure 5.18) et un temps de séjour plus faibles (tableau 5.2). Toutefois, le gain en atténuation reste très limité même avec une forte augmentation de l'angle de pulvérisation (une différence de 2 % maximum existe entre une injection avec un angle de 40° et un angle de 180° en faveur du deuxième cas). Nous pouvons remarquer que la différence de transmission visualisée dans la partie haute du rideau n'existe quasiment plus en se rapprochant du sol (en partie basse du rideau).

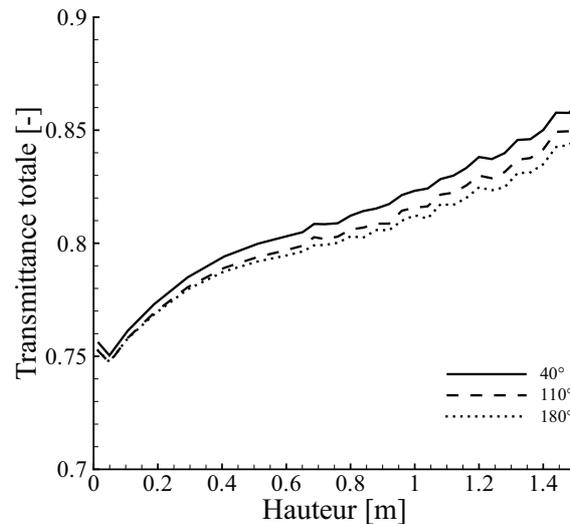


FIGURE 5.31 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau pour différents angles d'injection

### Variation de l'espacement entre les buses d'injection

Augmenter l'espacement entre deux buses consécutives sur une rampe d'injection a pour première conséquence de diminuer la quantité d'eau utilisée (par mètre linéaire de rampe). Les effets de ce changement (déjà étudiés dans le paragraphe 5.1.2 dans le cas d'une configuration expérimentale) sont visualisés sur la figure 5.32 où la transmittance totale est donnée en fonction de la hauteur dans le rideau. Soumis à un panneau rayonnant, les systèmes en rampes (avec

différents espacements entre tuyères : 10 cm, 20 cm et 30 cm) fournissent des évolutions de transmissions identiques aux cas déjà étudiés. Plus l'espacement entre buses va être réduit (plus la quantité d'eau injectée va être conséquente), plus le rideau va être efficace face au rayonnement. Toutefois, il faut garder à l'esprit que multiplier la quantité d'eau injectée ne va pas augmenter l'atténuation du brouillard par ce même facteur. A l'opposé, un espacement entre buses trop grand va rendre les sprays indépendants les uns des autres (l'avantage du recouvrement entre sprays donné par la rampe est perdu) et les transmittances vont se rapprocher de celles obtenues dans le cas d'un spray unique. Un écart de 6 % à 8 % (en fonction de la hauteur dans le rideau) est à constater entre les rampes avec des tuyères espacées de 10 cm et 20 cm et celui-ci atteint environ 10 % lorsque l'écartement est de 30 cm (par rapport au cas 10 cm). La dynamique du spray fournit les explications de ces évolutions qui ont été largement détaillées dans le paragraphe 5.1.2. Brièvement, les vitesses de gouttes sont légèrement plus faibles pour un espacement entre tuyères plus large engendrant un temps de séjour plus important. En revanche, la quantité d'eau injectée est plus faible. La configuration en rampe avec un espacement entre tuyères réduit possède l'avantage d'une meilleure capacité d'atténuation du rideau alors qu'avec un espacement plus large, le gain est obtenu sur le volume d'eau utilisé. Le but va alors être de trouver une stratégie de pulvérisation efficace tout en consommant un volume d'eau le plus réduit possible.

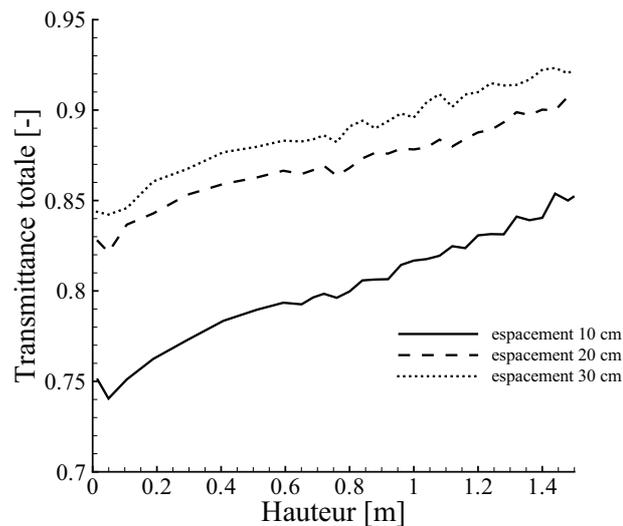


FIGURE 5.32 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau pour différents espacements entre buses

### Positionnement de la rampe d'injection

L'influence du positionnement de la buse par rapport à un plafond est à présent évaluée. Jusqu'à maintenant, l'ensemble des études réalisées correspondait à des pulvérisations placées au centre du domaine de calcul (à 1,5 m de hauteur, la dimension du domaine suivant la hauteur étant de 3 m). Dans le cas de configurations réelles utilisant des rampes en injection descendante, il semblerait logique que les tuyères soient fixées au plafond. Par conséquent, le principe de cette étude consiste à "coller" la buse d'injection à la paroi supérieure afin d'observer les effets engendrés sur la transmission du rayonnement.

La transmittance totale est donnée sur la figure 5.33 en fonction de la hauteur pour deux cas se différenciant par la taille du domaine de calcul. En effet, afin de garder la même distance entre la buse d'injection et la paroi inférieure (même hauteur de spray), la dimension du domaine suivant la hauteur a été divisée par deux (la paroi supérieure a été déplacée). La tuyère se trouve donc toujours à 1,5 m du sol, seule la distance à la paroi supérieure variant. L'allure globale de la transmittance totale est équivalente à celle obtenue dans le cas de référence (correspondant à une injection au centre dans la légende de la figure 5.33). En effet, la transmission décroît en s'éloignant du point d'injection (en se rapprochant du sol). En revanche, un écart d'atténuation d'environ 10 % existe en faveur de la configuration où le point d'injection est proche de la paroi. L'étude des vitesses de l'air et des gouttes, du temps de séjour ainsi que de la quantité d'eau au sein du rideau donnent les raisons de cette différence.

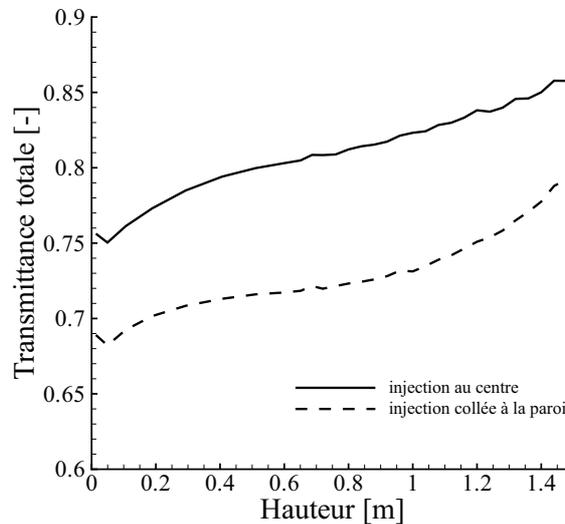


FIGURE 5.33 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur pour différents positionnements de la rampe

Rapprocher la tuyère près de la paroi supérieure a pour principal effet de diminuer la vitesse de l'air entraîné dans la zone de spray, comme le montre la figure 5.34(a) où la composante de la vitesse de l'air suivant  $z$  est représentée en fonction de la hauteur. La différence avec le cas de référence est notable. L'écart est maximal près de l'injection (avoisinant alors  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ) et s'amenuise en descendant dans le spray devenant par ailleurs quasi-inexistant en partie basse du rideau. Cette diminution de la vitesse de l'air s'explique par les boucles de recirculation engendrées par la présence des parois. En effet, dans le cas où le point d'injection est placé au centre du domaine de calcul, des boucles vont se créer (figure 5.7(b)) provoquant un air clairement descendant au-dessus du point d'injection (suivant la ligne centrale au-dessus de l'injection). Cette particularité va amener une accélération de l'air environnant ainsi que de la vitesse des gouttes (figure 5.35). Ce phénomène existe beaucoup moins dans le cas où la buse est "collée" à la paroi (figure 5.34(b)), l'air ne pouvant évidemment pas pénétrer au-dessus de la tuyère.

La dynamique plus lente de l'air environnant va modifier la vitesse des gouttelettes d'eau au sein du rideau. La composante de la vitesse suivant  $z$  des deux classes de gouttes déjà utilisées

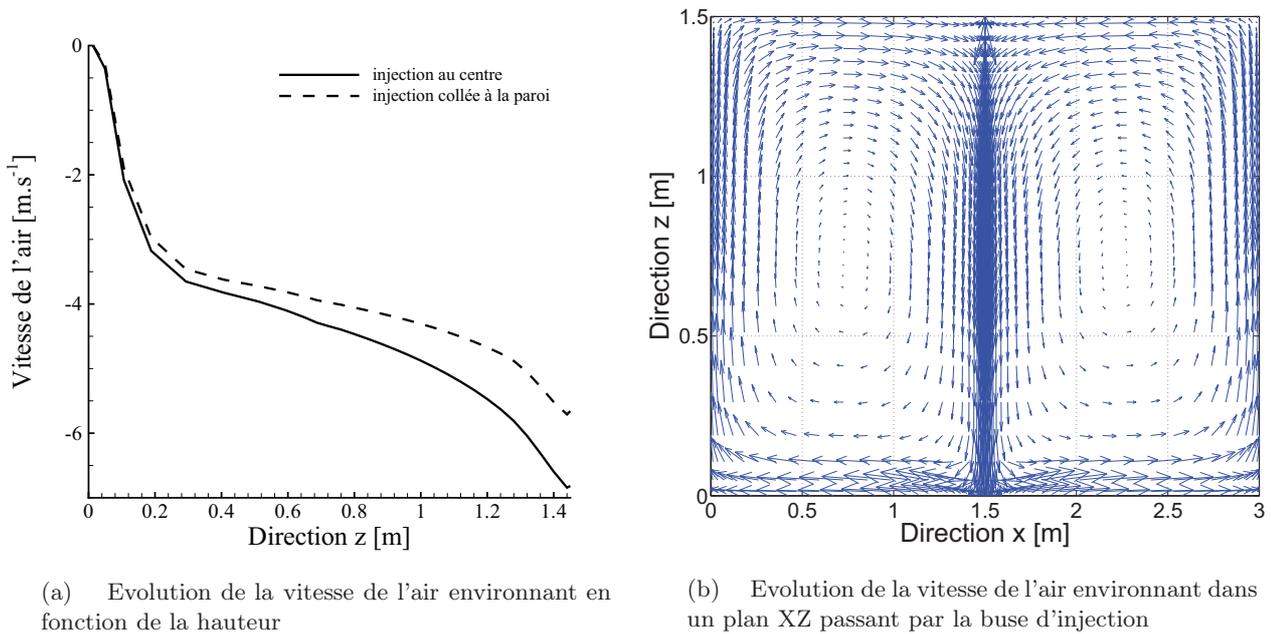


FIGURE 5.34 – Vitesse de l'air pour différents positionnements du point d'injection

précédemment est visualisée en fonction de la hauteur (suivant un axe vertical situé sous la buse d'injection) sur la figure 5.35. L'allure des courbes est identique pour les deux configurations étudiées. Les gouttes vont subir une décélération rapide sous l'effet de la traînée, celle-ci étant plus ou moins prononcée suivant la taille des gouttes considérées. Comme attendu, la vitesse des gouttes (que ce soit pour un diamètre de  $66 \mu\text{m}$  ou un diamètre de  $271 \mu\text{m}$ ) est légèrement plus faible lorsque le point d'injection est proche d'une paroi. Le temps de séjour s'en trouve lui aussi modifié lorsque le positionnement de la buse est différent (tableau 5.3). Le point d'injection se situant toujours à 1,5 m du sol (rappelons que seule la paroi supérieure a été déplacée), les temps de séjour entre les deux configurations sont par conséquent comparables. Alors que les temps de résidence des grosses gouttes dans le domaine de calcul restent inchangés quel que soit le positionnement de la tuyère, un facteur supérieur à deux existe entre les temps de séjour concernant les petites gouttes. La dynamique plus lente d'une injection proche de la paroi engendre de manière logique un temps de résidence plus long. Cet effet est seulement visible sur les petites gouttes du fait de leur faible inertie qui les contraint à être fortement soumises aux variations de l'écoulement d'air.

Diamètre	Position des buses	
	Milieu du domaine	Collée à la paroi
$66 \mu\text{m}$	0,88	2,01
$271 \mu\text{m}$	0,26	0,25

TABLE 5.3 – Temps de séjour (s) des gouttes pour deux pulvérisations se différenciant par la position de leur point d'injection

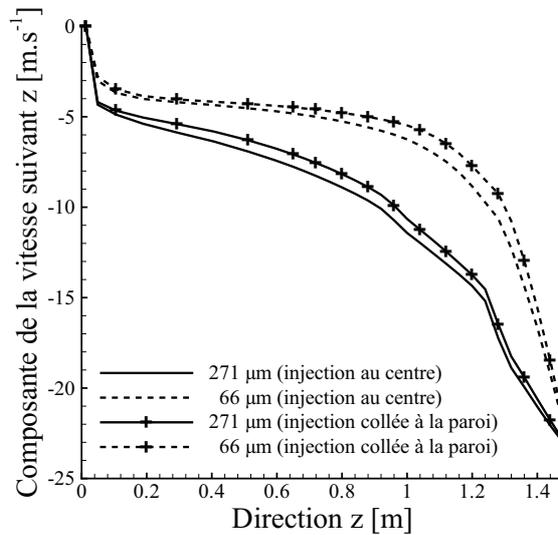


FIGURE 5.35 – Evolution de la vitesse de deux classes de gouttes en fonction de la hauteur pour différents positionnements de la rampe

Cette baisse de la vitesse des gouttelettes d'eau et l'augmentation de leur temps de séjour a un impact direct sur la quantité d'eau au sein du rideau. La figure 5.36 illustre la quantité d'eau moyenne dans une section par mètre linéaire de rampe rapportée à la hauteur des cellules en fonction de la position suivant z dans le rideau. L'évolution de cette caractéristique est favorable au cas d'un point d'injection "collé" à la paroi supérieure. En effet, la dynamique différente des gouttelettes d'eau engendre une quantité d'eau plus importante au sein du spray pour des propriétés d'injection identiques (granulométrie, pression d'alimentation, angles d'injection, espacement entre tuyères).

On retiendra de cette étude annexe que l'on a intérêt, si possible, à "coller" la rampe contre la paroi pour limiter l'entraînement d'air et augmenter la capacité d'atténuation du rideau.

#### 5.1.4 Bilan sur les rampes descendantes

Diverses configurations de rampes avec des injections descendantes ont été étudiées. La première étape a consisté à reproduire numériquement les conditions expérimentales afin de valider le code de simulation numérique utilisé en rampes. Le domaine de calcul présente, en comparaison avec la modélisation d'un spray unique, plusieurs plans de symétrie permettant ainsi une réduction conséquente du temps de calcul. La comparaison des transmittances numériques (spectrales, totales, représentatives) avec les données expérimentales est satisfaisante. Les rôles joués par l'angle d'injection et l'espacement entre les tuyères de la rampe ont été évalués. Il en est ressorti que des effets non-linéaires existent entre la dynamique du spray et les transferts radiatifs à travers celui-ci. En effet, il ne suffit pas de doubler la quantité d'eau injectée par deux (en réduisant l'espacement entre buses par ce même facteur) pour espérer obtenir un rideau d'eau deux fois plus efficace. L'évolution de l'atténuation est plus compliquée et il devient donc très difficile d'évaluer l'efficacité d'un rideau dans une configuration réelle à partir d'expérimentations à échelle du laboratoire sans passer par des essais grandeur nature. Le diamètre, la fraction vo-

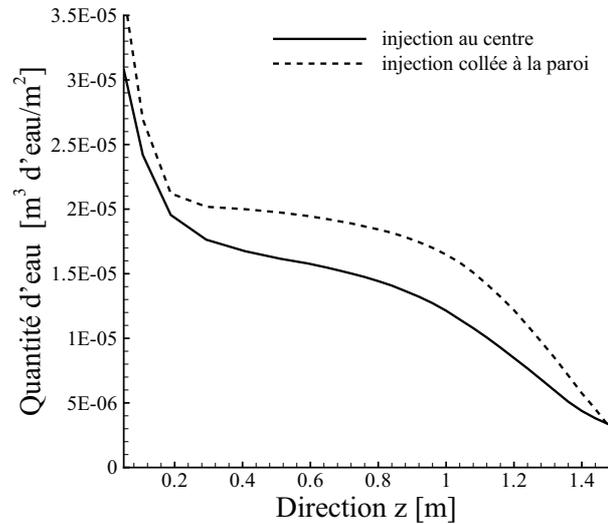


FIGURE 5.36 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur pour différents positionnements de la rampe

luminique, la vitesse des gouttes qui conditionnent le temps de séjour, sont autant de paramètres à analyser pour évaluer la capacité d'atténuation d'un rideau.

La deuxième étape a permis de se rapprocher de configurations plus réelles d'un point de vue radiatif en utilisant des surfaces d'émission et de réception du rayonnement étendues (symbolisant ainsi un incendie et une surface à protéger). De larges variations sur la transmittance spectrale sont à constater en fonction de la gamme de nombres d'onde considérée rendant alors le rideau d'eau inefficace dans certaines zones (notamment dans les grands nombres d'onde, donc les petites longueurs d'onde). Ces variations s'expliquent par les propriétés radiatives (absorption et diffusion) des gouttelettes d'eau. Les influences de l'angle d'injection et de l'espacement entre buses ont également été évaluées et ont amené aux mêmes conclusions que dans le cas d'une configuration en situation de transmission directe. Par ailleurs, nous avons observé qu'un positionnement différent de la buse en "collant" celle-ci à la paroi supérieure amène à une capacité du rideau légèrement meilleure.

Toutefois, quelle que soit la configuration étudiée, les atténuations du rayonnement restent tout de même limitées (l'atténuation maximale obtenue atteint 25 %). Rappelons tout de même que les tuyères utilisées délivrent des débits très faibles en comparaison avec des buses industrielles. D'autres stratégies de pulvérisation vont à présent être analysées en conservant les caractéristiques à l'injection identiques.

## 5.2 Rampes ascendantes

### 5.2.1 Cas de référence

Pour une rampe ascendante, le cas de référence étudié est similaire à celui de l'injection descendante (section 5.1.1). La buse utilisée est toujours celle référencée TP400067 à une pression d'injection de 4 bars. L'idée est alors de garder la même tuyère et de lancer les gouttes vers le haut. Expérimentalement, la rampe est placée à 30 cm du sol et elle est toujours constituée d'une

association de sept buses alignées. Le reste du dispositif expérimental et le protocole de mesures (chapitre 3) demeurent identiques.

Numériquement, la simulation est toujours effectuée dans un domaine réduit grâce à la présence de plans de symétrie situés sous la buse d'injection et au milieu de deux buses consécutives (le schéma de la configuration descendante est présenté sur la figure 5.1(a)). Les différences à signaler par rapport à la figure 5.1(a) sont le placement du point d'injection à 30 cm de la paroi inférieure, la direction d'injection qui est ascendante et une augmentation de la taille du domaine afin d'éviter que des gouttes impactent la paroi supérieure. Les dimensions de ce domaine sont désormais de 6 m x 0,05 m x 6 m. Le maillage s'en trouve par conséquent modifié, le nombre de cellules passant à 15000 (60 suivant la direction x, 5 suivant la direction y et 50 suivant la direction z). Rappelons les conditions initiales du domaine : une humidité absolue de 8 g d'eau/kg d'air et une température de 291 K. La zone d'émission du rayonnement et la zone de réception sont identiques à celles définies dans le paragraphe 5.1.1 (nous sommes dans un scénario où le rayonnement arrive dans un angle réduit, issu d'une source de petite surface). Le procédé de recopiage des différentes caractéristiques du spray est de nouveau effectué, permettant ainsi la simulation d'une rampe dans sa totalité.

L'étude des transmissions spectrales obtenues en utilisant un spray unique en configuration ascendante (section 4.3) a montré une différence de niveaux entre les mesures expérimentales et les résultats numériques (figure 4.28). Cet écart est toujours présent en associant plusieurs injections, comme le montre la figure 5.37(a). Afin d'étayer l'hypothèse selon laquelle le fractionnement en gouttes s'effectue différemment lorsque l'injection est ascendante (expérimentalement, la même buse est évidemment utilisée dans le cas descendant et ascendant), plusieurs simulations numériques de rampes sont réalisées au augmentant progressivement le diamètre moyen dans la loi de distribution granulométrique Log-normale. En effet, la distribution granulométrique injectée n'est probablement pas réaliste dans ce cas et les tailles de gouttes injectées sont probablement trop faibles d'où une atténuation surestimée. L'idée est alors d'évaluer numériquement si un changement de distribution granulométrique raisonnable permet de s'approcher des transmissions mesurées expérimentalement. La figure 5.37(a) représente les transmissions totales (en ce qui concerne la partie expérimentale) ou représentatives (pour la partie numérique) en fonction de la hauteur dans le rideau (nous nous plaçons au-dessus de la buse centrale de la rampe) pour une rampe avec des injections ascendantes espacées de 10 cm. Les trois simulations numériques diffèrent par le diamètre moyen utilisé dans la loi de distribution granulométrique Log-normale : 123  $\mu\text{m}$  (paramètre déduit grâce à l'étude granulométrique et utilisé dans le cas descendant), 147,6  $\mu\text{m}$  (augmentation de 20 % du diamètre moyen) et 184,5  $\mu\text{m}$  (augmentation de 50 %). Les transmissions mesurées expérimentalement sont toujours données avec un intervalle de confiance de plus ou moins 2 % (paragraphe 3.2.2). Les trois distributions granulométriques utilisées sont représentées sur la figure 5.37(b). La principale conclusion de cette étude de sensibilité est qu'une modification importante de la granulométrie injectée (une augmentation du diamètre moyen  $d_{log}$  de 50 %) est nécessaire pour retrouver des valeurs de transmissions voisines de celles obtenues expérimentalement. Cette observation laisserait donc à penser que changer le sens de la tuyère engendre une variation majeure sur la taille des gouttes injectées. Il serait évidemment intéressant d'avoir des données expérimentales sur la granulométrie en pulvérisation ascendante (petit rappel : dans notre cas, ces mesures n'ont pas pu être réalisées car il n'est pas possible actuellement d'utiliser le dispositif expérimental pour étudier une pulvérisation ascendante dont la zone de spray est très étendue). Nous pouvons également remarquer qu'une augmentation du diamètre des gouttes engendre, de manière logique, une baisse d'efficacité du rideau. Dans cette gamme de tailles de gouttes, le gain en atténuation avec la baisse du diamètre

est remarquable. On passe d'une atténuation d'environ 50 % à une atténuation supérieure à 80 %. Par ailleurs, l'allure des courbes de transmissions représentatives en fonction de la hauteur est quasi-identique malgré une modification du diamètre.

L'évolution des transmissions est plus difficile à analyser lorsque la rampe est placée en configuration ascendante du fait du double passage des gouttes dans la zone de spray (une fois en phase ascendante et une fois en phase descendante). Ce mouvement des gouttes crée un avantage certain au niveau de la capacité d'atténuation du rideau qui se trouve être, à configurations équivalentes (en gardant la même buse expérimentalement), de l'ordre de trois fois supérieure à celle observée avec des injections descendantes (rappelons que le cas descendant est présenté sur figure 5.8). En considérant une granulométrie identique, que ce soit en pulvérisations descendantes ou ascendantes (ce qui correspond à la courbe de transmissions représentatives dans le cas où  $d_{log} = 123 \mu\text{m}$ ), le gain est considérable et l'atténuation est quasiment cinq fois supérieure en faveur du cas ascendant. Une comparaison numérique plus approfondie entre les différentes stratégies de pulvérisation en rampes est présentée plus loin dans la section 5.4. Au regard des mesures expérimentales, l'efficacité du rideau connaît d'abord une augmentation au fur et à mesure que l'on s'élève dans le spray. Ensuite, au-dessus de la zone où la majorité des gouttes va entamer la phase descendante (soit 120 cm au-dessus du point d'injection, équivalent à 1,50 m de haut pour la rampe étudiée), la transmission va évidemment diminuer. Notons tout de même que l'atténuation reste encore élevée à 1,70 m du sol (1,40 m de la buse d'injection) et très largement supérieure au cas d'une rampe descendante (figure 5.8). Numériquement, l'évolution de la transmittance est similaire dans les trois cas simulés. Malgré quelques différences, l'allure générale des courbes de transmissions représentatives est proche de celle obtenue expérimentalement (on peut penser que si des mesures expérimentales avaient été réalisables plus haut dans le rideau, les transmissions obtenues à ces hauteurs auraient été probablement encore plus faibles, ce qui se rapprocherait de l'allure des courbes numériques). Le principal désaccord concerne la hauteur du spray qui est surestimée dans la simulation (provoquant ainsi l'augmentation de la transmission plus haut dans le rideau). De nouveau, les variations de la fraction volumique et du diamètre sont à l'origine de ces évolutions. Par ailleurs, il a été vérifié que pour les trois cas numériques (se différenciant par leur granulométrie), les paramètres dynamiques du rideau évoluent sensiblement de la même manière (seuls les niveaux atteints peuvent varier). L'analyse de la dynamique est donc faite pour la configuration dont la granulométrie reste identique au cas d'une rampe descendante (c'est-à-dire pour  $d_{log} = 123 \mu\text{m}$ ).

L'hypothèse selon laquelle le fractionnement en gouttes s'effectue différemment dans une injection ascendante a également été effectué sur le cas du spray unique (étudié dans le chapitre 4). L'augmentation de 50 % du diamètre moyen de la loi de distribution granulométrique Log-normale est utilisée (cas qui se rapproche le plus des mesures expérimentales en rampes). La figure 5.38 présente les transmittances totales expérimentales et les transmittances représentatives numériques (pour une granulométrie inchangée et pour une variation de 50%) en fonction de la hauteur. Les gouttes simulées étant plus grosses, une augmentation de la transmission est évidemment retrouvée. En revanche, alors qu'on sous-estimait encore légèrement la transmission dans le cas d'une rampe (figure 5.37(a)), pour un spray ascendant unique, cette caractéristique est maintenant surestimée. De plus, le rapprochement avec les données expérimentales n'est pas aussi flagrant que dans le cas d'une rampe ascendante. Par conséquent, en connaissant la capacité d'atténuation du rideau, il est difficile de remonter aux caractéristiques du spray correspondant à la configuration étudiée. Le lien entre dynamique du rideau et transferts radiatifs est plus complexe, ce qui rend difficile, dans ce cas précis, d'évaluer une distribution granulométrique sans

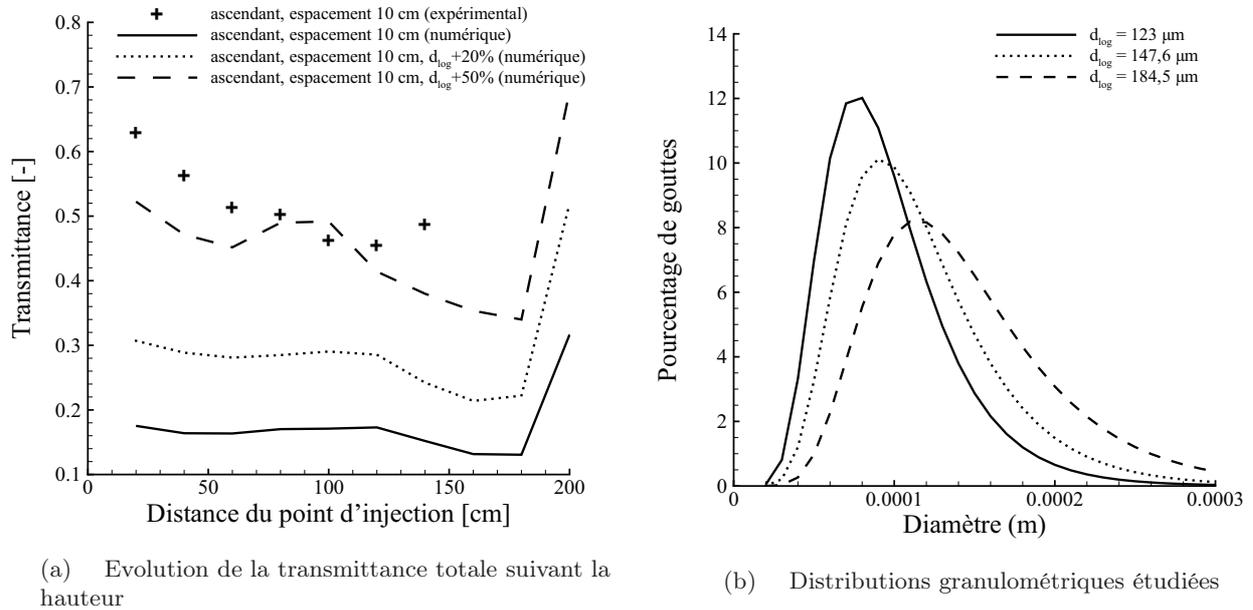


FIGURE 5.37 – Etude de la transmission du rayonnement pour une rampe en injection ascendante

passer par des mesures expérimentales.

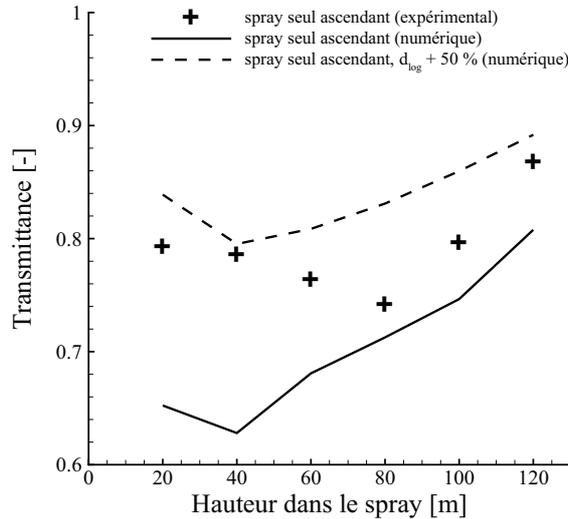


FIGURE 5.38 – Evolution de la transmission du rayonnement pour un spray unique en injection ascendante pour différentes distributions granulométriques

L'avantage d'une configuration ascendante par rapport à une configuration descendante "classique" est le double passage des gouttes dans la zone de spray, comme nous l'avons déjà vu pour

le spray unique dans le paragraphe 4.2.3 (avec une première phase ascendante où les gouttes sont ralenties sous les effets de la gravité et de la traînée et une deuxième phase descendante qui s'effectue majoritairement à contre-courant de l'écoulement d'air). La représentation des trajectoires de deux classes de gouttes ( $66 \mu\text{m}$  et  $271 \mu\text{m}$ ) sur la figure 5.39 permet d'illustrer ce phénomène. Les conclusions sont similaires au cas du spray seul en configuration ascendante, la seule différence résidant dans le fait que plusieurs injections sont associées. Les gouttes injectées vers le haut vont connaître une phase ascendante puis une phase descendante avec pour certaines d'entre elles des trajectoires aléatoires fortement influencées par les effets de turbulence de l'air environnant. Du fait de leur petite taille, les petites gouttes vont être emportées par le mouvement de l'air qui est orienté selon une direction ascendante. Cette particularité provoque ainsi la sortie de certaines gouttes de la zone du rideau comme le montrent les visualisations des trajectoires (figure 5.39) et du diamètre de Sauter (figure 5.40). Au-delà de 2,5 m de hauteur où la majorité des grosses gouttes n'évolue plus, nous pouvons tout de même remarquer la présence de gouttes de petites tailles.

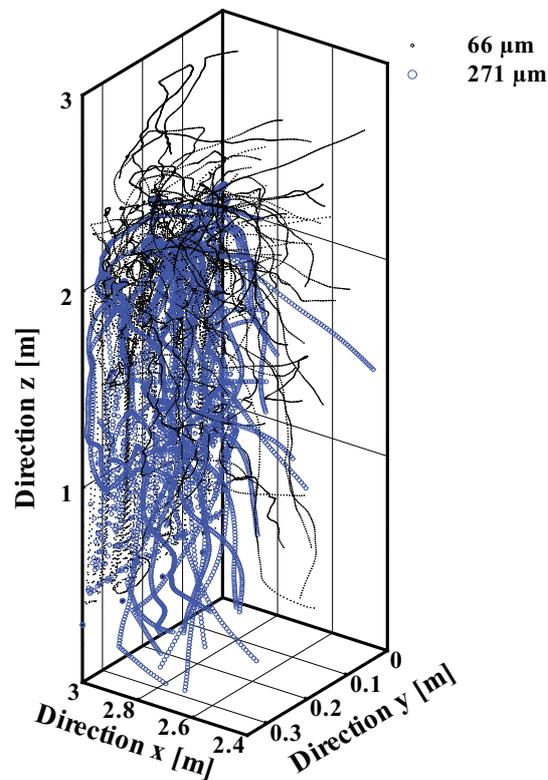


FIGURE 5.39 – Reconstruction du rideau grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes

L'évolution du diamètre de Sauter, représentée sur la figure 5.40 suivant deux plans verticaux passant par la buse d'injection, vient appuyer les observations faites sur les trajectoires de gouttes. Le diamètre, du fait du recouvrement des différents sprays, est quasi-homogène dans la zone du rideau avec une valeur avoisinant les  $120 \mu\text{m}$ . La présence de gouttes de petites tailles s'échappant du rideau est de nouveau observée. Toutefois, comme nous le verrons lors de l'étude de la fraction volumique (figure 5.42), la quantité d'eau dans ces zones est négligeable. Une autre particularité est un diamètre des gouttes plus faible dans les premiers centimètres du ri-

deau (proche de l'injection). L'explication provient de la vitesse des gouttes. En effet, les petites gouttes, de faible inertie (donc plus légères), vont subir une décélération plus rapide (que les gouttes de plus grandes tailles), engendrant ainsi une plus forte présence de ces dernières dans la zone de proche injection.

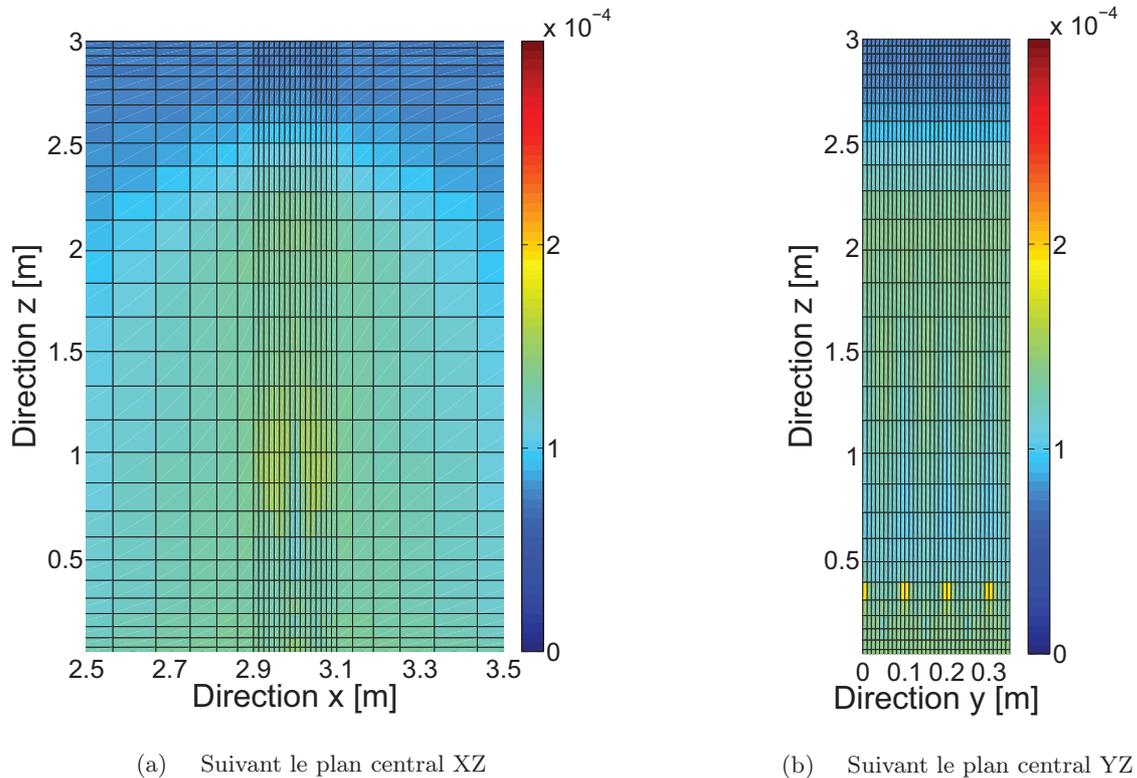


FIGURE 5.40 – Evolution du diamètre de Sauter [ $\mu\text{m}$ ]

D'ailleurs, la composante de la vitesse suivant  $z$  de deux classes de gouttes ( $66 \mu\text{m}$  et  $271 \mu\text{m}$ ) suivant une direction verticale sous la buse d'injection est représentée sur la figure 5.41. Comme attendu, les grosses gouttes sont légèrement plus rapides que les gouttes de plus petites tailles (l'écart est faible mais il est réel). D'ailleurs, l'interprétation des résultats est rendue difficile car cette vitesse tient compte à la fois de la phase ascendante puis descendante des gouttes (les différents paramètres du spray simulé sont issus de moyennes réalisées sur chaque cellule). Toutefois, dans la phase descendante, les vitesses des gouttes sont probablement faibles puisqu'à partir d'une vitesse nulle (obtenue une fois que les gouttes ont atteint leur point haut), elles vont majoritairement se déplacer à contre-courant. Remarquons que sous l'injection (plus précisément en-dessous de  $20 \text{ cm}$ ), les composantes suivant  $z$  des vitesses sont négatives, montrant ainsi la redescente des gouttes. De manière générale, les courbes de vitesses ont la même allure et montrent que les gouttes dirigées vers le haut vont rapidement décélérer sous les effets de la traînée et de la gravité jusqu'à atteindre une vitesse nulle.

L'évolution de la fraction volumique suivant deux plans verticaux passant par la buse d'injection est présentée sur la figure 5.42. Logiquement, grâce au double passage des gouttes dans la

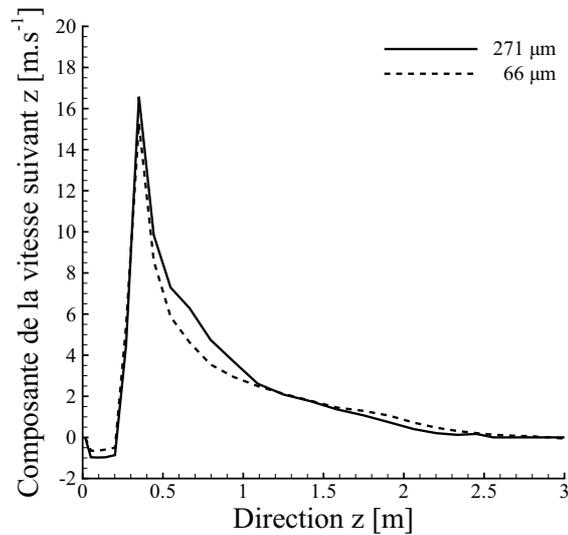
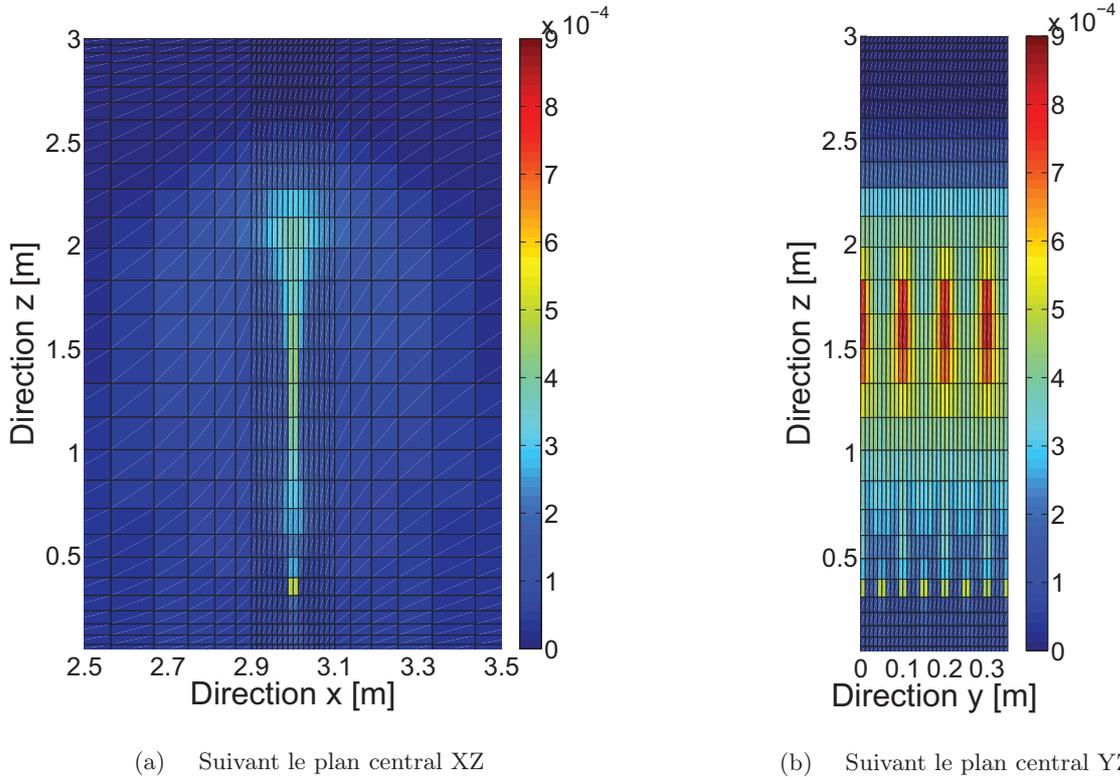


FIGURE 5.41 – Vitesses de deux classes de gouttes

zone du rideau, les niveaux atteints sont supérieurs aux cas d'une injection ascendante en spray unique et d'une rampe descendante. Des variations sont tout de même à constater en fonction de la hauteur dans le brouillard. En effet, la fraction volumique est plus faible dans la partie basse du rideau car les gouttes, à peine sortie de l'injection, ont une vitesse élevée (dans leur phase ascendante). Le fort ralentissement des gouttes (figure 5.41), en accord avec un temps de séjour qui augmente, va provoquer leur accumulation dans la partie centrale du brouillard, d'où une augmentation de la fraction volumique. De plus, la retombée des gouttes dans la zone de spray, retombée pouvant même s'effectuer à contre-courant de l'écoulement d'air, va renforcer cet accroissement. Dans cette partie centrale, des disparités de fraction volumique sont toutefois à signaler dans une direction transversale à l'écoulement et sont principalement dues au recouvrement des sprays. Enfin, dès lors que les gouttes vont entamer leur phase descendante, la fraction volumique va évidemment diminuer (dans la partie haute du rideau). Comme nous l'avons fait remarqué lors de l'étude du diamètre de Sauter dans ces mêmes plans (figure 5.40), la fraction volumique au-delà de 2,5 m de hauteur est bien négligeable (malgré la présence de petites gouttes).

L'étude des différentes caractéristiques du spray qui vient d'être réalisée permet d'expliquer la forte augmentation du temps de séjour par rapport à celui obtenu dans une configuration de rampes descendantes. En effet, ce dernier s'élève à 12,19 secondes pour une goutte de 66 μm (pour rappel, il n'était que de 0,88 seconde en descendant, soit un facteur 13 entre les deux) et 2,68 secondes pour une goutte de 271 μm (0,26 seconde pour la rampe descendante soit un facteur 10 entre les deux). Alors que l'association de plusieurs injections dans le cas descendant provoquait une dynamique plus rapide des gouttes tendant à diminuer le temps de séjour par rapport à l'étude en spray seul (paragraphe 5.1.1), le cas ascendant va également engendrer une dynamique plus rapide mais cette fois-ci bénéfique pour le temps de résidence des gouttes (rappelons que dans le cas d'une injection ascendante unique, le temps de séjour pour une goutte de 66 μm est de 10,45 secondes et de 1,58 seconde pour une goutte de 271 μm). En effet, une dynamique plus rapide va d'abord donner lieu à une augmentation de la hauteur du rideau (per-


 FIGURE 5.42 – Evolution de la fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau/ $\text{m}^3$  d'air]

mettant par ailleurs de protéger une zone plus étendue), ce qui provoque une phase descendante des gouttes plus longue. De plus, la vitesse de l'air étant plus forte, la retombée des gouttes à contre-courant va probablement s'effectuer plus lentement. L'ensemble de ces phénomènes amène alors un temps de séjour plus élevé pour cette configuration.

Etudions maintenant le rideau dans une direction transversale à l'écoulement. Pour ce faire, des mesures de transmissions sont réalisées suivant cette direction pour deux hauteurs différentes (40 et 80 cm au-dessus du point d'injection). La figure 5.43 rapporte les résultats obtenus. Les courbes de transmissions totales varient peu en fonction de la position dans le rideau et confirment les niveaux d'atténuation déjà observés auparavant. L'étude de l'épaisseur optique vient renforcer ces conclusions. La figure 5.44 présente l'épaisseur optique cumulée suivant l'axe  $x$  pour une longueur d'onde de  $5 \mu\text{m}$  dans un plan YZ. Comme attendu, cette grandeur est relativement homogène dans la direction transversale aux injections de sprays. Suivant la hauteur dans le rideau, les variations de l'épaisseur optique sont identiques aux évolutions de l'atténuation. En effet, celle-ci va d'abord augmenter au fur et à mesure que l'on s'élève dans le spray jusqu'à atteindre sa valeur maximale à environ 2 m (ce qui correspond également au maximum d'efficacité du rideau). Puis, lorsque la population de gouttes va baisser (dès que celles-ci vont commencer leur phase descendante), l'épaisseur optique va faire de même.

Bilan sur l'étude de cas :

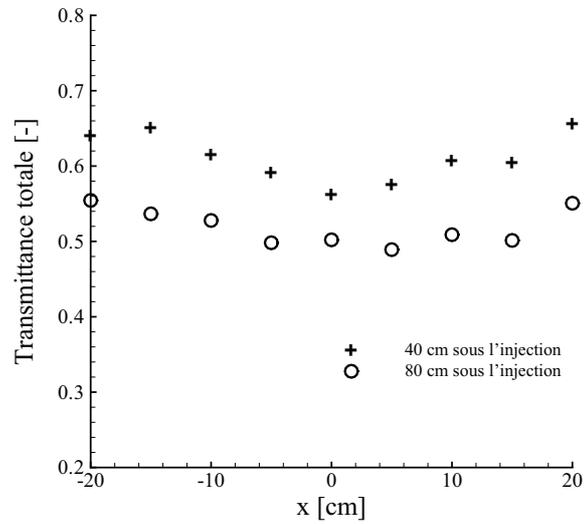


FIGURE 5.43 – Evolution de la transmission totale dans une direction transversale à l'écoulement

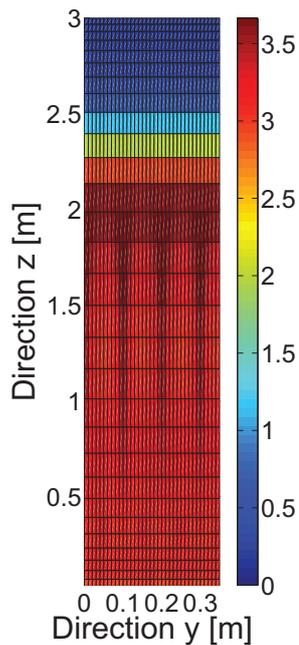


FIGURE 5.44 – Evolution dans un plan vertical de l'épaisseur optique cumulée

De manière logique, l'association de plusieurs injections ascendantes en rampe permet d'améliorer l'efficacité du rideau par rapport à l'utilisation d'un seul spray (section 4.2.4) et par rapport à une configuration descendante en rampe (section 5.1.1). De manière générale, dans une optique de protection, les atténuations obtenues commencent à devenir très intéressantes au vu du faible débit des tuyères utilisées (expérimentalement, des atténuations de l'ordre de 50 % pour un débit par mètre linéaire de buses de  $3 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Toutefois, un écart important, probablement

imputable à une distribution granulométrique des gouttes différente en injection ascendante, sépare les résultats numériques des mesures expérimentales (écart déjà remarqué dans le cas d'un spray ascendant unique). En revanche, il est intéressant de constater qu'en conservant la même granulométrie à la fois dans le cas descendant et ascendant, le rideau d'eau possède alors une protection très efficace avec des atténuations atteignant alors les 85 %. Nous pouvons également remarquer une relative homogénéité du rideau dans une direction transversale à l'écoulement. Ces niveaux obtenus s'expliquent par la dynamique de la rampe qui permet d'avoir au sein du spray des évolutions des différentes propriétés (fraction volumique, diamètre) bénéfiques pour ainsi obtenir un véritable bouclier radiatif.

### 5.2.2 Paramètres influents

Les deux types de buses (TP400067, TP1100067) sont utilisés expérimentalement en rampes ascendantes (le dispositif est détaillé dans le chapitre 3) et les effets de l'espacement entre tuyères, de l'angle d'injection et de la pression sont observés.

#### Espacement entre buses et angle d'injection

De la même manière que dans le cas d'une rampe en configuration descendante (section 5.1.2), le rideau d'eau est balayé suivant un axe vertical sous la buse d'injection (figure 5.45) et suivant deux lignes perpendiculaires à cet axe (figure 5.46) afin de donner les valeurs expérimentales de transmissions du rayonnement en tout point du brouillard. Les symboles représentent les points de mesures effectués. Les lignes pointillées sont uniquement fournies pour une meilleure visualisation. En injection ascendante, le niveau d'atténuation obtenu est logiquement supérieur à celui mesuré dans le cas descendant avec une variation verticale plus complexe comme nous l'avons déjà vu dans le paragraphe précédent. Les gouttes sont pulvérisées vers le haut et dans chacun des cas, le niveau d'atténuation reste encore élevé à 1 m du point d'injection (1,30 m du sol). En comparant les deux stratégies de pulvérisation (voir paragraphe 5.1.2 pour le cas descendant), c'est un facteur 2 voire 3 qui est observé en terme de gain d'atténuation. La variation de transmission obtenue pour des rampes avec des espacements différents entre buses est également complexe. Dans chacun des cas étudié, l'atténuation passe par un minimum dont la position verticale varie. Un espacement réduit entre buses permet une protection plus homogène avec une atténuation qui décroît moins vite en partie haute. Par contre, en partie basse, le niveau d'atténuation est légèrement moins bon quand l'espacement est réduit alors que le nombre de buses (donc le débit) par mètre de rampe est doublé. Une dynamique des gouttes totalement différente du cas descendant est à l'origine de ce gain. En effet, le mouvement ascendant puis descendant des gouttes, éventuellement à contre-courant dans la phase descendante, est fortement tributaire des modifications d'écoulement de l'air entraîné selon la distance entre buses.

En ce qui concerne l'angle du cône d'injection, un angle réduit permet aux gouttes d'atteindre un point haut supérieur avant la phase de chute, ce qui résulte en une meilleure atténuation en haut du rideau. Près du point d'injection (en bas du rideau), un angle plus ouvert favorise malgré tout l'atténuation. Notons tout de même que dans le cas d'une rampe munie de tuyères TP400067 espacées de 10 cm, l'atténuation atteint encore un niveau d'environ 50 % à 1,40 m du point d'injection (1,70 m du sol).

La figure 5.46 propose l'évolution de la transmission selon deux lignes horizontales à 40 cm et à 80 cm au-dessus de la rampe d'injection pour les deux types de buses (TP400067 sur la figure 5.46(a) et TP1100067 sur la figure 5.46(b)). La capacité du spray à atténuer le rayonnement

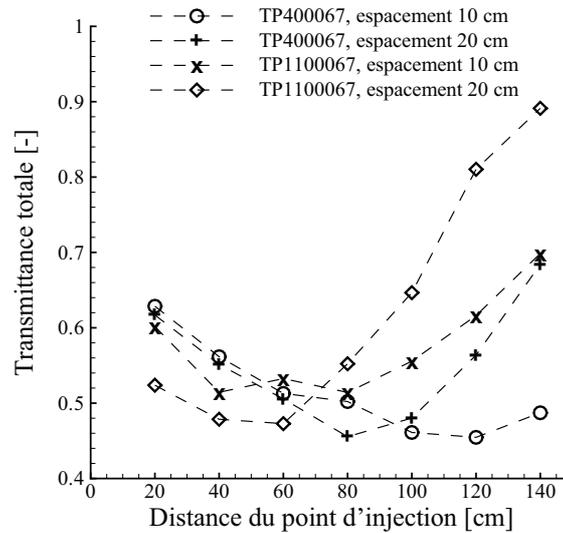


FIGURE 5.45 – Evolution de la transmission totale en fonction de la hauteur selon un axe vertical sous une buse d'injection

est relativement homogène. On notera tout de même une légère augmentation de la transmission quand on s'éloigne de la buse centrale de la rampe. Quel que soit l'espacement entre les tuyères de la rampe, les transmissions obtenues sont du même ordre de grandeur, confirmation qu'en partie basse les efficacités des rideaux restent voisines. Du fait d'un angle plus réduit, une différence d'atténuation existe entre une position à 20 cm et 40 cm du point d'injection pour la tuyère TP400067, différence inexistante quand l'angle est plus ouvert (TP1100067). Toutefois, comme nous l'avons conclu précédemment sur la figure 5.45, les écarts de transmissions en fonction de l'angle d'injection et de l'espacement entre buses se rencontrent principalement en partie haute du rideau.

### Influence de la pression

L'évolution de la transmission du rayonnement obtenue suivant la pression d'injection est illustrée sur la figure 5.47 pour les deux types de tuyères considérés. Ces mesures ont été réalisées à 80 cm au-dessus du point d'injection (celui situé au centre de la rampe) pour les quatre configurations déjà présentées précédemment. De manière générale, la transmission diminue (l'atténuation croît) quand la pression augmente jusqu'à atteindre une limite où cette augmentation de pression ne sera plus bénéfique. Cette limite varie logiquement en fonction de la configuration étudiée. Par exemple, dans le cas d'une rampe munie de tuyères TP400067 espacées de 10 cm, la capacité d'atténuation du rayonnement à 5 bars est légèrement inférieure à celle obtenue à 4 bars. L'explication, rendue compliquée du fait d'une phase ascendante puis descendante, provient toujours de la dynamique des gouttes. Comme nous l'avons déjà vu au paragraphe 5.1.2, une augmentation de la pression amène une quantité d'eau plus élevée et un diamètre des gouttes plus petit. La vitesse d'éjection des gouttes devient également plus importante, engendrant une hauteur de rideau plus grande. Contrairement au cas descendant, il semble difficile de prédire à l'avance l'évolution du temps de séjour des gouttes en fonction de la pression. En effet, une vitesse des gouttes plus forte (pression plus élevée) provoque en partie basse du rideau un temps

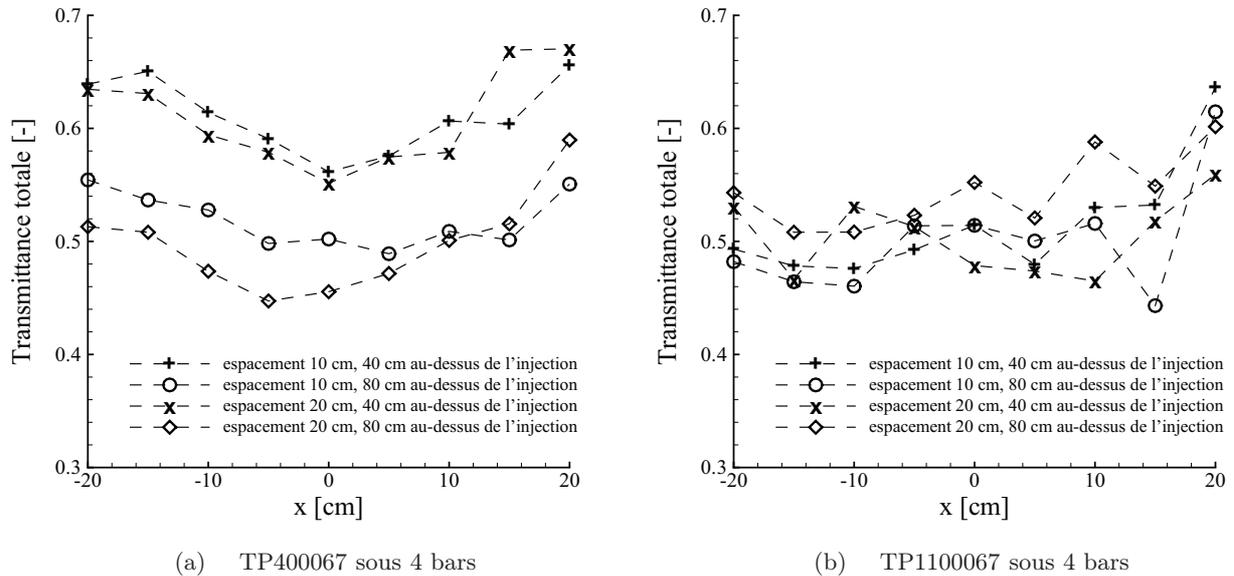


FIGURE 5.46 – Evolution transversale de la transmission totale

de séjour plus faible. Cependant, les particules d'eau vont atteindre un point haut plus élevé permettant ainsi d'avoir un rideau efficace sur une zone plus étendue. Le temps de séjour des gouttes dans la phase descendante s'en trouve alors augmenté. On comprend bien toute la difficulté pour expliquer les évolutions des transmissions dans le cas d'injections ascendantes. Suivant l'angle d'injection, les transmissions mesurées sont voisines avec un léger avantage pour un angle réduit. En revanche, les écarts de transmissions suivant l'espacement entre buses sont plus marqués. Pour les basses pressions (dans la gamme de pressions utilisée expérimentalement), un espacement de 10 cm entre les tuyères est préférable (gardons à l'esprit qu'un espacement réduit augmente la quantité d'eau utilisée) alors que pour des pressions plus élevées, un écartement entre buses de 20 cm amène à des atténuations meilleures.

### 5.2.3 Scénario avec un panneau rayonnant

De la même manière que dans le cas descendant (section 5.1.3), un scénario de panneau rayonnant est étudié pour différentes configurations en rampes avec des injections ascendantes. Les effets engendrés par la variation de certains paramètres tels que l'angle d'injection ou l'espacement entre buses sont estimés.

#### Cas de référence

D'un point de vue de la dynamique du spray, le cas de référence correspond à celui déjà défini dans le paragraphe 5.2.1. On conserve également une distribution granulométrique identique à la configuration descendante (c'est-à-dire qu'on ne prend pas en compte une éventuelle différence de granulométrie due à une injection dans le sens inverse de la gravité). Le diamètre moyen de la loi de distribution granulométrique Log-normale est par conséquent de  $123 \mu\text{m}$ . D'un point de vue radiatif, le panneau rayonnant utilisé reste similaire au niveau de sa température et de ses dimensions à celui utilisé dans le cas des rampes en injections descendantes (paragraphe 5.1.3).

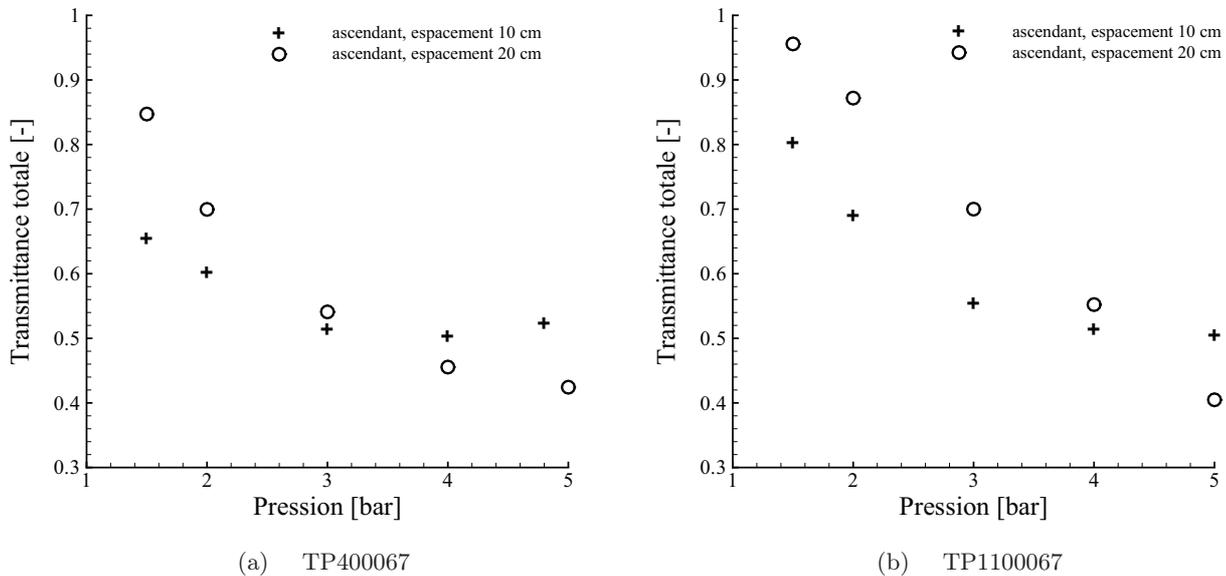


FIGURE 5.47 – Evolution de la transmission en fonction de la pression pour des rideaux générés par deux types de buses

La surface de réception du rayonnement (correspondant à la cible à protéger) a les mêmes dimensions que le panneau (elle s'étend donc sur toute la largeur du rideau et sur 1,5 m de hauteur).

La transmission spectrale, visible sur la figure 5.48 en fonction du nombre d'onde pour trois hauteurs différentes (20 cm, 80 cm et 120 cm au-dessus du point d'injection), subit des variations similaires à celles rencontrées sur le cas de rampe avec des injections descendantes (figure 5.28). La comparaison entre les cas descendant (figure 5.28) et ascendant (figure 5.48) montrent tout de même une différence au niveau des bandes de vapeur d'eau. Elles sont effectivement moins prononcées pour une injection ascendante à cause d'un niveau de transmission beaucoup plus bas. Les explications (sur l'évolution de la transmittance hors bandes de vapeur d'eau) sont identiques au cas descendant (elles sont données dans le paragraphe 5.1.3) et les fortes variations de la transmittance spectrale aux alentours de  $2600\text{ cm}^{-1}$  et pour des nombres d'onde supérieurs à  $4000\text{ cm}^{-1}$  sont imputables à la forte baisse du coefficient d'absorption des gouttes. Ces évolutions suivent en effet les propriétés radiatives des gouttelettes d'eau (absorption, diffusion et fonction de phase présentées dans la section 4.2.2). Le rideau perd ainsi beaucoup de son efficacité dans les grands nombres d'onde (petites longueurs d'onde). Dans cette zone, la transmission avoisine les 60 % alors qu'elle ne s'élève qu'à 20 % dans les gammes de nombres d'onde où les coefficients d'absorption et de diffusion sont équivalents. La capacité d'atténuation du rideau est alors divisée par deux. L'atténuation globale du rideau dépendra en fait de la répartition spectrale du rayonnement émis par la source. En comparant avec la rampe en injection descendante, un facteur quatre existe sur l'atténuation en faveur du cas ascendant en précisant toutefois qu'il faut parvenir à conserver la même granulométrie.

Il faut garder à l'esprit que ces fortes variations de la transmittance spectrale ne permettent plus de considérer la transmittance représentative comme une bonne approximation de la transmittance totale (comme nous l'avons déjà souligné dans le cas de la rampe descendante). Par

conséquent, l'analyse entre les différents cas est faite avec des transmittances totales.

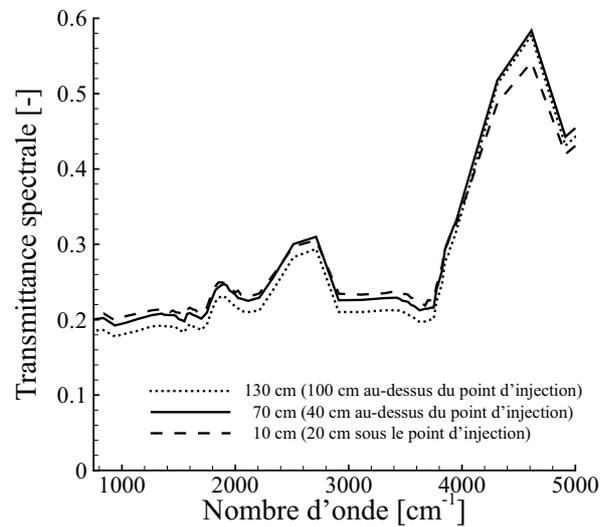


FIGURE 5.48 – Evolution de la transmittance spectrale à différentes hauteurs dans le rideau

La transmission totale obtenue est présentée en fonction de la hauteur sous le point d'injection sur la figure 5.49 (il a été préalablement vérifié que cette grandeur est constante suivant une direction transversale à l'écoulement). Les niveaux d'atténuation obtenus sont importants et atteignent 77 % en moyenne. Une augmentation de la capacité d'atténuation du rideau en s'éloignant du point d'injection (en montant dans le rideau) est à constater et un niveau de 79 % est atteint à 1,5 m du sol. L'explication détaillée de cette variation est fournie dans le paragraphe 5.2.1. Rappelons brièvement que les gouttes vont décélérer sous les effets de la traînée et de la gravité (figure 5.41) entraînant ainsi une quantité d'eau plus importante en s'éloignant du point d'injection (figure 5.42). Les gouttes redescendant dans la zone de spray (avec une vitesse faible car elles se retrouvent à contre-courant) vont également contribuer à une forte augmentation de la quantité d'eau, conduisant à une meilleure efficacité du rideau. Le temps de séjour va s'en trouver également largement augmenté (un facteur 10 existe entre le cas descendant et ascendant, paragraphe 5.2.1).

### Variation de l'angle d'injection

Plusieurs systèmes en rampes munies d'injections ascendantes et se différenciant par des angles d'injection différents ( $40^\circ$ ,  $110^\circ$  et  $180^\circ$ ) sont soumis à un panneau rayonnant. Les effets engendrés sur la transmittance sont visualisés sur la figure 5.50 en fonction de la hauteur. L'allure générale des courbes de transmittances obtenues est voisine. En effet, sous le point d'injection (rappelons que celui-ci se situe à 30 cm du sol) où seules sont présentes des gouttes dans leur phase descendante, une légère perte d'efficacité du rideau est à signaler. En revanche, au-dessus de la buse, l'atténuation augmente progressivement jusqu'à 1,5 m de hauteur. Toutefois, les variations sont faibles et la transmission se situe majoritairement entre 25 % et 30 % pour les trois cas considérés (pour une hauteur allant jusque 1,5 m). Un angle plus ouvert va augmenter la

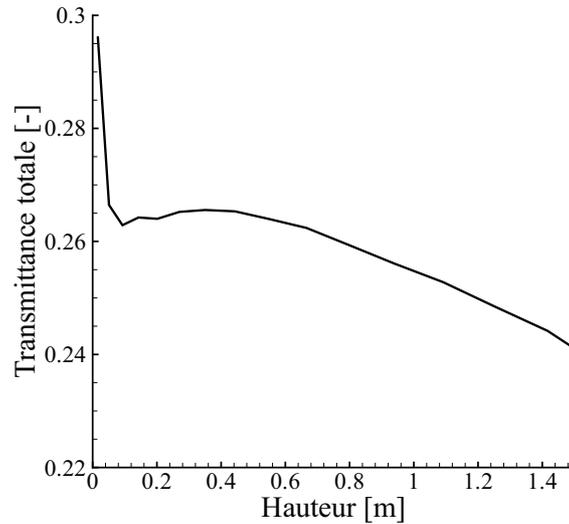


FIGURE 5.49 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau

capacité d'atténuation du rideau. Une différence d'environ 5 % est à constater entre les deux configurations extrêmes (angle d'injection de  $40^\circ$  et  $180^\circ$ ). La vitesse des gouttes (corrélée à la vitesse de l'air environnant), leur temps de séjour ainsi que la quantité d'eau au sein du rideau expliquent l'évolution des transmittances. La première caractéristique du spray à considérer est la vitesse des gouttes. Sur les figures 5.51 sont visualisées les composantes de vitesse suivant  $z$  de deux classes de gouttes ( $66 \mu\text{m}$  et  $271 \mu\text{m}$ ) en fonction de la hauteur pour des systèmes de rampes avec différents angles d'injection. Une injection sur un angle plus ouvert va entraîner une légère baisse de la vitesse (toutefois cette baisse reste limitée). De manière générale, nous retrouvons une chute de la vitesse des gouttelettes à partir de leur point d'injection due aux effets conjugués de la traînée et de la gravité. Cette baisse est évidemment plus rapide pour des gouttes de plus petites tailles. Remarquons une vitesse négative de l'ordre de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sous le point d'injection, signe de la présence de gouttelettes d'eau dans leur phase descendante.

Cette évolution de la vitesse va évidemment influencer sur le temps de séjour des gouttes dans le domaine (tableau 5.4). Un angle du cône d'injection plus ouvert engendre une baisse du temps de séjour. Pour exemple, une gouttelette d'eau d'un diamètre de  $66 \mu\text{m}$  va voir son temps de résidence divisé par deux lorsque l'angle d'injection va passer de  $40^\circ$  à  $180^\circ$ . Cet effet est moins sensible sur les gouttes de plus grandes tailles, comme nous le montre le tableau 5.4. Avec une injection selon un grand angle, on s'attend à obtenir une hauteur de rideau réduite.

Cet abaissement de la taille du rideau (suivant sa hauteur) lorsque l'angle du cône d'injection augmente est visible sur la figure 5.52 illustrant la quantité d'eau en fonction de la hauteur dans le brouillard. De plus, un angle réduit va augmenter la quantité d'eau au sein du rideau. En revanche, peu de différences existent pour des angles de  $110^\circ$  ou  $180^\circ$ , ce qui confirme l'écart réduit entre les transmittances de ces deux cas (figure 5.50). Globalement, la quantité d'eau croît en s'éloignant de la buse d'injection. Au-dessus de la zone où les gouttelettes d'eau ont atteint leur point culminant à partir duquel elles vont entamer leur phase descendante, la quantité d'eau subit logiquement une décroissance rapide.

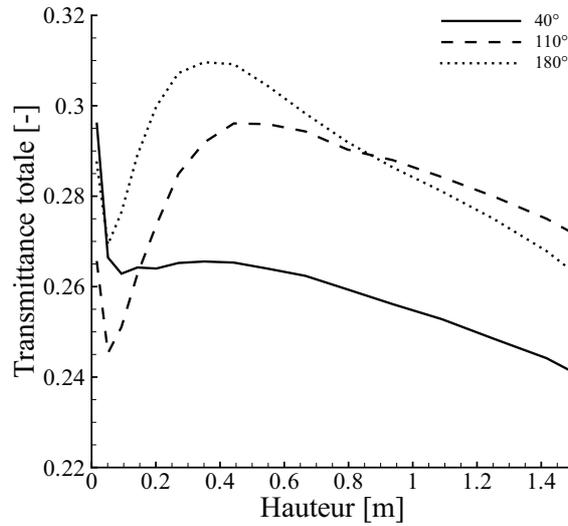


FIGURE 5.50 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau pour des pulvérisations ascendantes avec différents angles d'injection

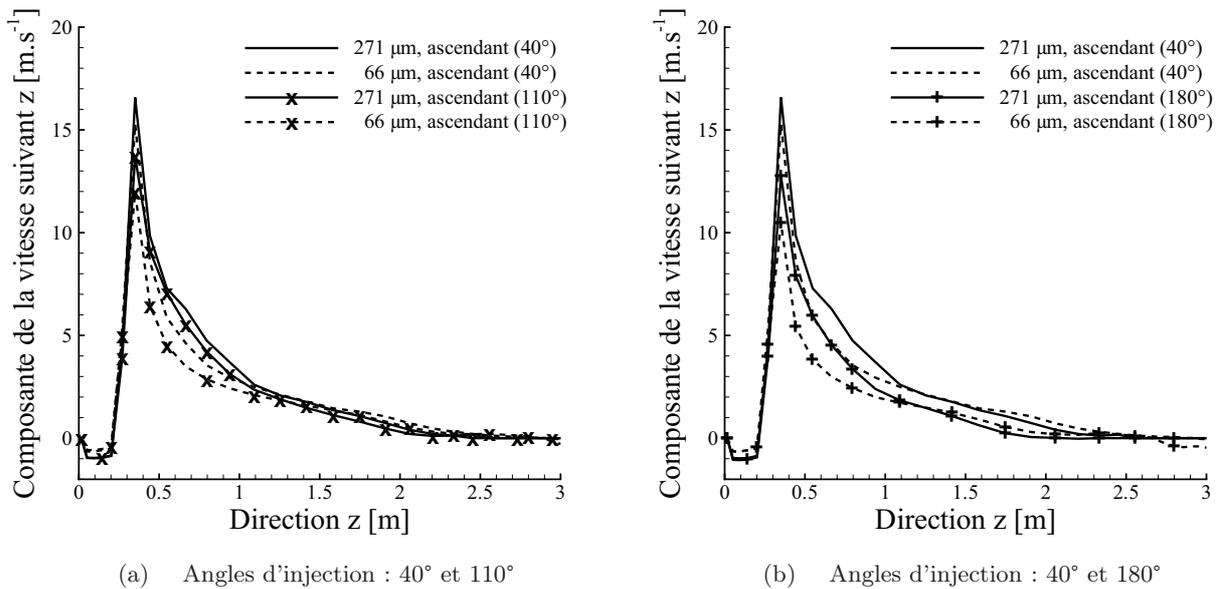


FIGURE 5.51 – Evolution des vitesses des gouttes en fonction de la hauteur dans le rideau pour des pulvérisations ascendantes avec différents angles d'injection

### Variation de l'espacement entre les buses d'injection

L'influence d'un espacement différent entre deux buses consécutives sur une rampe est évaluée en injection ascendante dans le cas du scénario de type panneau rayonnant. Trois configurations sont considérées dans cette section : un espacement de 10 cm entre tuyères, un espacement de

	Angle d'injection	40°	110°	180°
Diamètre				
66 $\mu\text{m}$		12,19	7,66	5,83
271 $\mu\text{m}$		2,68	2,44	1,88

TABLE 5.4 – Temps de séjour (s) des gouttes pour des pulvérisations ascendantes avec différents angles d'injection

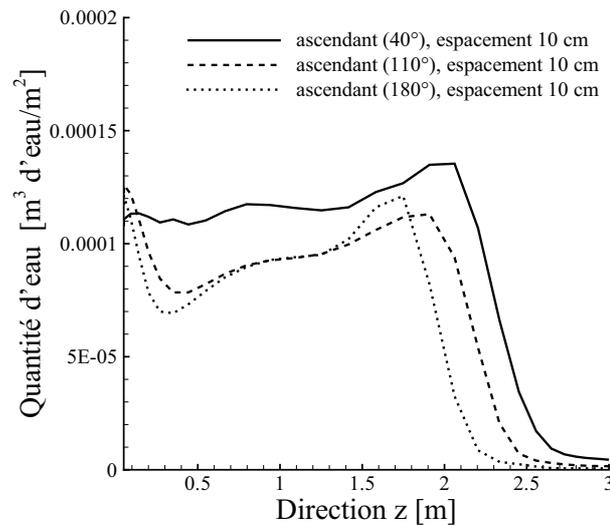


FIGURE 5.52 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur dans le rideau pour des pulvérisations ascendantes avec différents angles d'injection

20 cm et un espacement de 30 cm. Les transmittances totales, données sur la figure 5.53 en fonction de la hauteur, se distinguent par les niveaux atteints. En effet, la capacité d'atténuation du rideau est meilleure pour un espacement réduit entre les points d'injection. Les écarts observés entre les systèmes de rampes restent quasiment constants (pour une hauteur d'étude de 1,5 m), signe que l'allure générale des transmittances est voisine (peu de variations en fonction de la hauteur). Les explications sur cette évolution en fonction de la hauteur ont déjà été fournies dans la section 5.2.3. En ce qui concerne les écarts de niveaux, environ 13 % séparent les atténuations obtenues avec des rampes présentant un espacement de 10 cm et 20 cm entre buses alors que cette différence atteint environ 33 % en comparant avec un espacement de 30 cm. Rappelons que la quantité d'eau injectée par mètre linéaire de rampe est divisée par deux pour une configuration où les buses sont écartées de 20 cm (comparée à un écartement de 10 cm) et divisée par trois pour un écartement de 30 cm.

En règle générale, augmenter l'espacement entre les points d'injection va engendrer une dynamique légèrement plus lente des gouttelettes d'eau. Les figures 5.54 où les vitesses des gouttes sont données en fonction de la hauteur appuient ce phénomène. Comme nous l'avons déjà observé précédemment, les gouttes décélèrent rapidement dans les premiers centimètres. Rappelons aussi que l'analyse de cette vitesse est rendue complexe par le double passage des gouttes dans la zone

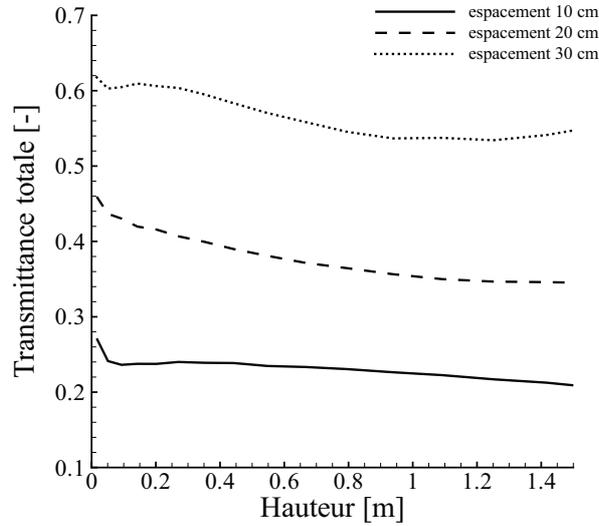


FIGURE 5.53 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau pour des rampes ascendantes avec différents espacements entre buses

de spray (phase ascendante et phase descendante). Cette dynamique plus lente va avoir plusieurs effets notamment sur la répartition de la quantité d'eau au sein du rideau et sur le temps de séjour.

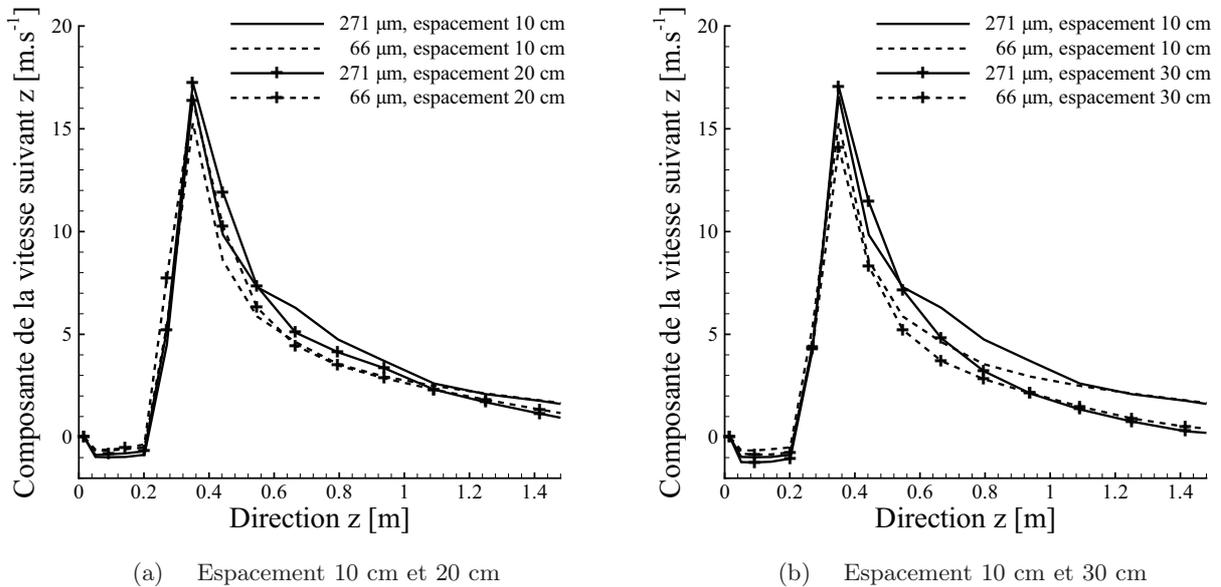
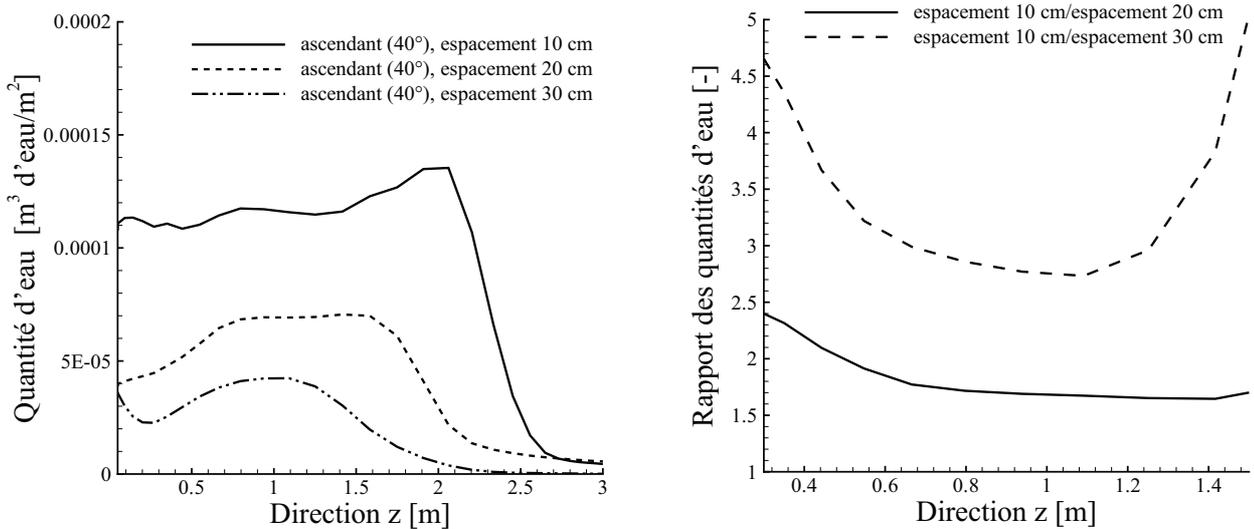


FIGURE 5.54 – Evolution des vitesses de gouttes en fonction de la hauteur dans le rideau pour des rampes ascendantes avec différents espacements entre tuyères

La répartition de la quantité d'eau au sein du rideau est visualisée sur la figure 5.55(a) en

fonction de la hauteur. Logiquement, la quantité d'eau est plus faible lorsque l'espacement entre les points d'injection augmente. Pour une meilleure visualisation des différences entre les cas, le rapport des quantités d'eau obtenues au sein du rideau est illustré sur la figure 5.55(b). Les rapports sont présentés à partir du point d'injection et sur une hauteur de 1,5 m qui correspond à la dimension de la surface de réception définie dans le scénario avec un panneau rayonnant. Les quantités d'eau ont été tracées jusqu'à 3 m de haut afin de pouvoir visualiser le fait qu'un espacement entre buses d'injection plus grand engendre une baisse de la taille du rideau. Au niveau des rapports de quantités d'eau, les évolutions sont différentes suivant les cas. Entre un espacement entre tuyères de 10 cm et 20 cm, la quantité d'eau à l'intérieur du spray n'est pas doublée malgré un volume d'eau injecté deux fois plus important (hormis dans la zone proche de l'injection où le rapport devient supérieur à deux). En revanche, dans le cas de rampes avec un écartement entre tuyères de 10 cm et un espacement de 30 cm, l'évolution en fonction de la hauteur est plus marquée. Remarquons tout de même que pour une petite zone située au coeur du spray (entre 0,7 m et 1,3 m de hauteur), un volume d'eau injecté trois fois plus important ne va pas correspondre à une quantité d'eau triplée au sein du rideau. Au-dessus de cette limite, la forte augmentation du rapport est essentiellement due à une hauteur de rideau plus faible pour un espacement entre buses de 30 cm. Ce phénomène est également visible sur la figure 5.55(a).



(a) Répartition de la quantité d'eau au sein du rideau

(b) Rapport des quantités d'eau obtenues pour des rampes avec différents écartements entre tuyères

FIGURE 5.55 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur dans le rideau pour des configurations avec des espacements entre tuyères différents

L'évolution du temps de séjour des gouttes dans le domaine est donnée dans le tableau 5.5 pour les divers cas étudiés. Ce temps de résidence va diminuer en augmentant l'écartement entre les tuyères. Les analyses précédentes concernant la vitesse et la quantité d'eau dans le spray fournissent les causes de cette variation. En effet, en augmentant l'espacement entre les buses d'injection d'une rampe, les gouttes sont alors injectées dans une dynamique plus lente engendrant une hauteur de rideau plus basse. La distance parcourue par les gouttes devient donc moins

importante, d'où des temps de séjour plus faibles.

Diamètre	Espacement		
	10 cm	20 cm	30 cm
66 $\mu\text{m}$	12,19	7,39	6,80
271 $\mu\text{m}$	2,68	2,61	1,64

TABLE 5.5 – Temps de séjour (s) des gouttes pour des rampes ascendantes avec différents espacements entre tuyères

### 5.2.4 Bilan sur les rampes ascendantes

Plusieurs configurations de rampes avec des injections ascendantes ont été analysées. L'idée est de trouver une alternative plus judicieuse en terme d'efficacité par rapport au spray descendant classique tout en conservant les mêmes caractéristiques d'injection (granulométrie, angles d'injection, pression d'alimentation). Toutefois, cette constance des paramètres d'injection, aisée d'un point de vue numérique, est plus compliquée au niveau expérimental. En effet, la comparaison entre résultats numériques et mesures expérimentales a montré une différence notable sur les niveaux d'atténuation obtenus. Cet écart est probablement imputable à une modification du fractionnement en gouttelettes d'eau dans un système ascendant alors que la tuyère utilisée est identique au cas descendant. Il a été conclu par ailleurs que cette modification de la granulométrie au sein du rideau est difficilement quantifiable précisément sans avoir recours à des mesures. Les influences d'une variation de l'angle d'injection ainsi que de l'espacement entre les tuyères de la rampe ont été évaluées. De la même manière qu'en pulvérisation descendante, les résultats obtenus au niveau des transferts radiatifs sont indissociables de la dynamique du spray. De plus, des effets non-linéaires existent et rendent difficilement quantifiable la capacité d'atténuation dans un cas réel. L'expérimentation à grande échelle est donc également indispensable en configuration ascendante. La capacité d'atténuation d'une rampe est triplée en pulvérisation ascendante en considérant les mesures expérimentales qui prennent en compte ces modifications de granulométrie au sein du rideau. Par ailleurs, à granulométrie identique (la modélisation numérique est effectuée dans le cas d'une distribution de tailles identique dans les configurations descendante et ascendante), un facteur supérieur à quatre existe en faveur du cas ascendant.

Les divers systèmes en rampes ont ensuite été étudiés dans le cas d'un scénario de source étendue du type panneau rayonnant. De la même manière qu'en pulvérisation descendante, la capacité d'atténuation du rideau varie fortement suivant la longueur d'onde engendrant alors un brouillard d'eau moins efficace dans certaines gammes spectrales (pour les courtes longueurs d'onde). Le rôle joué par l'absorption est à l'origine de ces évolutions.

Les atténuations du rayonnement en utilisant la stratégie de pulvérisation ascendante deviennent intéressantes (le maximum est de 80 % d'un point de vue numérique et 50 % expérimentalement), celles-ci étant obtenues avec de faibles débits d'injection comparés à ceux des buses industrielles.

## 5.3 Rampes impactantes

Une autre stratégie de pulvérisation consiste à orienter les buses d'injection vers la cible à protéger. Les sprays générés par cette rampe "impactante" vont créer un film liquide sur la paroi.

La capacité d'atténuation résultant de cette configuration est donc double : la propagation du rayonnement va d'abord être limitée par le rideau d'eau puis par le film liquide ruisselant sur la paroi.

### 5.3.1 Présentation du cas étudié

L'étude concernant la capacité d'atténuation d'un rideau formé par des rampes munies d'injections "impactantes" est uniquement numérique. Les schémas de principe de la configuration étudiée sont illustrés sur la figure 5.56. Etant de nouveau dans un système de rampes, les deux plans de symétries (plans XZ), déjà détaillés dans le paragraphe 5.1.1, sont retrouvés et permettent un gain au niveau des temps de calcul. En revanche, le plan de symétrie sur la dynamique du spray est abandonné, la simulation numérique n'étant plus symétrique par rapport à un plan YZ passant par le point d'injection. Les autres frontières sont considérées comme des parois. Les dimensions du domaine sont de 3 m x 0,05 m x 3 m avec un maillage comprenant 66 x 5 x 66 cellules (maillage uniforme, plus fin dans la zone de spray et près des parois). Le point d'injection, dirigé avec un angle de 45° (vers le haut) de telle sorte à impacter la paroi  $x = 3$  m, se situe aux coordonnées (2 m ; 0,05 m ; 1 m). La position a été déterminée afin que le rideau, avec les conditions définies auparavant, puisse atteindre la paroi à une hauteur d'environ 1,5 m (la comparaison avec les autres stratégies de pulvérisation, notamment le cas descendant dont l'injection est situé à 1,5 m d'altitude, est donc envisageable). Les conditions d'injection utilisées sont celles mesurées sur la tuyère TP400067 avec une pression d'alimentation de 4 bars (tableau 4.3). Initialement, le domaine de calcul est à une température de 291 K (la paroi impactée est par conséquent à température ambiante) et une humidité relative de 60 %. D'un point de vue radiatif, le cas du scénario avec des sources étendues du type panneau rayonnant est de nouveau adopté (les détails sont donnés dans le paragraphe 5.1.3).

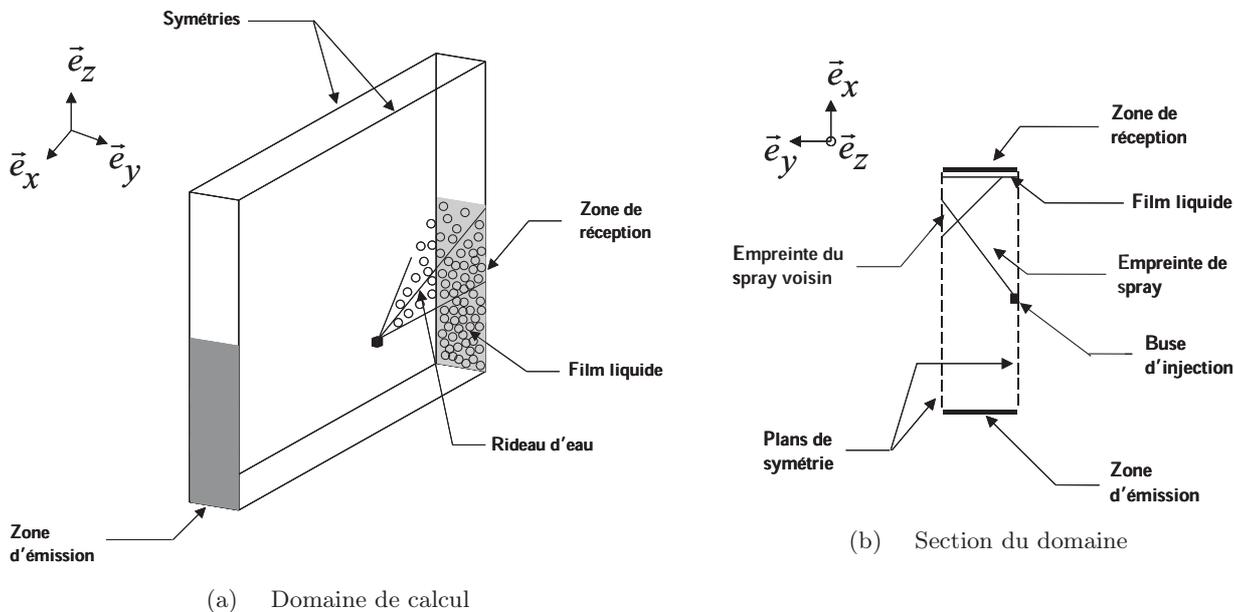


FIGURE 5.56 – Schéma de principe dans une configuration en rampe impactante

### 5.3.2 Etude préalable sur l'impact de gouttes

Avant toute analyse approfondie sur la dynamique d'une rampe dite impactante et sa capacité d'atténuation du rayonnement, une étude préalable est nécessaire pour déterminer les régimes d'impact des gouttes sur la paroi se produisant dans le cas considéré. Evidemment, selon la situation : dépôt, "splashing" ou rebond (les différents régimes sont détaillés dans la section A.1 de l'annexe A), la dynamique du spray au niveau de la paroi impactante est différente. Plusieurs paramètres, présentés dans le paragraphe A.2 de l'annexe A, influencent l'apparition de tel ou tel régime lors du contact d'une goutte avec une paroi (propriétés du spray, propriétés du liquide utilisé, propriétés de la paroi). Les propriétés du liquide utilisé (plus particulièrement tension de surface et viscosité dynamique), l'eau dans nos cas d'étude, sont fixées à une température donnée (les gouttes sont considérées à une température de 291 K). La paroi d'impact, initialement à une température de 291 K, est considérée comme lisse (la rugosité de la paroi est négligée). Il reste alors à déterminer les propriétés du spray au moment de l'impact, à savoir le diamètre des gouttes, leur vitesse et l'angle d'impact. La granulométrie injectée est identique au cas étudié précédemment (les caractéristiques de la distribution sont fournies dans le tableau 4.3). La distribution en taille de gouttes englobe des particules avec un diamètre compris entre  $20\ \mu\text{m}$  et  $300\ \mu\text{m}$ . En ce qui concerne les vitesses (la norme de la vitesse est utilisée), leurs évolutions sont représentées sur la figure 5.57 dans un plan vertical proche de la paroi d'impact (plan YZ) pour deux tailles de gouttes ( $66\ \mu\text{m}$  et  $271\ \mu\text{m}$ ). Cette vitesse en proche paroi est plus élevée en partie basse du domaine (du sol à 1,5 m de hauteur) et pour des gouttes de plus gros diamètres. La valeur maximale atteinte dans la configuration étudiée est de l'ordre de  $3\ \text{m.s}^{-1}$ . L'angle selon lequel les gouttes vont venir impacter la paroi est également une donnée importante pour déterminer le régime d'impact. La représentation des trajectoires de gouttes (figure 5.64 présentée plus loin dans l'étude de la dynamique du spray impactant), donne une indication sur la valeur de cet angle. En effet, la direction d'incidence des gouttes est majoritairement voisine de la normale à la surface d'impact (donc avec un angle d'impact nul).

La connaissance du régime d'impact est fournie grâce à des expériences d'impact de gouttes. Le dispositif expérimental utilisé (installé au laboratoire LEMTA) a permis, grâce à la collaboration de F. Lelong [Lelong, 2010], de caractériser des impacts de gouttes sur paroi froide à l'aide d'une caméra rapide (la banc est détaillé dans la section C.2 de l'annexe C). Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 5.58, 5.59 et 5.60. Dans un premier temps, les mesures se sont concentrées sur les conditions de spray énoncées précédemment (gamme de diamètres des gouttes entre  $20\ \mu\text{m}$  et  $300\ \mu\text{m}$ , vitesse des gouttes de quelques  $\text{m.s}^{-1}$ , direction d'incidence suivant la normale à la paroi avant l'impact). Les figures 5.58(a) et 5.58(b) illustrent ainsi l'impact de gouttes avec des diamètres respectifs de  $100\ \mu\text{m}$  et  $150\ \mu\text{m}$  et des vitesses respectives de  $8\ \text{m.s}^{-1}$  et  $5\ \text{m.s}^{-1}$ . Ces tailles de gouttes sont proches du diamètre moyen de la distribution granulométrique simulée. Dans les deux cas, les conclusions sont équivalentes (pour l'ensemble des résultats expérimentaux au sujet de l'impact de gouttes, seule une visualisation de chaque cas a été présentée mais il a par ailleurs été vérifié que les régimes d'impact obtenus ne variaient pas au cours du temps) : aucune présence de rebond ou de "splashing" (amenant à la formation de gouttes secondaires) n'est observée. Seul le régime de dépôt du liquide sur la paroi est présent lorsque les gouttes parviennent à la surface d'impact.

Pour appuyer les observations effectuées sur les premières mesures d'impact, d'autres expériences sont réalisées en variant la vitesse d'incidence, l'angle d'incidence et la taille des gouttes. La figure 5.59 présente des impacts de gouttes dont le diamètre est de  $250\ \mu\text{m}$  et la vitesse

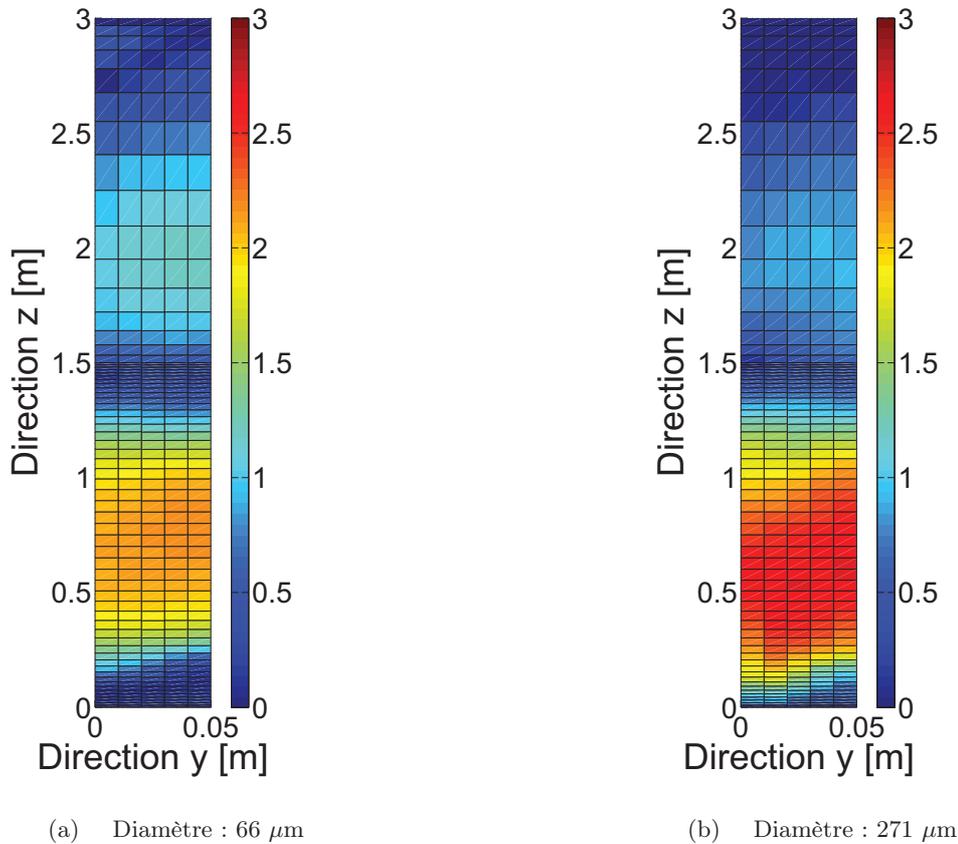
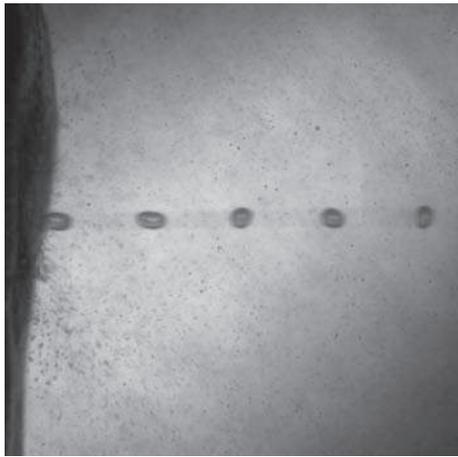


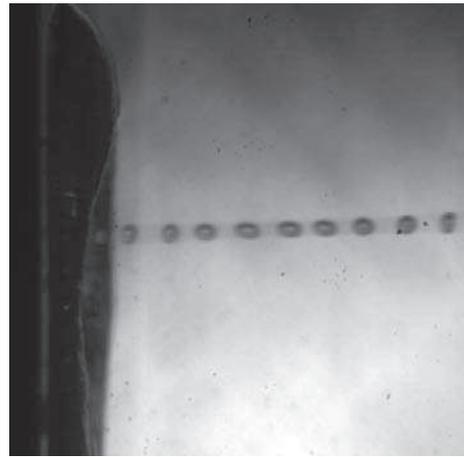
FIGURE 5.57 – Evolution de la vitesse des gouttes (norme en  $\text{m.s}^{-1}$ ) dans un plan vertical situé à 1 cm de la paroi d'impact

avant impact d'environ  $19 \text{ m.s}^{-1}$ . Deux types d'impact se différenciant par l'angle d'incidence des gouttes sont étudiés : un impact ascendant avec un angle de  $30^\circ$  par rapport à la normale à la paroi et un impact dirigé suivant cette même normale. Le diamètre étudié avoisine la taille de gouttes maximale dans la polydispersion simulée tandis que la vitesse des particules est très largement supérieure à celle obtenue en proche paroi (figure 5.57). Malgré la forte augmentation de la vitesse et du diamètre, les conclusions sont identiques au cas précédent : les gouttes se déposent sur la paroi pour former un film liquide. Nous pouvons tout de même remarquer un léger "splashing" sur les deux visualisations lorsque la goutte atteint le film liquide (présent sur la paroi). Par ailleurs, ce phénomène n'engendre aucune formation de véritables gouttes secondaires pouvant jouer un rôle dans la capacité d'atténuation du rideau (en effet, le "splash" engendré s'intègre directement au film liquide). Par conséquent, cette particularité n'est pas significative et participe à la formation d'un film liquide sur la paroi.

Deux dernières configurations ont été testées et concernent des impacts "descendants" (figure 5.60). La vitesse des gouttes incidentes et leurs diamètres ( $250 \mu\text{m}$  et  $18 \text{ m.s}^{-1}$ ) sont quasiment identiques au cas précédent (figure 5.59). Deux angles d'incidence sont testés :  $30^\circ$  et  $60^\circ$  par rapport à la normale à la surface (figure 5.60(a) et 5.60(b)). Le régime de dépôt des gouttes

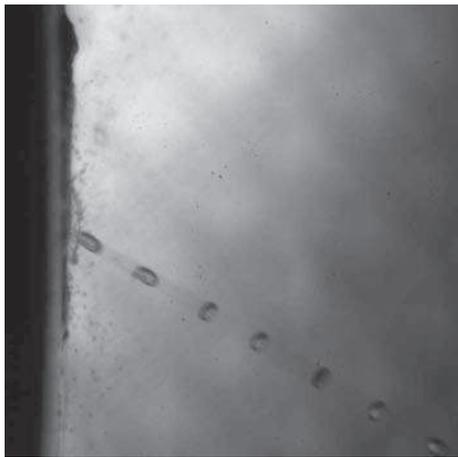


(a) Diamètre :  $100\ \mu\text{m}$ , vitesse :  $8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

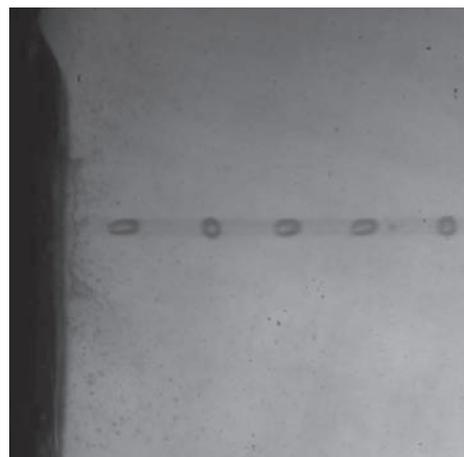


(b) Diamètre :  $150\ \mu\text{m}$ , vitesse :  $5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

FIGURE 5.58 – Impact d'un train de gouttes sur paroi froide suivant la normale à la surface. Les gouttes successives impactent la paroi sans rebond apparent.



(a) Impact ascendant avec un angle de  $30^\circ$  par rapport à la normale à la surface

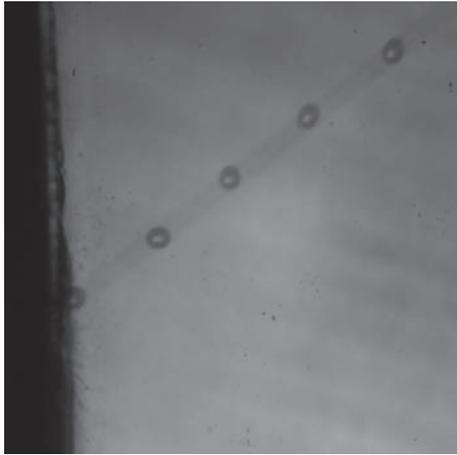


(b) Impact suivant une direction normale à la surface

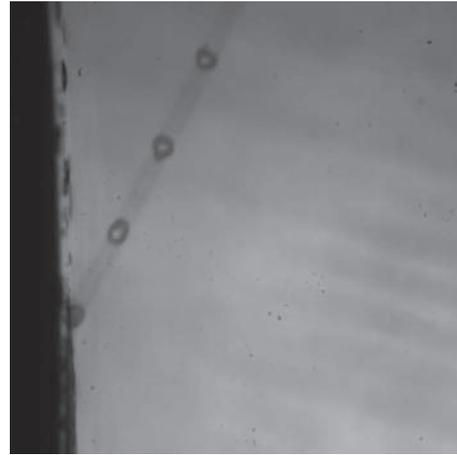
FIGURE 5.59 – Impact d'un train de gouttes (diamètre :  $250\ \mu\text{m}$ , vitesse :  $19\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) sur paroi froide avec deux angles différents

sur la paroi d'impact est de nouveau observé.

Au vu des conditions d'injection utilisées au cours de ces travaux (granulométrie, vitesse des gouttes, diamètre des gouttes), l'étude expérimentale vient de montrer que seul le régime de dépôt des gouttelettes d'eau sur la paroi se produit. Ce phénomène crée ainsi un film liquide participant à l'atténuation du rayonnement. N'ayant aucune présence de rebond ou "splashing", la modélisation de ces phénomènes n'est par conséquent pas envisagée. L'étude numérique va alors consister en une simulation séparée du rideau impactant et du film liquide. Le spray va alors être injecté vers la paroi (cible à protéger), le suivi des gouttes étant abandonné au contact



(a) Angle de  $30^\circ$  par rapport à la normale à la surface



(b) Angle de  $60^\circ$  par rapport à la normale à la surface

FIGURE 5.60 – Impact descendant d'un train de gouttes (diamètre :  $250 \mu\text{m}$ , vitesse :  $18 \text{ m.s}^{-1}$ ) sur paroi froide avec deux angles différents

de celles-ci avec la surface d'impact. La capacité d'atténuation de ce type de rideau (sans présence de film liquide) est ensuite évaluée par méthode de Monte-Carlo en utilisant un panneau rayonnant (l'étude numérique est présentée dans le paragraphe 5.3.3). Cette démarche correspond à une simulation complète "classique" (vue jusqu'à présent) d'un système de protection par brouillard d'eau. Quant au film liquide, son épaisseur est considérée constante et sa capacité d'atténuation est évaluée par une loi de Beer-Lambert (paragraphe 5.3.3). La transmission du rayonnement à travers le système complet (rideau + film) est donnée par le produit des deux contributions. Par ailleurs, n'ayant aucune information sur l'épaisseur du film liquide obtenu dans les configurations étudiées, plusieurs épaisseurs seront par conséquent testées (le dispositif expérimental mis en place ne prévoit encore pas une mesure de ce film liquide).

#### Complément sur l'impact de gouttes :

La littérature expose différentes corrélations empiriques fournissant des limites entre les différents régimes d'impact obtenus sur paroi sèche ou mouillée (ces corrélations ainsi que les nombres adimensionnés qui s'y rapportent sont présentés dans les paragraphes A.3 et A.4 de l'annexe A). Dans le but de renforcer les observations expérimentales précédentes, les relations données dans les travaux de Cossali [Cossali *et al.*, 1997] sont utilisées. Ces corrélations présentent l'avantage de fixer une limite entre dépôt et "splashing" sur paroi sèche et en présence de film liquide (de plus, elles ne dépendent pas de la rugosité de la paroi d'impact). Les relations sont par conséquent facilement exploitables. Deux cas sont considérés : l'impact sur paroi sèche et l'impact sur paroi humide.

Sur paroi sèche, la limite entre dépôt et "splashing" est fixée pour un nombre  $K'$  (équation 6 de l'annexe A) équivalent à 657 dans le cas d'une paroi d'impact considérée comme lisse. En-dessous de cette limite, le régime de dépôt est prédominant tandis qu'au-dessus, le "splashing" est majoritaire. En prenant en compte le diamètre maximal de la polydispersion simulée, à savoir  $300 \mu\text{m}$  (rappelons que d'après les travaux de Rioboo [Rioboo *et al.*, 2001], plus le dia-

mètre est gros, plus la probabilité d'obtenir du "splashing" est importante, d'où les raisons de ce choix concernant le diamètre; paragraphe A.2 de l'annexe A) et la vitesse maximale observée en proche paroi ( $3 \text{ m.s}^{-1}$ ), le paramètre  $K'$  vaut alors 273 (le nombre de Weber vaut 37 et le nombre d'Ohnesorge vaut  $6,75.10^{-3}$ ). Les propriétés de l'eau nécessaire au calcul sont fournies dans le tableau 5.6. Le résultat obtenu est bien inférieur à la limite entre dépôt et "splashing". Par conséquent, sur paroi sèche, le régime d'impact est le dépôt de la goutte sur la paroi.

Masse volumique $\rho_p$	$998,3 \text{ kg.m}^{-3}$
Viscosité dynamique $\mu_p$	$0,001 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
Tension de surface $\sigma_s$	$0,073 \text{ N.m}^{-1}$

TABLE 5.6 – Propriétés de l'eau à 20°C

La limite entre les deux régimes d'impact considérés diffère lorsqu'un film liquide est présent sur la paroi. Dans ce cas précis, une corrélation a également été établie dans les travaux de Cossali [Cossali *et al.*, 1997] (équation 7 de l'annexe A). Elle est basée sur une épaisseur de film adimensionnée  $\delta$ . Comme expliqué précédemment, l'épaisseur de film liquide dans les différents cas étudiés est imposée et considérée comme constante. Quatre épaisseurs seront alors utilisées par la suite (paragraphe 5.3.3) :  $10 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$  et  $1 \text{ mm}$  (au vu des fractions volumiques injectées, nous supposons qu'une épaisseur de film liquide au-delà de  $1 \text{ mm}$  n'est pas réaliste). Le diamètre de la goutte considérée est toujours de  $300 \mu\text{m}$  et sa vitesse de  $3 \text{ m.s}^{-1}$ , le paramètre  $K'$  s'élevant donc toujours à 273. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.7. Comme attendu, le paramètre  $K'$  est toujours inférieur à la limite calculée, ce qui confirme de nouveau l'intégration de la goutte au film liquide présent sur la paroi.

Epaisseur de film [ $\mu\text{m}$ ]	10	50	100	1000
Epaisseur de film adimensionnée $\delta$	0,033	0,17	0,33	3,33
$K'_{\text{limite}}$	2143	2558	3291	35432
Régime d'impact	dépôt <sup>1</sup>	dépôt	dépôt	dépôt <sup>1</sup>

TABLE 5.7 – Régimes d'impact sur film liquide (avec plusieurs épaisseurs de film différentes) d'une goutte de  $300 \mu\text{m}$  de diamètre avec une vitesse d'incidence de  $3 \text{ m.s}^{-1}$

Les corrélations établies empiriquement viennent illustrer de nouveau la présence d'un régime d'impact essentiellement constitué du dépôt des gouttes sur la paroi (suivant nos conditions d'injection et les caractéristiques des gouttes à l'impact). A présent, la capacité d'atténuation de cette stratégie de pulvérisation "impactante" est évaluée en l'absence ou non de film liquide sur la paroi ou cible à protéger.

1. Ces corrélations ont été établies pour une gamme d'épaisseurs adimensionnées allant de 0,1 à 1. Lorsque  $\delta$  est bien inférieure à cette gamme, la limite entre dépôt et "splashing" dépend fortement de la rugosité à la paroi. Dans notre cas d'étude, nous considérons une paroi lisse. Par conséquent, lorsque l'épaisseur de film liquide est très fine, nous pouvons alors considérer la limite obtenue sur paroi sèche. Lorsque l'épaisseur de film adimensionnée est supérieure à 1,5, le régime d'impact ne dépend que du film liquide

### 5.3.3 Analyse des résultats

#### Etude du spray impactant sans film liquide sur la paroi

Le rideau d'eau utilisé en rampe dans une stratégie de pulvérisation impactante est étudié dans un premier temps en l'absence de film liquide sur la paroi ciblée. Les caractéristiques du système sont présentées dans le paragraphe 5.3.1. La transmittance totale est d'abord visualisée dans un plan vertical (plan YZ) sur la figure 5.61. Cette représentation permet dès lors de montrer que la capacité d'atténuation du rideau est invariante suivant la direction y. Par ailleurs, pour une meilleure visualisation (et pour comparer avec les autres stratégies de pulvérisation, section 5.4), la transmittance totale est tracée en fonction de la hauteur (suivant une ligne verticale pour  $y = 0,05$  m) sur la figure 5.62. La capacité d'atténuation du rideau est maximale dans le haut du domaine (aux alentours de 1,4 m de hauteur) et décroît rapidement jusqu'à un mètre de hauteur environ. Puis, la transmittance connaît une phase quasi-constante avec une valeur avoisinant les 80 % (donc 20 % d'atténuation). Enfin, nous pouvons noter une légère augmentation de la capacité d'atténuation du rideau en se rapprochant du sol. Remarquons que cette dernière est quasiment divisée par un facteur 4 entre le maximum et le minimum d'efficacité du spray. Cette évolution de la transmittance en fonction de la hauteur se démarque de celle des deux autres stratégies de pulvérisation (descendante sur la figure 5.30 et ascendante sur la figure 5.49) avec des variations plus prononcées.

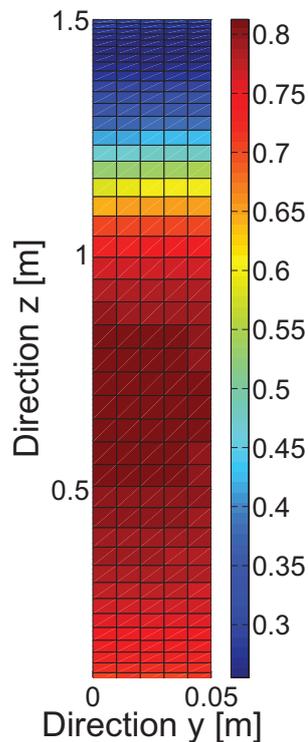


FIGURE 5.61 – Evolution dans un plan vertical de la transmittance totale dans le cas d'une rampe impactante

En revanche, les courbes de transmittances spectrales, illustrées sur la figure 5.63, présentent

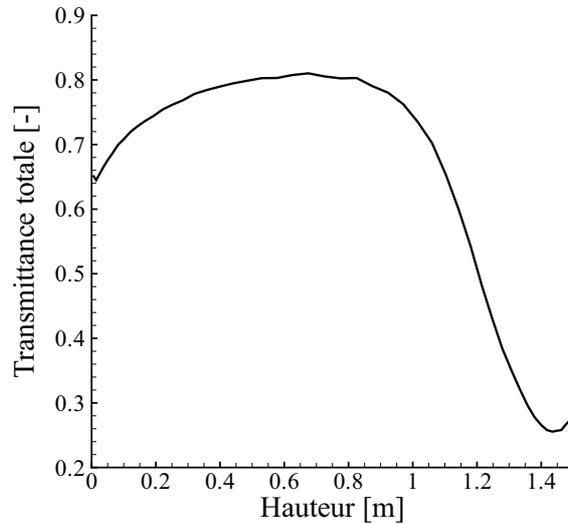


FIGURE 5.62 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau dans le cas d'une rampe impactante

des variations en fonction du nombre d'onde similaires aux cas descendant et ascendant. De manière logique, cette grandeur suit toujours les évolutions des propriétés radiatives d'une pulvérisation (coefficient d'absorption, coefficient de diffusion et fonction de phase présentés dans la section 4.2.2). Les explications concernant ces forts écarts en fonction du nombre d'onde ont déjà été commentées à plusieurs reprises dans les paragraphes 5.1.3 et 5.2.3. Les niveaux d'atténuation moyens atteints pour les trois hauteurs différentes sont conformes aux valeurs obtenues sur la figure 5.62.

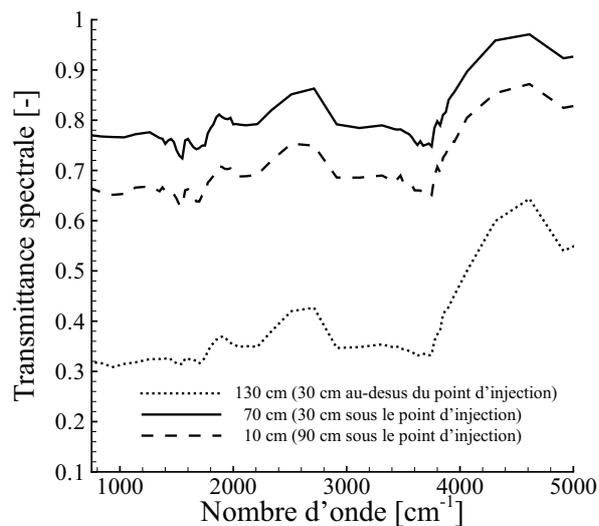


FIGURE 5.63 – Evolution de la transmittance spectrale à différentes hauteurs

Le fort lien entre dynamique du spray et transferts radiatifs à travers celui-ci va de nouveau être mis en évidence. L'avantage de la configuration impactante réside dans la particularité d'injecter les gouttelettes d'eau directement sur la cible à protéger. Cette caractéristique propre au spray "impactant" est visible sur la figure 5.64 où le rideau est reconstruit grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes (une opération de recopiage du domaine a été effectuée afin de pouvoir visualiser plusieurs points d'injection). La répartition des gouttes au sein du spray est particulière. En effet, les grosses gouttes (de diamètre  $271 \mu\text{m}$ ), du fait d'une inertie plus forte, vont subir une décélération moins rapide sous les effets de la force de traînée et de la gravité par rapport aux petites gouttes (d'un diamètre de  $66 \mu\text{m}$ ). La combinaison de l'ensemble des forces amène par conséquent les grosses gouttes dans la partie supérieure du spray et les gouttes de plus petits diamètres dans la partie inférieure (cette particularité est également visible sur la figure 5.66(a) représentant l'évolution du diamètre de Sauter). Les grosses gouttes vont ainsi impacter la cible à protéger à une hauteur plus élevée que les petites gouttes. Ces particules plus légères vont alors être très influencées par l'écoulement d'air environnant (figure 5.65). Le spray orienté avec un angle à  $45^\circ$  va logiquement créer un écoulement d'air dirigé suivant la direction d'injection. Au contact avec la paroi, cet air va évidemment s'échapper de part et d'autre de la zone d'impact entraînant avec lui une majorité de gouttelettes d'eau de petites tailles comme le montre la figure 5.64. Précisons que les grosses gouttes s'échappant de la zone de spray (lignes bleues sur la figure 5.64) atteignent les parois latérales qui correspondent à des symétries du domaine (leur suivi n'est pas stoppé en plein milieu du domaine comme nous pourrions le croire). Il a été choisi d'arrêter le suivi au contact avec ces symétries (ou de la paroi supérieure situé à 3 m) afin de ne pas trop encombrer la représentation (dans la modélisation numérique, lorsqu'une particule atteint une symétrie, celle-ci est en fait renvoyée dans le domaine de calcul de manière élastique symbolisant ainsi une gouttelette d'eau provenant de l'injection voisine dans la rampe). Au vu des trajectoires de gouttes, il est légitime de se demander si un impact avec la paroi se réalise vraiment où si les gouttes se contentent seulement de suivre l'écoulement d'air environnant. Pour répondre à cette interrogation, les gouttes impactant la paroi ont été recensées. Au total, environ 84 % des gouttes injectées atteignent la surface d'impact (le calcul a été réalisé sur un échantillon de 600000 gouttes réparties de manière équitable sur les 20 classes de la polydispersion). Pour les gouttes de petites tailles, seulement 35 % viennent impacter la cible alors que ce pourcentage s'élève à 98 % pour les plus grosses gouttes.

La visualisation du diamètre de Sauter dans un plan vertical (plan XZ) passant par un point d'injection (figure 5.66(a)) appuie les conclusions établies lors de l'étude des trajectoires. En effet, dans la zone de spray, les grosses gouttes se retrouvent effectivement dans la partie supérieure du rideau alors que les gouttes de plus petits diamètres sont situées en partie inférieure. Par ailleurs, les effets d'entraînement des particules par l'écoulement d'air environnant sont de nouveau visibles sur cette représentation du spray en terme de diamètre. Toutefois, ce phénomène de sortie des gouttes de la zone de spray, bien que réel, concerne une fraction volumique en eau limitée (comparée à celle dans la zone de spray) comme nous pouvons l'observer sur la figure 5.66(b) où cette grandeur est représentée dans un plan vertical (plan XZ) passant par une buse d'injection. Le spray, injecté à une hauteur de 1 m avec un angle d'injection de  $45^\circ$ , va venir impacter la paroi à environ 1,5 m de hauteur. Cet impact direct du spray sur la cible à protéger entraîne une zone en proche paroi où la fraction volumique est élevée (zone comprise entre 1,3 m et 1,7 m de hauteur environ). De part et d'autre de cette zone (au-dessus et en-dessous), les effets d'entraînement des gouttes par l'écoulement d'air sont à nouveau visibles.

Le fait d'injecter directement les gouttelettes d'eau sur la paroi va engendrer une quantité

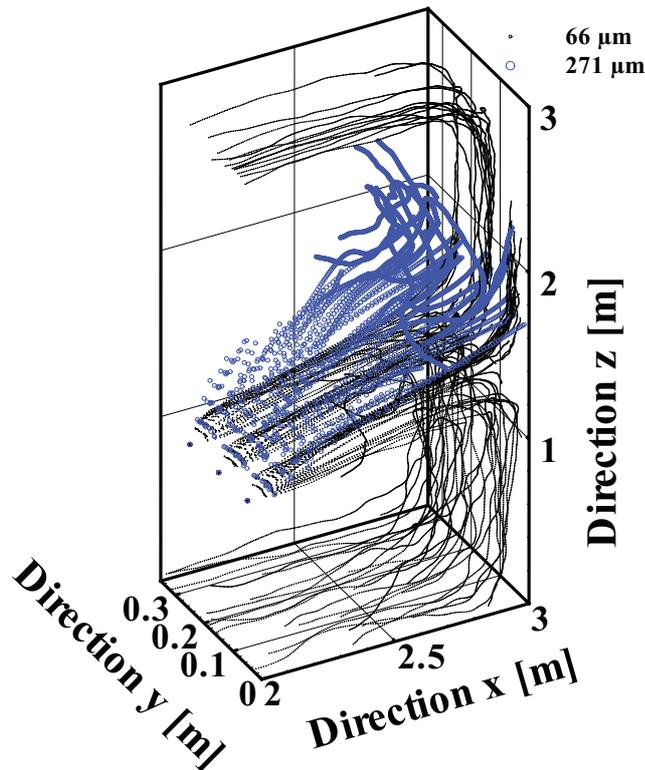


FIGURE 5.64 – Reconstruction du rideau grâce aux trajectoires de deux classes de gouttes

d'eau à proximité de la cible à protéger non négligeable (outre le fait de créer un film liquide sur la paroi d'impact, l'influence de ce film étant analysée plus loin). La répartition de cette quantité d'eau est visualisée sur la figure 5.67 en fonction de la hauteur dans le rideau (la grandeur considérée est la quantité d'eau moyenne par mètre linéaire de rampe dans une section rapportée à la hauteur des cellules). Cette évaluation vient également appuyer les observations déjà effectuées sur les caractéristiques dynamiques du rideau (figure 5.66). En effet, le volume d'eau connaît un maximum très marqué à 1,4 m de hauteur. Par ailleurs, rappelons que ce maximum coïncide avec la capacité d'atténuation maximale obtenue pour cette configuration (figure 5.62). En-dessous de ce pic, le volume d'eau chute rapidement (d'un facteur supérieur à 5) et reste quasiment constant. Toutefois, une légère augmentation est à observer dans une zone proche de la paroi inférieure. Là encore, les évolutions de la transmittance en fonction de la hauteur concordent. Au-delà du pic, la diminution de la quantité d'eau présente dans le rideau est toujours marquée mais d'une manière moins prononcée que dans le bas du domaine. Cet écart s'explique par l'observation du diamètre de Sauter (figure 5.66(a)). En effet, l'écoulement d'air va entraîner au-delà de la zone d'impact (dans le haut du domaine) une majorité de grosses gouttes (ce qui contraste avec le bas du domaine où nous avons essentiellement des petites gouttes). La quantité d'eau au-delà du pic présent à 1,5 m de hauteur est ainsi légèrement supérieure à celle obtenue en-dessous. Par ailleurs, le volume d'eau présent dans le haut du domaine n'est pas négligeable, signe que le rideau pourrait rester efficace dans cette zone.

L'étude du temps de séjour des gouttes dans le domaine va appuyer les conclusions déjà établies. Pour une particule de  $66 \mu\text{m}$ , le temps de résidence s'élève en moyenne à 4,93 s alors que

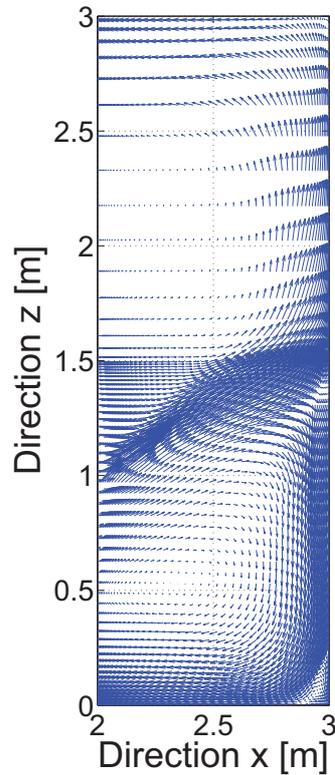


FIGURE 5.65 – Evolution de l'écoulement d'air dans un plan vertical passant par un point d'injection

celui-ci vaut 2,03 s pour une goutte d'un diamètre de 271  $\mu\text{m}$ . En comparaison avec les autres stratégies (un comparatif des temps de séjour des différentes configurations est présenté plus loin dans le tableau 5.8), le temps de résidence des gouttes de la configuration "impactante" se situe en moyenne entre ceux obtenus pour les deux autres systèmes de protection (descendant et ascendant).

L'analyse en terme d'efficacité d'un rideau "impactant" sans présence de film liquide sur la paroi fournit une indication de la capacité d'atténuation minimale obtenue avec ce genre de système. En effet, l'ajout d'un film liquide limitant lui aussi la propagation du rayonnement va tendre de manière logique à diminuer la transmission. L'influence de ce film est évaluée dans la section suivante.

### Intégration du film liquide sur la paroi

Le point fort d'une stratégie "impactante" est la création d'un film liquide sur la cible à protéger. Ce film liquide, engendré par le dépôt des gouttes au contact avec la paroi, va lui aussi interagir avec le rayonnement infrarouge issu d'une forte source de chaleur au même titre que le spray injecté. Cette section va permettre d'estimer l'influence de ce paramètre sur la capacité d'atténuation de la configuration impactante. Dans cette étude, on considère un film liquide homogène sur toute la paroi d'impact avec une épaisseur fixée (quatre épaisseurs sont étudiées :

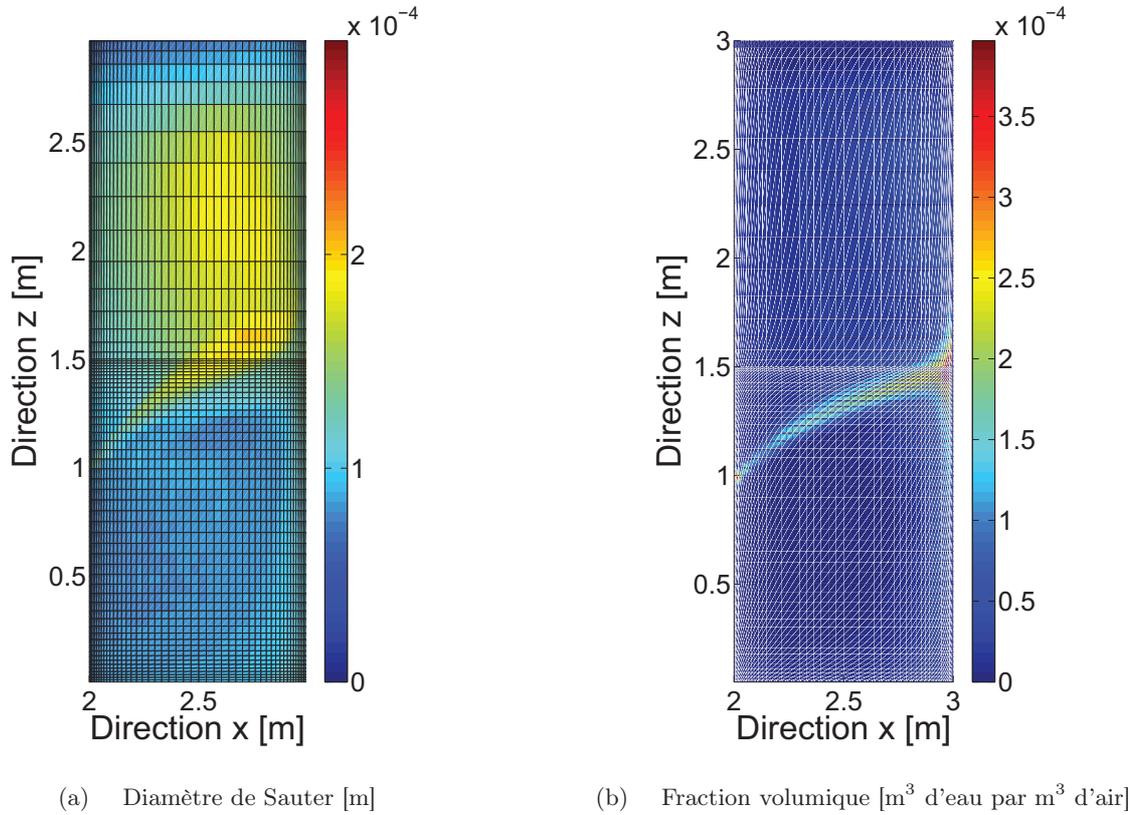


FIGURE 5.66 – Evolution des caractéristiques dynamiques du spray (diamètre et fraction volumique) dans un plan vertical passant par le point d'injection

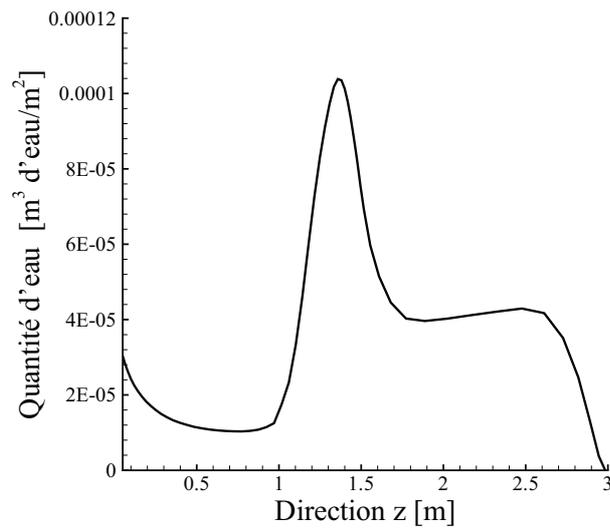


FIGURE 5.67 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur dans le rideau

10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  et 1 mm). Par ailleurs, la réflectivité du film liquide n'est pas prise en compte dans la capacité d'atténuation du film (sa contribution est négligeable, l'écart relatif entre la transmittance obtenue en prenant en compte uniquement l'absorption et celle calculée avec l'absorption et la réflexion est de 4 % maximum). La loi de Beer-Lambert est utilisée pour déterminer la transmittance spectrale du film liquide :

$$Tr_{\nu_{\text{film}}} = \exp(-4\pi k_{\nu} \nu e) \quad (5.1)$$

où  $e$  correspond à l'épaisseur du film liquide considéré et  $k_{\nu}$  à l'indice d'absorption du milieu.

La transmittance spectrale du film liquide seul (l'efficacité du spray n'est pas prise en compte) est représentée sur la figure 5.68 en fonction du nombre d'onde pour différentes épaisseurs de film (10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  et 1 mm). Les évolutions des courbes de transmittances obtenues sont similaires et la capacité d'atténuation augmente lorsque le film devient plus épais. Cette atténuation devient même proche de 100 % (la transmission du rayonnement est nulle) pour une épaisseur de film de 1 mm (excepté aux alentours de 4500  $\text{cm}^{-1}$  où la transmission est environ de 0,2). Au-delà de cette épaisseur (et dans l'optique que ces grandeurs soient réalistes), la paroi est parfaitement protégée face au rayonnement issu d'une forte source de chaleur. En revanche, pour des films liquides plus fins, de fortes variations sont à constater en fonction de la gamme de nombres d'onde considérée. La zone comprise entre 3000  $\text{cm}^{-1}$  et 3600  $\text{cm}^{-1}$  est tout à fait remarquable car quelle que soit l'épaisseur de film liquide, le milieu est totalement opaque au rayonnement infrarouge. En revanche, au-delà de cette limite, le film liquide devient beaucoup moins efficace et il faut une épaisseur conséquente pour avoir une atténuation significative (à une épaisseur de 1 mm, cette perte d'efficacité devient relativement faible). Cette forte augmentation de la transmittance est due à la diminution de l'indice d'absorption de l'eau. Rappelons que dans cette gamme de nombres d'onde, une baisse de l'efficacité du rideau se produit également (figure 5.63). Par ailleurs, en-dessous de 3000  $\text{cm}^{-1}$ , la transmission baisse lorsque le nombre d'onde diminue (signalons tout de même qu'aux alentours de 1600  $\text{cm}^{-1}$ , la capacité d'atténuation du film est proche de 100 % quelle que soit son épaisseur).

Le système de protection basé sur une configuration impactante est à présent étudié dans sa globalité (spray + film liquide) pour les quatre épaisseurs de film considérées auparavant (10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  et 1 mm). La transmittance spectrale de cette stratégie de pulvérisation est fournie par le produit des transmittances obtenues grâce au spray injecté et au film liquide présent sur la paroi d'impact :

$$Tr_{\nu} = Tr_{\nu_{\text{film}}} \times Tr_{\nu_{\text{spray}}} \quad (5.2)$$

La transmittance spectrale des systèmes "impactants" complets (se différenciant chacun par l'épaisseur de film) est visualisée en fonction du nombre d'onde sur la figure 5.69 pour deux hauteurs différentes (à 10 cm du sol sur la figure 5.69(a) et à 130 cm du sol sur la figure 5.69(b)). Les variations de la transmittance spectrale étant plus prononcées dans le cas du film liquide (figure 5.62) que pour une rampe seule (sans film), il est par conséquent logique de retrouver des évolutions de transmissions similaires à celles rencontrées précédemment. La gamme de nombres d'onde (entre 3000  $\text{cm}^{-1}$  et 3600  $\text{cm}^{-1}$ ) où le système est totalement opaque au rayonnement infrarouge est de nouveau retrouvée. Nous pouvons également constater que la capacité d'atténuation d'un système impactant est majoritairement due à la présence du film liquide sur la paroi, hormis dans les petites longueurs d'onde ou dans le cas de films très fins. Comme attendu, les niveaux d'atténuation augmentent lorsque le film liquide est plus épais. D'ailleurs, pour une

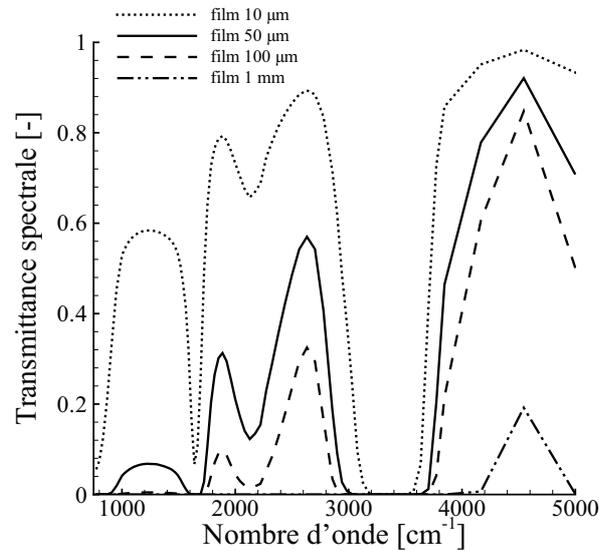


FIGURE 5.68 – Evolution de la transmittance spectrale pour différentes épaisseurs de film liquide

épaisseur de 1 mm, l'efficacité de la stratégie de pulvérisation impactante face au rayonnement est quasi-totale. Dans la gamme de nombres d'onde (au-delà de  $4000 \text{ cm}^{-1}$ ) où le film liquide et les sprays sont beaucoup moins efficaces d'un point de vue radiatif, cela apparaît évidemment sur la capacité d'atténuation du système complet. Par ailleurs, la stratégie de pulvérisation impactante possède une meilleure efficacité à une hauteur de 1,30 m au-dessus du sol (en comparant aux résultats obtenus pour une hauteur de 10 cm), différence qui avait déjà été observée lors de l'étude du rideau en l'absence du film liquide sur la paroi (figure 5.63).

Pour estimer l'efficacité d'un tel système de protection sur l'ensemble de la surface à protéger, la transmittance totale est tracée en fonction de la hauteur dans le domaine sur la figure 5.70. Le film liquide étant homogène (son épaisseur est supposée constante le long de la paroi à protéger), il est logique de retrouver des variations de transmittances similaires à celles obtenues dans le cas du rideau d'eau (en l'absence du film liquide, figure 5.62). Les explications concernant ces évolutions ont déjà été fournies dans le paragraphe 5.3.3 et sont directement imputables à la dynamique caractéristique d'une pulvérisation impactante. La caractéristique du spray ayant évolué avec l'ajout du film liquide est la quantité d'eau présente au sein du domaine. Elle est d'ailleurs représentée en fonction de la hauteur sur la figure 5.71 pour les divers systèmes "impactants" étudiés. Comme attendu, le film liquide a pour effet d'augmenter la quantité d'eau (rappelons que l'épaisseur du film est constante sur toute la hauteur), les variations en fonction de la hauteur étant la conséquence des sprays injectés. Par ailleurs, la prise en compte du film liquide sur la paroi a pour effet de diminuer sensiblement les niveaux de transmittances atteints (figure 5.70). En outre, comme cela a déjà été observé auparavant, plus le film liquide est épais, plus le système de protection est efficace face au rayonnement infrarouge (le cas avec un film de 1 mm n'a pas été représenté, l'atténuation du rayonnement étant de 100 %). Pour les trois cas considérés, l'atténuation du rayonnement atteint environ 60 % avec une épaisseur de film de  $10 \mu\text{m}$ , 88 % pour une épaisseur de  $50 \mu\text{m}$  et jusqu'à 96 % quand l'épaisseur est de  $100 \mu\text{m}$ , créant ainsi un système de protection véritablement efficace. Toutefois, il serait évidemment intéressant d'avoir des données expérimentales (avec les mêmes buses d'injection utilisées lors de ces travaux)

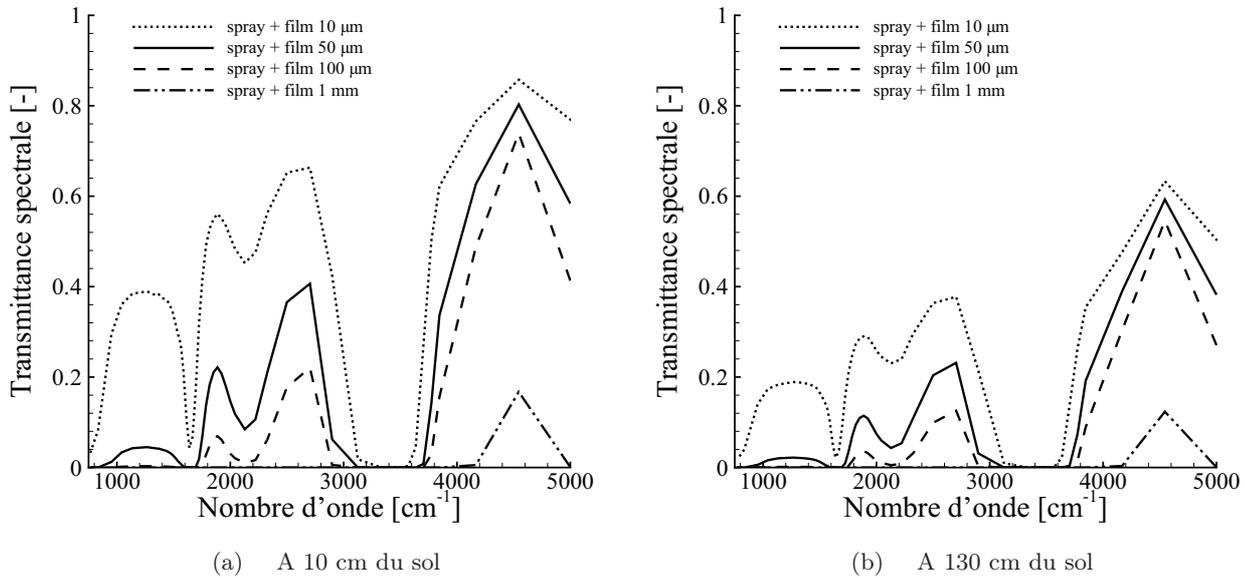


FIGURE 5.69 – Evolution de la transmittance spectrale d'une rampe "impactante" (spray + film liquide) à différentes hauteurs

sur l'épaisseur du film liquide ruisselant sur la paroi (le dispositif expérimental mis en place ne permet pas actuellement la mesure de cette grandeur).

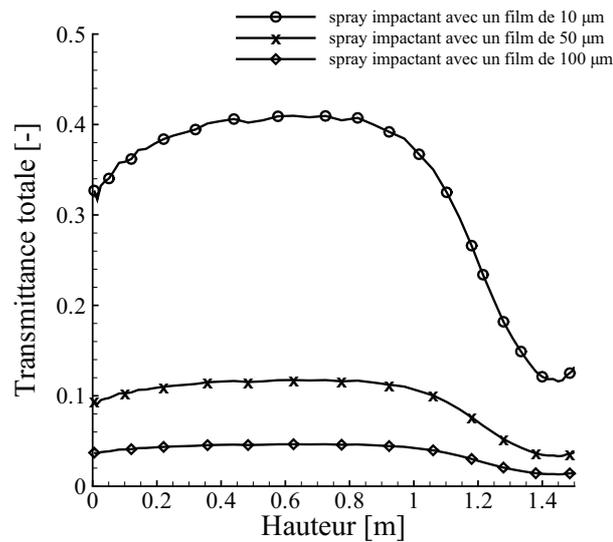


FIGURE 5.70 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur pour des rampes impactantes avec différentes épaisseurs de film liquide

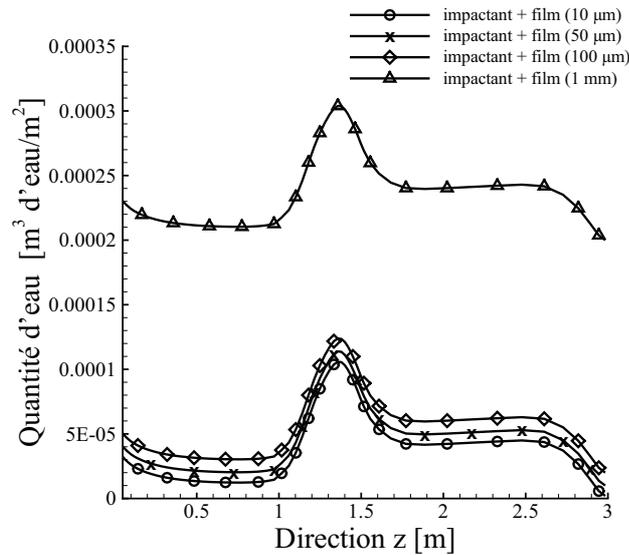


FIGURE 5.71 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur pour des rampes "impactantes" avec différentes épaisseurs de film liquide

### 5.3.4 Bilan sur les rampes impactantes

Deux points forts caractérisent cette stratégie de pulvérisation impactante : l'injection directe des gouttelettes d'eau sur la cible à protéger provoquant ainsi une quantité d'eau importante en proche paroi et la création d'un film liquide participant à l'efficacité du système complet. Les niveaux d'atténuation obtenus sont intéressants et deviennent très importants (voire une atténuation du rayonnement proche de 100 % dans certains cas) lorsque l'épaisseur du film liquide augmente. Toutefois, il aurait été évidemment intéressant de connaître un ordre de grandeur de ce film liquide (engendré par les mêmes buses expérimentales qui ont été utilisées pour les cas descendant et ascendant).

Par ailleurs, les résultats obtenus sur la transmission ont été évalués en considérant un film liquide homogène sur toute la paroi à protéger. Il a également été supposé que l'évaporation n'influencerait pas l'épaisseur de ce film. Dans des cas expérimentaux, il est tout à fait possible que le film ne couvre pas totalement la surface à protéger ou que son épaisseur change en fonction de la position sur la paroi. Par conséquent, l'étude réalisée sur la stratégie impactante sans présence du film liquide permet d'avoir un aperçu de la capacité d'atténuation du spray dans le cas où des zones sur la paroi se retrouveraient non protégées. Par ailleurs, différentes épaisseurs ont été analysées et donnent des indications sur la capacité d'atténuation du système de protection lorsque le film liquide devient inhomogène.

## 5.4 Comparaison des trois modes de pulvérisation

Cette section concernant la comparaison directe des trois stratégies de pulvérisation (descendante, ascendante et impactante) fait office de conclusion générale sur les études de systèmes en rampes uniques. La même configuration est utilisée pour les trois cas considérés, à savoir une rampe munie de pulvérisations espacées de 10 cm ayant les caractéristiques d'une tuyère TP400067 (tableau 4.3) ; seule la direction d'injection des gouttelettes d'eau varie. D'un point

de vue radiatif, les divers systèmes de protection sont étudiés dans le cas d'un scénario de source étendue du type panneau rayonnant (le descriptif de ce scénario est fourni dans le paragraphe 5.1.3). L'ensemble des systèmes considérés comprend : une configuration descendante, une configuration ascendante, une configuration impactante sans film liquide sur la paroi et des configurations impactantes avec la présence d'un film liquide de différentes épaisseurs (10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ). Le cas d'une stratégie impactante avec un film d'épaisseur 1 mm n'a pas été rapporté dans cette étude; signalons juste que le système créé est totalement opaque au rayonnement infrarouge issu d'une forte source de chaleur. Il est important de rappeler que le débit et la distribution granulométrique sont imposés identiques dans l'ensemble des stratégies de pulvérisation.

La transmission totale est visualisée sur la figure 5.72 en fonction de la hauteur pour l'ensemble des systèmes de protection étudiés. Bien que la quantité d'eau injectée soit identique pour toutes les stratégies, les écarts d'efficacité entre les différents rideaux apparaissent importants. Les principaux paramètres dictant cette efficacité sont le diamètre des gouttes et la répartition de la quantité d'eau au sein du rideau. La solution employant des injections descendantes "classiques" s'avère ainsi peu efficace face au rayonnement infrarouge (atténuation en moyenne de 20 %) appuyant le fait que la quantité d'eau au sein du rideau n'est pas utilisée de manière optimale (figure 5.73). Par ailleurs, projetées directement au sol, les gouttes ont un faible temps de séjour (tableau 5.8) réduisant ainsi considérablement les interactions gouttes - rayonnement. La configuration descendante montre donc ces limites face à de nouvelles stratégies de pulvérisation.

Le dispositif de protection du type "impactant" présente plusieurs cas d'étude suivant la prise en compte ou non du film liquide sur la paroi et son épaisseur. Ces différentes configurations permettent ainsi de rendre compte des niveaux d'atténuations obtenus dans le cas où le film liquide présent sur la cible à protéger n'est pas totalement couvrant (voire des zones de la cible non protégées). Les systèmes "impactants" sont des configurations présentant des évolutions de la transmittance marquées (en comparant aux autres stratégies). Toutefois, la transmittance maximale obtenue pour un système sans prise en compte du film liquide n'excède pas celle évaluée dans le cas descendant (les deux transmittances sont équivalentes pour une zone comprise entre 0,4 m et 0,8 m de hauteur). Par contre, dans le haut du domaine, le gain en efficacité est considérable et se rapproche de la configuration ascendante. Cette forte augmentation est imputable à la présence d'une quantité d'eau importante dans cette zone (figure 5.73) qui correspond à la surface d'impact directe du spray sur la paroi. Comme déjà vu précédemment, le film liquide va permettre d'améliorer la capacité d'atténuation du système de protection. L'efficacité face au rayonnement atteint même 90 % en moyenne pour un rideau avec un film d'une épaisseur de 50  $\mu\text{m}$  par exemple. Le film va par conséquent participer à limiter la propagation du rayonnement.

La dernière configuration étudiée est la stratégie de pulvérisation ascendante. D'un point de vue dynamique, le cas ascendant présente l'avantage d'un double passage des gouttes dans la zone de spray (conséquence de l'injection des gouttes vers le haut). Cette caractéristique propre au spray ascendant permet une meilleure utilisation de la quantité d'eau injectée au sein du rideau, en attestent les courbes de la figure 5.73. Le temps de séjour des gouttes s'en trouve alors grandement augmenté en comparaison des autres stratégies (tableau 5.8). Par exemple, un facteur supérieur à 10 existe entre les temps de séjour des cas descendant et ascendant. L'ensemble de ces phénomènes dynamiques expliquent une capacité d'atténuation du rideau intéressante d'environ 78 %. Toutefois, rappelons que ce critère ne doit pas être déconnecté de la notion de stabilité du brouillard d'eau (perspectives d'études).

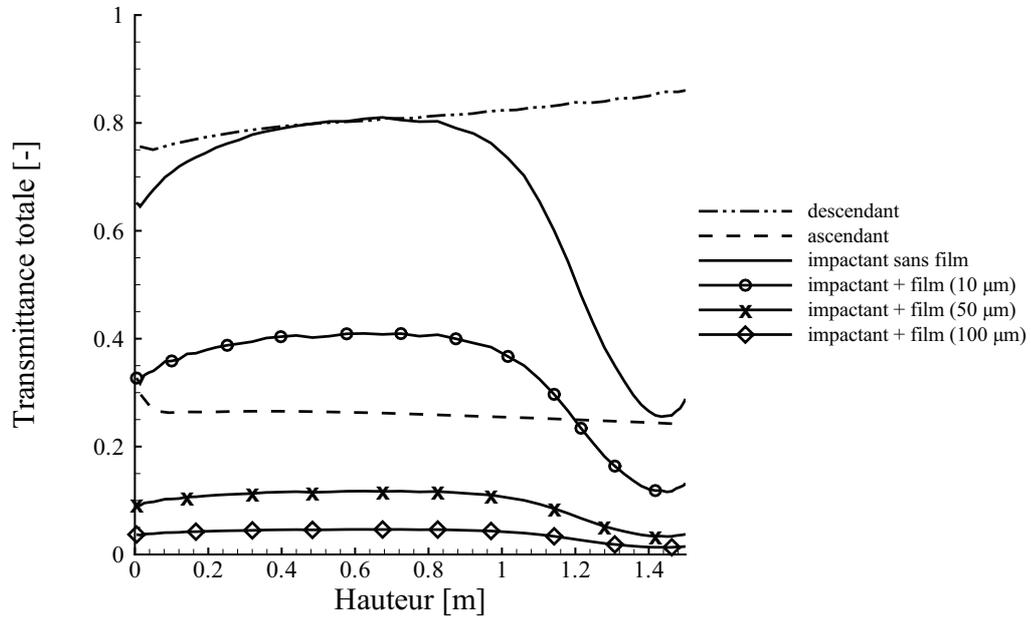


FIGURE 5.72 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur pour différentes stratégies de pulvérisation

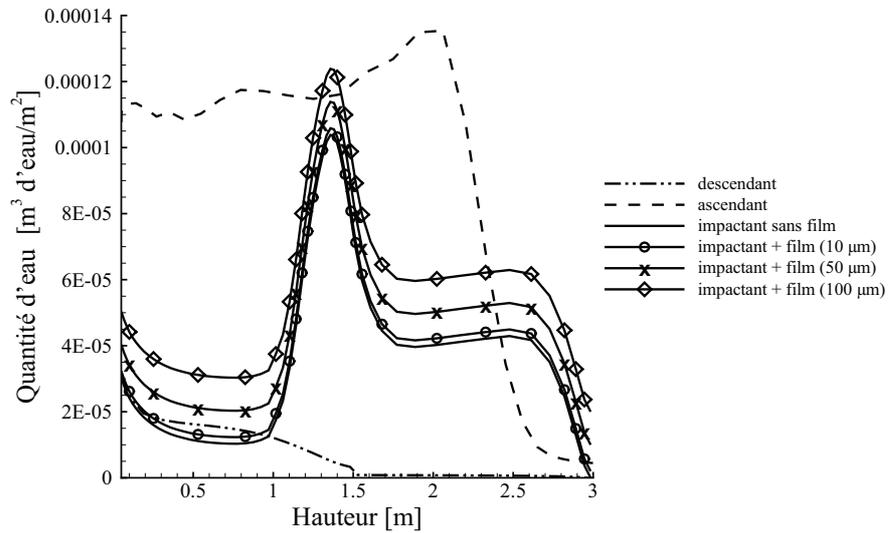


FIGURE 5.73 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur pour différentes stratégies de pulvérisation

Les figures 5.74 et 5.75 présentent la comparaison des différentes stratégies grâce aux transmittances spectrales pour deux hauteurs différentes (à 10 cm du sol et à 130 cm du sol). Deux

Diamètre	Stratégie		
	Descendant	Ascendant	Impactant
66 $\mu\text{m}$	0,88	12,19	4,93
271 $\mu\text{m}$	0,26	2,68	2,03

TABLE 5.8 – Temps de séjour (s) des gouttes pour différentes stratégies de pulvérisation

évolutions caractéristiques sont à constater : la première concerne les cas des rideaux d'eau, c'est-à-dire les configurations descendante, ascendante et impactante sans prise en compte du film liquide. Pour ces trois cas, les variations de la transmittance sont similaires et sont les conséquences directes des évolutions des propriétés radiatives d'une pulvérisation (coefficient d'absorption, coefficient de diffusion et fonction de phase présentés dans le paragraphe 4.2.2). La prise en compte du film liquide sur la paroi dans le cas de la stratégie impactante entraîne un changement important sur les variations spectrales de la transmittance. Ces modifications sont imputables aux variations de l'indice d'absorption de l'eau (en effet, une loi de Beer-Lambert est utilisée pour évaluer la capacité d'atténuation du rideau). En ce qui concerne les niveaux moyens d'atténuations obtenus, ils sont en accord avec ceux rencontrés sur la figure 5.62. Par ailleurs, l'évolution de la capacité d'atténuation en fonction de la hauteur est également retrouvée (une transmittance quasiment constante à 10 cm et 130 cm pour les cas descendant et ascendant alors qu'une augmentation de l'atténuation est à constater dans le cas des stratégies impactantes).

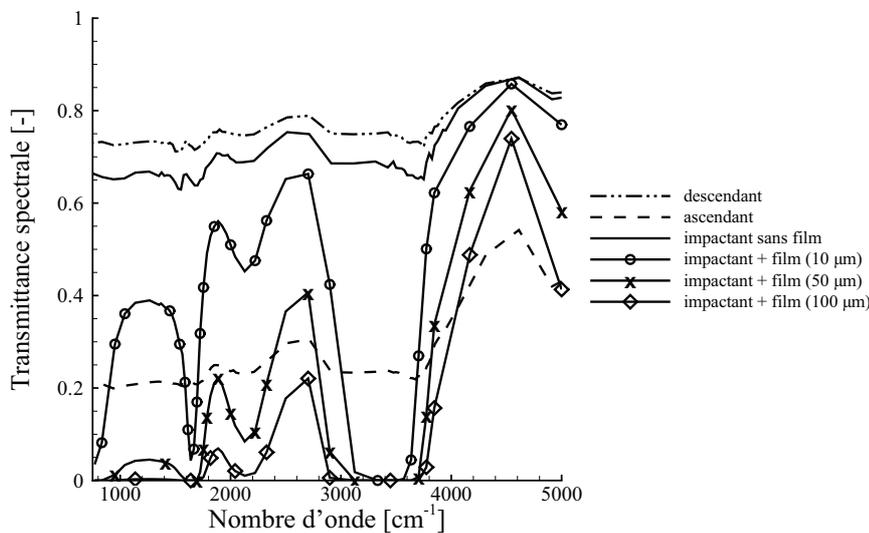


FIGURE 5.74 – Evolution de la transmittance spectrale à une hauteur de 10 cm pour différentes stratégies de pulvérisation

La tableau 5.9 présente un récapitulatif des avantages et des inconvénients de chaque système de protection. Les caractéristiques dynamiques et radiatives sont évoquées dans cette liste. La notion de stabilité est fournie à titre indicatif et mérite une étude approfondie en soumettant les différents rideaux à un vent latéral afin de confirmer les suppositions avancées. Une étude expérimentale sur le film liquide serait également intéressante et donnerait ainsi un ordre de grandeur

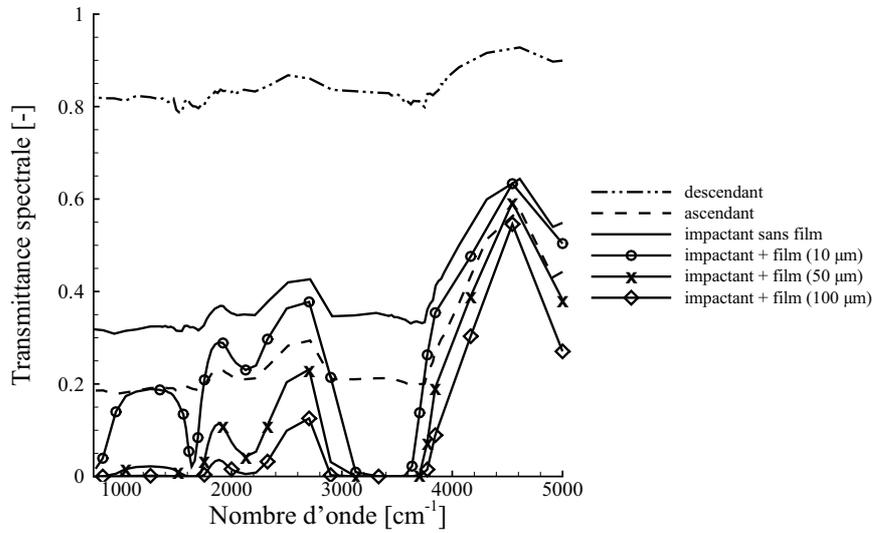


FIGURE 5.75 – Evolution de la transmittance spectrale à une hauteur de 130 cm pour différentes stratégies de pulvérisation

de son épaisseur. La notion d'homogénéité de ce film et son évaporation partielle pourraient également être évaluées.

Stratégie	Avantage	Inconvénient
Descendant	Stabilité Efficacité homogène	Faible quantité d'eau Temps de séjour des gouttes faible Faible capacité d'atténuation
Ascendant	Forte quantité d'eau Efficacité homogène Temps de séjour des gouttes très élevé Forte capacité d'atténuation	Possible instabilité du spray
Impactant	Injection du spray sur la cible à protéger Forte quantité d'eau sur la zone d'impact Film liquide sur la paroi Temps de séjour des gouttes élevé	Efficacité inhomogène Possibilité d'un film inhomogène

TABLE 5.9 – Avantages et inconvénients des différentes stratégies de pulvérisation



## Chapitre 6

# Association de rampes et mesures dans le visible

Ce chapitre est consacré à deux études complémentaires : une configuration associant deux rampes en parallèle et une étude spécifique d'atténuation du rayonnement dans le visible pour compléter l'analyse faite jusqu'ici dans l'infrarouge. L'avantage de la stratégie de "double-rampe" comparée à une rampe unique réside dans l'obtention d'une zone d'interaction gouttelettes-rayonnement plus vaste voire d'une quantité d'eau en suspension supérieure. En effet, multiplier le nombre de rampes va permettre d'augmenter la taille du rideau. Toutefois, ajouter une deuxième rampe (identique à la première) engendre inévitablement un doublement du débit d'eau injectée. Il faut par conséquent garder cette idée à l'esprit et veiller à conserver une consommation d'eau acceptable. Une deuxième approche consiste à maintenir un volume d'eau injecté identique à celui utilisé avec une rampe unique et à le répartir sur les deux rampes d'alimentation (en augmentant par exemple l'espacement entre les buses d'injection). Le but est alors, grâce à des comparaisons sur les transmittances obtenues pour les différentes configurations, de déterminer les stratégies de pulvérisation les plus efficaces face au rayonnement infrarouge. Signalons que l'ensemble des cas présentés concerne des pulvérisations en injection descendante.

Dans un premier temps, les efficacités de systèmes en double rampe sont analysées d'un point de vue expérimental en situation de transmission directe. Différents écartements entre les rampes sont comparés. Le but est alors, grâce à ces investigations, de dégager des pistes d'optimisation des rideaux d'eau en terme de capacité d'atténuation. Il faut tout de même signaler que d'un point de vue pratique, un système de protection utilisant deux rampes nécessite évidemment des installations plus complexes (rampe, tuyères d'injection, conduites supplémentaires).

La deuxième partie, essentiellement numérique, est consacrée à l'utilisation d'une configuration en double rampe dans un scénario radiatif de source étendue du type panneau rayonnant.

### 6.1 Etude de configurations en double rampe

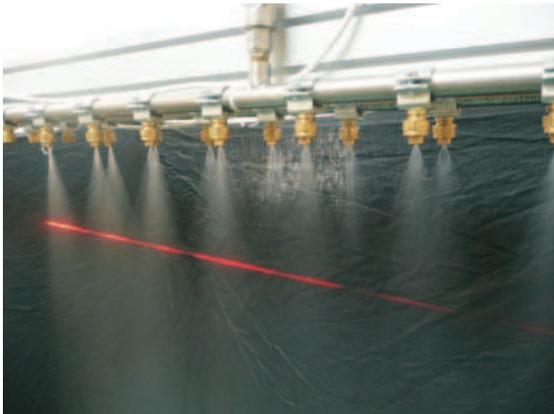
#### 6.1.1 Présentation du cas en double rampe

D'un point de vue expérimental, le dispositif utilisé est identique à celui présenté dans le chapitre 3 (la source de rayonnement utilisée dans le cadre de cette étude est le corps noir étendu). La photo de la figure 6.1(a) illustre un système de pulvérisation en double rampe. L'utilisation d'un laser He-Ne au moment de la photo permet de mettre en évidence le phénomène de diffusion par les gouttes. Le dispositif expérimental mis en place permet d'étudier plusieurs types de

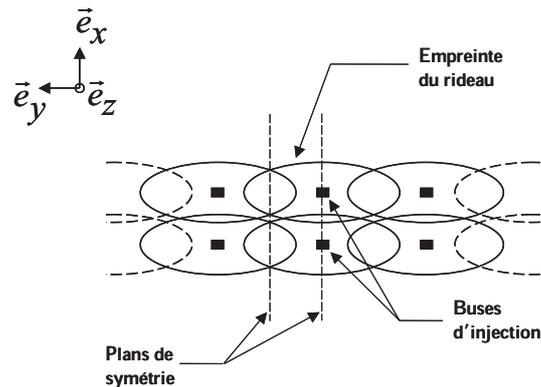
configurations se différenciant par l'écartement entre les rampes ainsi que l'espacement entre les buses d'injection.

Une section du domaine de calcul est visualisée sur la figure 6.1(b). La simulation d'une double rampe présente des plans de symétrie identiques à ceux utilisés dans la configuration en rampe unique étudiée dans le paragraphe 5.1.1 (le calcul sur la dynamique du spray et sur les transferts radiatifs s'effectue évidemment entre les plans de symétrie). Bien que la taille du domaine soit également similaire (3 m x 0,05 m x 3 m), le nombre de cellules du maillage a été augmenté (72 x 5 x 40 mailles) afin de couvrir de manière assez fine l'ensemble de la zone de spray (gardons à l'esprit qu'un système de double rampe va augmenter la largeur du rideau, figure 6.1(b)). La pression d'alimentation utilisée est toujours de 4 bars et le point d'injection se situe aux coordonnées (1,5 m ; 0,05 m ; 1,5 m). Les conditions initiales du domaine de calcul restent équivalentes aux autres cas d'étude (température de 291 K et humidité relative de 60 %). Remarquons également que les deux rampes sont placées de manière à ce que les points d'injection soient alignés.

D'un point de vue radiatif, dans le cas du scénario de source étendue du type panneau rayonnant (étude présentée dans la section 6.1.3), les conditions d'émission et de réception du rayonnement sont analogues aux précédentes études réalisées dans ce cadre (paragraphe 5.1.3, 5.2.3 et 5.3).



(a) Exemple typique de double rampe. Mise en évidence du phénomène de diffusion (dans le visible ici) à l'aide d'un laser He-Ne



(b) Schéma de principe d'une configuration en double rampe (section du domaine)

FIGURE 6.1 – Représentation d'un système muni d'une double rampe

## 6.1.2 Situation de transmission directe

### Comparaison entre simple et double rampe

Dans un premier temps, une comparaison va être effectuée entre des systèmes de simple et double rampe, le but étant de connaître l'influence apportée par l'ajout de cette deuxième rampe (l'écartement entre les deux rampes est de 10 cm). Dans les deux cas, la rampe utilisée est similaire, l'espacement entre les buses d'injection étant de 10 cm. Par conséquent, la quantité d'eau injectée est deux fois plus importante dans la stratégie de pulvérisation à deux rampes (une autre comparaison à débit équivalent est réalisée plus loin dans le paragraphe 6.1.2). La

figure 6.2 présente les transmittances totales expérimentales obtenues dans les deux cas d'étude. Logiquement, la capacité d'atténuation est meilleure pour le système de double rampe. Toutefois, l'évolution des deux courbes de transmittances est quelque peu différente (elle est plus marquée dans le cas d'une double rampe). En effet, bien que l'avantage de la double rampe est clairement mis en évidence à partir de 40 cm sous la buse d'injection (jusqu'au sol), dans la partie haute du rideau, la différence entre les configurations est minimale (pour la mesure effectuée à 20 cm du point d'injection). Hormis cette particularité, le rideau d'eau formé par deux rampes possède une meilleure capacité d'atténuation par rapport au système de rampe unique (on obtient une atténuation maximale de 25 % pour une double rampe alors qu'elle n'est que de 15 % avec une seule rampe).

Sur la figure 6.3 sont visualisées les transmittances spectrales expérimentales en fonction du nombre d'onde pour différentes hauteurs dans le rideau. Les niveaux moyens d'atténuation observés sur la figure 6.2 sont retrouvés. Les variations des courbes sont caractéristiques d'une transmission directe (variation quasi-monotone due aux gouttes, pics dus à la vapeur d'eau et au dioxyde de carbone).

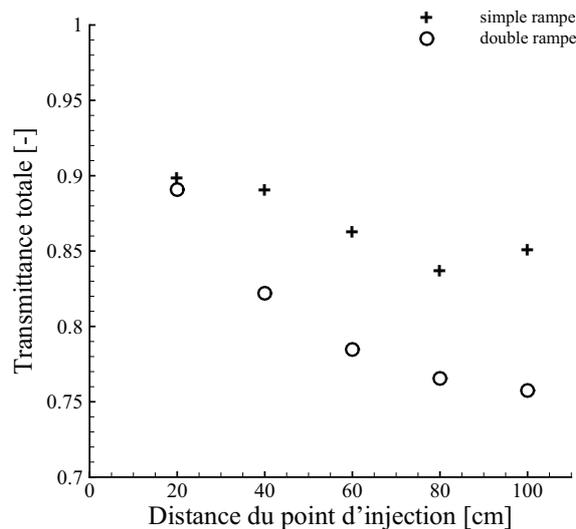


FIGURE 6.2 – Comparaison des transmittances totales expérimentales entre des systèmes munis d'une seule rampe et de deux rampes

Là encore, l'évolution des transmittances s'explique par l'étude de la dynamique des gouttes montrant de nouveau le fort lien existant entre les deux. Les principaux paramètres dynamiques influençant la capacité d'atténuation sont la quantité d'eau et la granulométrie. Ajouter une rampe similaire à la première engendre évidemment une quantité d'eau accrue au sein du rideau comme le montre la figure 6.4(a) où cette grandeur est représentée en fonction de la hauteur. L'évolution de la quantité d'eau obtenue par simulation numérique est classique d'un cas descendant. Une première phase est caractérisée par une augmentation de ce paramètre en s'éloignant du point d'injection, s'expliquant par la rapide décélération des gouttes sous les effets des forces de traînée et de gravité (les petites gouttes étant freinées plus rapidement que les grosses gouttes, on retrouve ainsi un faible volume d'eau près du point d'injection). La faible variation de la quantité d'eau au cœur du spray est due à la constance des paramètres dynamiques (la majorité des

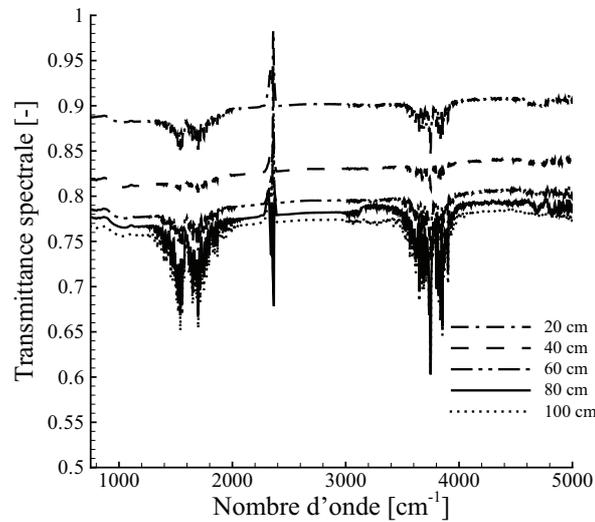
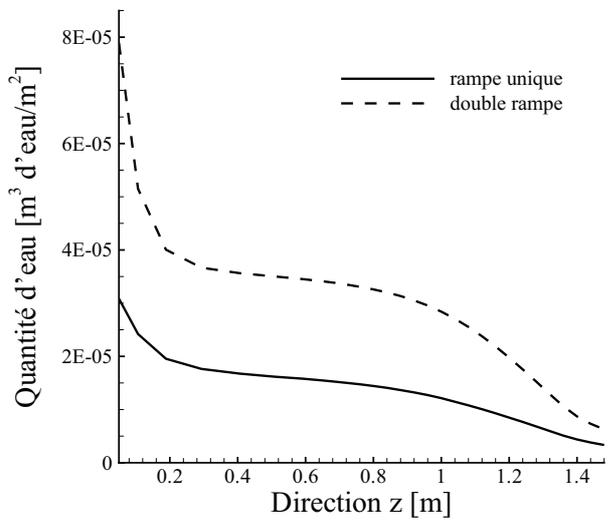


FIGURE 6.3 – Evolution des transmittances spectrales expérimentales en fonction de la hauteur pour un système de double rampe

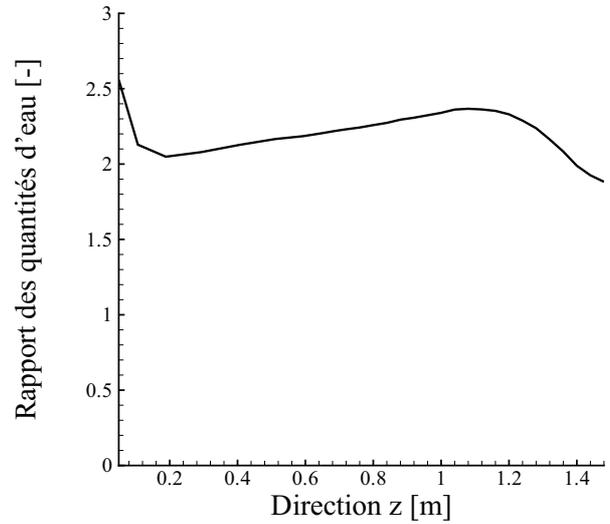
gouttes ayant atteint leur vitesse de chute). Ensuite, dans une zone proche du sol, le volume d'eau augmente de nouveau en raison de l'évacuation de l'écoulement d'air sur les côtés à son arrivée à la paroi (les gouttes sont alors entraînées par ce mouvement de l'air augmentant ainsi leur temps de présence dans le domaine) et de l'augmentation de la largeur du rideau. Par ailleurs, au sein du rideau, le rapport existant en terme de volume d'eau entre les systèmes de simple rampe et double rampe est toujours supérieur à deux (pourtant la quantité d'eau injectée est seulement doublée dans le cas de la double rampe). Ceci amène à penser que la quantité d'eau est mieux répartie au sein du spray dans une configuration en double rampe.

Les études du diamètre des gouttes et de la fraction volumique, dont les évolutions sont illustrées dans des plans verticaux (plans XZ) passant par la buse d'injection sur les figures 6.5, viennent appuyer les conclusions apportées en analysant la quantité d'eau au sein du rideau. Nous retrouvons ainsi la présence majoritaire de petites gouttes dans une zone proche du point d'injection (figure 6.5(a)). Puis, les grosses gouttes vont se situer à la périphérie du spray encerclant ainsi les particules de plus petites tailles, ce qui apporte probablement une certaine stabilité au rideau. Les effets d'échappement d'air à la paroi inférieure sont retrouvés avec des petites gouttes s'échappant du cœur du spray à l'approche du sol (en fraction volumique très limitée cependant, figure 6.5(b)). La fraction volumique suit globalement les mêmes variations que la quantité d'eau avec une augmentation de cette grandeur en s'éloignant du point d'injection. Avec un espacement de 10 cm entre les rampes, les sprays générés par chacune d'entre elles entrent en interaction. Alors que cette interaction laisse entrevoir une probable augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air, la constance du temps de séjour des gouttelettes d'eau (tableau 6.1 pour deux tailles de gouttes :  $66 \mu\text{m}$  et  $271 \mu\text{m}$ ) montre que ce phénomène a peu d'influence sur la dynamique du rideau.

La double rampe possède plusieurs avantages comparés à une utilisation en rampe unique : une meilleure répartition de la quantité d'eau au sein du spray et un temps de séjour qui ne varie

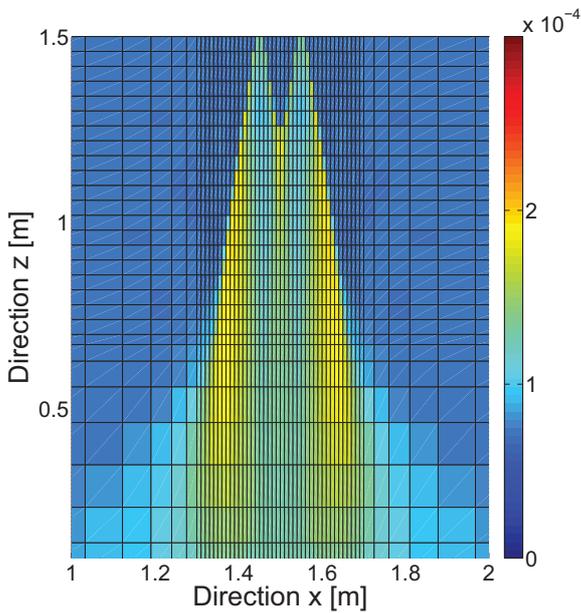


(a) Répartition de la quantité d'eau au sein du rideau

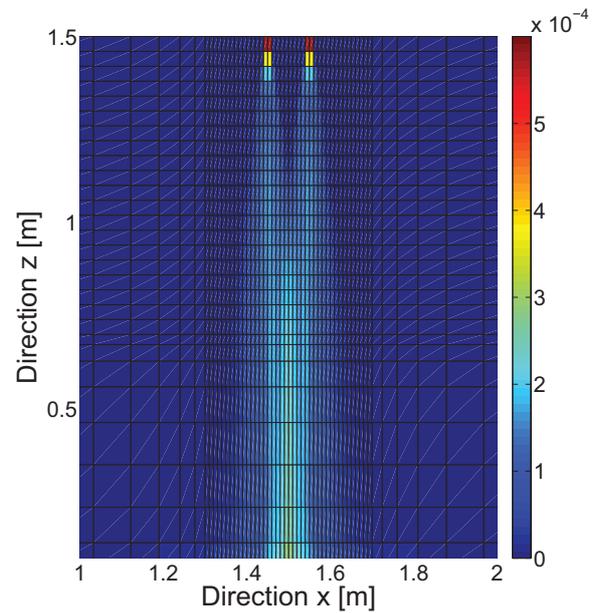


(b) Rapport des quantités d'eau obtenues entre une double rampe et une simple rampe

FIGURE 6.4 – Evolution de la quantité d'eau en fonction de la hauteur dans le rideau pour des configurations en simple rampe et en double rampe



(a) Diamètre de Sauter [m]



(b) Fraction volumique [ $\text{m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air]

FIGURE 6.5 – Evolution des caractéristiques dynamiques du spray (diamètre et fraction volumique) dans un plan vertical passant par le point d'injection

Diamètre	Configuration	
	Simple rampe	Double rampe
66 $\mu\text{m}$	0,88	0,86
271 $\mu\text{m}$	0,26	0,26

TABLE 6.1 – Temps de séjour (s) des gouttes pour des systèmes en simple rampe et double rampe

pas malgré le doublement du débit injecté (alors que de manière générale, une augmentation du débit pour une même configuration entraîne inévitablement une diminution du temps de séjour liée à une augmentation de la vitesse d'éjection, ce qui engendre un rideau moins efficace). Les conclusions apportées rejoignent celles établies dans les travaux de Collin [Collin *et al.*, 2010]. A débit constant, une double rampe possède une meilleure capacité d'atténuation car elle n'engendre pas une augmentation de la vitesse de passage des gouttes dans la zone de spray (provoquant ainsi une baisse du temps de séjour et une interaction goutte-rayonnement plus faible). A présent, plusieurs systèmes de double rampe vont être analysés en fonction de l'écartement entre les deux rampes et en fonction de l'espacement entre les tuyères d'injection.

### Paramètres influents : espacement entre buses d'injection et écartement entre rampes

La figure 6.6 présente les évolutions des transmittances totales expérimentales en fonction de la hauteur pour différents types de rideaux considérés. De manière globale, l'évolution "classique" de la transmittance pour une injection descendante est retrouvée avec l'augmentation de celle-ci en s'éloignant du point d'injection. Comme nous l'avons déjà observé auparavant dans le cas d'une rampe unique (paragraphe 5.1.2), la transmission du rayonnement à travers le rideau est plus forte dans le cas où les buses sont espacées de 20 cm sur la rampe avec un écart entre les deux configurations s'élevant en moyenne à 10 %. Suivant l'écartement entre les deux rampes du système, des différences sont à constater. Dans le cas d'un espacement entre buses de 10 cm, il existe un écartement entre rampes (20 cm) offrant une configuration optimale en terme d'efficacité. En effet, pour un espacement entre rampes de 20 cm, le gain en atténuation est environ de 5 % par rapport à un écartement de 10 cm. En ce qui concerne les configurations utilisant respectivement un écartement entre rampes de 30 cm et 40 cm, la valeur de la transmission totale du rayonnement est comprise entre les deux autres cas d'étude (dans la partie haute, elles sont plus proches du cas avec un écartement de 10 cm alors que dans la partie basse du rideau, elles sont quasiment équivalentes au cas où l'écartement entre rampes est de 20 cm). L'explication de ces évolutions a été fournie dans les travaux de Collin [Collin *et al.*, 2010] et provient d'un écoulement d'air entraîné différent suivant l'écartement entre les rampes. En effet, ces études ont montré que des boucles de recirculations de l'air apparaissent lorsque l'espacement entre rampes atteint 20 cm (elles n'existent pas pour le cas 10 cm projetant alors les gouttes directement au sol avec un temps de séjour plus faible). Pour les deux autres écartements (30 cm et 40 cm), le système de double rampe atteint alors ses limites et ne gagne plus en efficacité. Dans le cas d'un espacement entre tuyères de 20 cm (figure 6.6(b)), les évolutions sont différentes. En effet, dans la partie haute, le rideau est plus efficace pour un écartement entre rampes de 10 cm alors que dans sa partie basse, la capacité d'atténuation du rideau est plus forte pour une configuration adoptant un écartement de 40 cm.

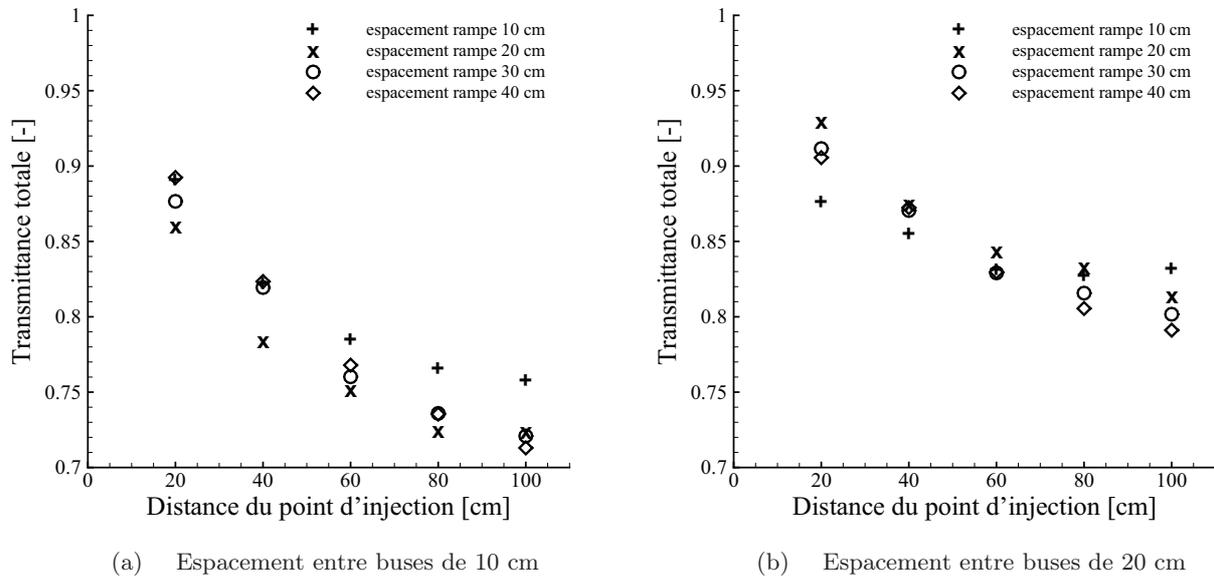


FIGURE 6.6 – Evolution de la transmittance totale en fonction de la hauteur dans le rideau pour des configurations de double rampe se différenciant par l'espacement entre buses et l'écartement entre rampes

### Comparaison à débits constants

L'objectif de cette comparaison est de répartir le débit d'eau injecté dans le cas d'une rampe sur deux rampes d'alimentation. Pour ce faire, des mesures expérimentales ont été réalisées pour une configuration utilisant une seule rampe avec un espacement entre les buses d'injection de 10 cm et un système de double rampe adoptant un espacement entre tuyères de 20 cm. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 6.7 en terme de transmittance totale en fonction de la hauteur. Globalement, il est préférable d'utiliser un système de double rampe, la capacité d'atténuation s'en trouvant alors améliorée (hormis dans une zone proche du point d'injection). A quantité d'eau injectée équivalente, les effets d'une dynamique plus lente du rideau montrent les bénéfices apportés par une double rampe (vitesse d'air plus faible engendrant un temps de séjour des gouttes plus conséquent dans le cas d'un espacement entre tuyères de 20 cm).

#### 6.1.3 Situation de panneau rayonnant

Le système de double rampe est à présent soumis à un scénario de surfaces rayonnantes étendues. La présentation de cette configuration radiative est largement détaillée dans le paragraphe 5.1.3. Les résultats numériques sont présentés sur la figure 6.8 en terme de transmittance totale en fonction de la hauteur dans le domaine. La courbe de transmittance obtenue dans le cas d'une rampe unique (la même rampe est utilisée) a également été rapportée à titre de comparaison. La capacité d'atténuation du rideau diminue en s'éloignant de la buse d'injection. Les effets dynamiques expliquent cette évolution et ont déjà été détaillés dans la section 6.1.2. La capacité d'atténuation d'un système associant deux rampes est doublée (en comparant avec une configuration en rampe unique). La quantité d'eau au sein du spray (qui est plus que doublée à l'intérieur de la zone de brouillard, figure 6.4) permet d'expliquer cette forte diminution de la

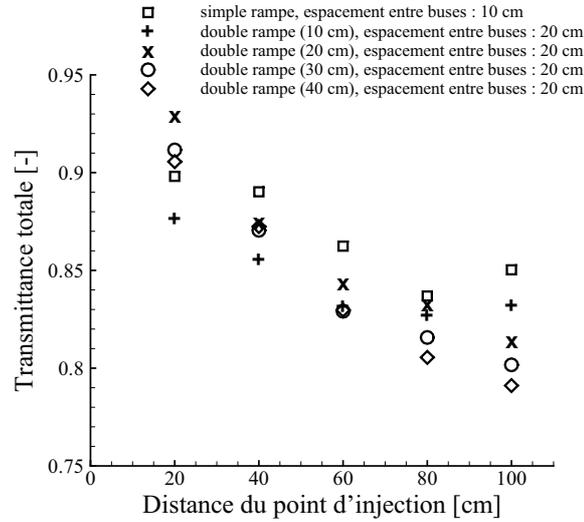


FIGURE 6.7 – Comparaison à débits constant (par mètre linéaire de rampe) des transmittances totales expérimentales entre une rampe avec un espacement entre buses de 10 cm et une double rampe avec espacement entre buses de 20 cm

transmittance. Des courbes de transmittances spectrales sont présentées en fonction du nombre d'onde sur les figures 6.9. L'évolution de cette grandeur dans le cas d'une double rampe est similaire à celle rencontrée pour une rampe seule avec des variations dues aux propriétés radiatives d'une pulvérisation (paragraphe 4.2.2). Les niveaux d'atténuation observés sur la figure 6.8 en fonction de la hauteur sont de nouveau retrouvés.

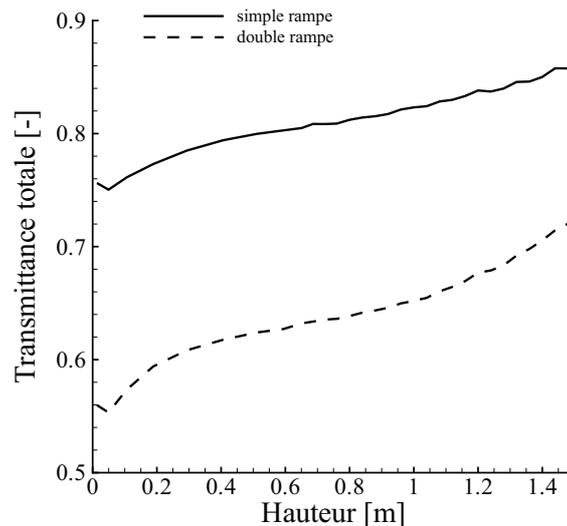


FIGURE 6.8 – Comparaison des transmittances totales entre des systèmes munis d'une seule rampe et de deux rampes

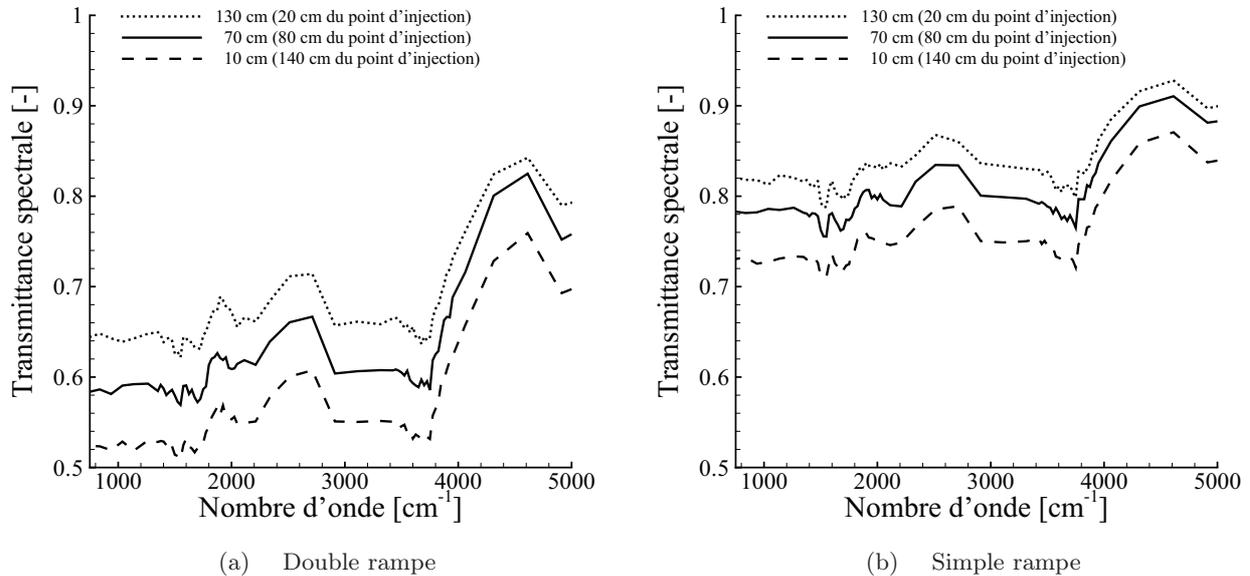


FIGURE 6.9 – Evolution des transmittances spectrales pour des systèmes munis d'une seule rampe et de deux rampes

#### 6.1.4 Bilan sur la configuration en double rampe

La stratégie de pulvérisation utilisant une double rampe possède de réels atouts dans l'optique d'optimisation des brouillards d'eau. Répartir le débit injecté sur deux rampes d'injection plutôt qu'une seule engendre alors une dynamique plus lente des gouttes, caractéristique favorable pour une meilleure capacité d'atténuation du rideau. L'influence de l'écartement entre les deux rampes a été évaluée et ce paramètre constitue un élément important pour améliorer l'efficacité du rideau. Toutefois, l'étude de systèmes adoptant une double rampe nécessiterait d'être étendue en proposant des résultats d'atténuation pour des pulvérisations en injection ascendante. Un autre objectif est de reprendre le travail numérique déjà réalisé et de le poursuivre sur les interactions entre sprays (effets de contre-courant notamment).

## 6.2 Etude dans le visible

Une interrogation soulevée par les pompiers concerne la visibilité à travers le rideau d'eau. L'inquiétude réside dans un possible manque de visibilité qui engendrerait des difficultés supplémentaires lors d'une intervention sur un incendie avec une technique de brouillard d'eau où l'on cherche cette fois à neutraliser voire éteindre totalement l'incendie. Les localisations exactes de la zone de feu et des personnes en danger dans les bâtiments sinistrés deviendraient compliquées, d'où une intervention plus difficile. Par ailleurs, au moment du déclenchement des systèmes de protection (avant l'arrivée du personnel d'intervention), les personnes sur les lieux doivent évidemment évacuer la zone dangereuse rapidement. Si la visibilité est insuffisante, cette évacuation devient très compliquée, engendrant potentiellement des conséquences désastreuses. On comprend ainsi qu'étudier la visibilité est primordial. Il faut signaler que dans cette étude, on ne considère que la visibilité à travers les rideaux d'eau. Evidemment, lors d'un incendie, la pro-

duction de fumées va engendrer des gênes visuelles plus ou moins importantes et des interactions eau-fumées. Nous ne nous situons pas dans ce cadre d'étude et seuls les effets du brouillard sont pris en considération.

Les inquiétudes concernant la visibilité à travers un rideau d'eau sont légitimes puisque ce dernier est un milieu fortement diffusant dans le domaine visible. Les coefficients radiatifs ont par exemple été calculés à une longueur d'onde de 625 nm, caractéristique de la couleur rouge, pour une fraction volumique de  $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air et un diamètre de goutte de 138  $\mu\text{m}$  : le coefficient d'absorption est de  $0,0035 \text{ m}^{-1}$  alors que le coefficient de diffusion vaut  $4,4 \text{ m}^{-1}$ , signe d'un phénomène de diffusion majoritaire. Le phénomène d'absorption est alors très faible dans la gamme de longueurs d'onde du visible (il a par ailleurs été vérifié que le coefficient d'absorption restait bas dans l'ensemble du domaine visible). Cet effet est bénéfique dans l'optique d'une bonne visibilité. En revanche, la diffusion des rayons lumineux reste un problème.

Le travail présenté dans ce chapitre consiste à évaluer la transmittance à travers des rideaux d'eau dans le domaine visible (par opposition au rayonnement infrarouge étudié jusqu'alors). L'étude concerne donc surtout la notion "d'opacité" et est essentiellement expérimentale (signa-lons tout de même qu'une comparaison avec la simulation numérique est effectuée) et concerne différentes configurations de rideaux (simple rampe et double rampe avec variation des espaces entre buses et écartements entre rampes). L'influence d'une augmentation de la quantité d'eau est évaluée (en passant d'une simple à une double rampe par exemple) sur la transmission dans le visible. Par ailleurs, une étude d'ordres de grandeur est également entreprise afin d'évaluer l'influence d'une variation sur la fraction volumique ou sur le diamètre des gouttes sur l'atténuation. Enfin, on tentera grâce à ces différentes études de remonter à la notion de visibilité à travers un brouillard.

### 6.2.1 Protocole de mesures et résultats typiques

Au niveau de la dynamique du spray, le banc expérimental reste identique à celui présenté dans le chapitre 3. Les configurations étudiées sont des simples ou des doubles rampes en pulvérisation descendante (7 buses du type TP400067 dont les caractéristiques sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.3 sont de nouveau associées par rampe). La pression d'alimentation est toujours de 4 bars.

Evidemment, le corps noir étendu et le spectromètre ne sont plus utilisés. Afin d'effectuer une étude dans le domaine visible, nous alignons une diode laser avec une photodiode. La diode émet un faisceau incident à une longueur d'onde de 635 nm (couleur rouge). Nous nous trouvons dans une situation de transmission directe où la diffusion du rayon, même avec un angle très faible, le dévie de sa cible (et participera par conséquent à l'atténuation du rayonnement visible). L'ensemble est relié à une interface numérique qui permet de récupérer le signal reçu par le capteur. La fréquence d'échantillonnage du capteur est réglée à 500 Hz et une acquisition de 500 mesures moyennées est effectuée toutes les secondes. Deux mesures sont alors réalisées : une avec spray et une sans spray. Une moyenne est ensuite effectuée sur chacun des deux signaux reçus sur l'ensemble des valeurs mesurées pendant la durée d'acquisition (environ une minute). Cette moyenne est calculée sur un nombre de valeurs suffisant pour ne pas être influencée par les variations du signal. La transmission du rayonnement visible à travers le spray s'obtient alors en divisant les moyennes calculées auparavant (avec spray/sans spray).

La figure 6.10 présente un ensemble de mesures typiques obtenues lors d'expérimentations (le cas considéré est un système muni de deux rampes écartées de 10 cm avec un espacement entre tuyères de 10 cm également). Des acquisitions avec spray et sans spray sont reportées sur le graphique. Peu de variations sont à noter sur les mesures successives effectuées en l'absence de rideau, montrant ainsi la stabilité du signal reçu. Les autres points de mesures proviennent d'acquisitions effectuées à différentes hauteurs dans le rideau (pour ce faire, la diode laser et le capteur sont alignés à différentes hauteurs, c'est-à-dire 60 cm, 80 cm et 100 cm sous la buse d'injection). Le signal reçu est légèrement moins stable que pour la référence (en l'absence du rideau), l'écart-type entre les différents points étant inférieur à 5 %. Les valeurs moyennes sont alors calculées et la transmission est obtenue par le rapport du signal reçu avec spray et sans spray.

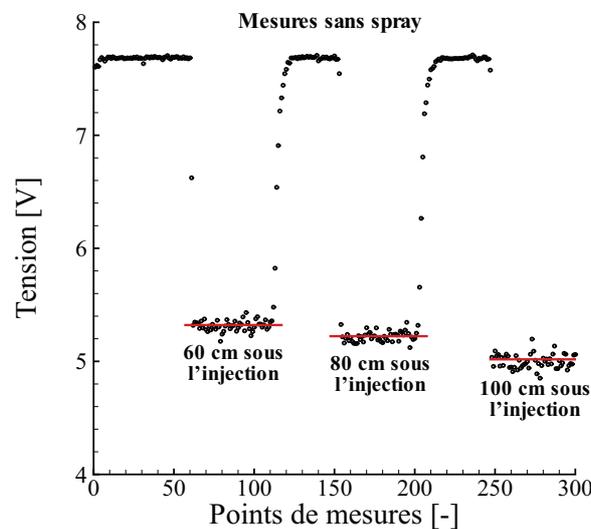


FIGURE 6.10 – Mesures typiques réalisées dans le visible pour une configuration de double rampe (écartement entre rampes de 10 cm et espacement entre tuyères de 10 cm) sous une pression d'alimentation de 4 bars

## 6.2.2 Résultats expérimentaux

Dans un premier temps, l'influence d'une augmentation de la quantité d'eau au sein du rideau sur la transmission du rayonnement visible est analysée. Pour ce faire, on ajoute une deuxième rampe identique (avec le même type de buse et le même espacement entre elles) à la première (on obtient alors un système de deux rampes éloignées de 10 cm). Les résultats sont recensés sur la figure 6.11. Logiquement, l'atténuation dans le domaine visible est plus importante lorsque la quantité d'eau injectée est plus grande. Toutefois, on observe que doubler le volume d'eau au sein du spray ne va pas doubler l'atténuation du rayonnement visible. En effet, dans le cas d'une double rampe, nous aurions dû obtenir une atténuation d'environ 44 % (pour un point de mesure situé à 100 cm sous la buse d'injection) alors qu'elle n'est que de 35 %. En ce qui concerne l'allure des courbes obtenues, elles sont similaires à celles obtenues lorsque la source de rayonnement émet dans l'infrarouge. En effet, la transmission diminue (l'atténuation devient plus forte) en s'éloignant du point d'injection. Cette évolution est essentiellement due à

l'augmentation de la fraction volumique en descendant dans le rideau (une fraction volumique plus forte va évidemment engendrer des événements de diffusion plus importants). Par ailleurs, on peut également souligner que l'écart entre simple et double rampe reste constant pour les différents points de mesures.

Augmenter la quantité d'eau injectée au sein d'un système de rideau d'eau engendre une meilleure efficacité face au rayonnement infrarouge (figure 6.2) mais va inévitablement s'accompagner d'une atténuation du rayonnement visible plus forte (et par conséquent d'une visibilité à travers le brouillard plus faible). Il faudra alors veiller à obtenir une bonne efficacité du rideau dans l'infrarouge sans pour autant qu'il atténue de manière trop considérable le rayonnement visible (pour illustrer cette difficulté, une étude sur la notion de visibilité est effectuée plus loin dans le paragraphe 6.2.5).

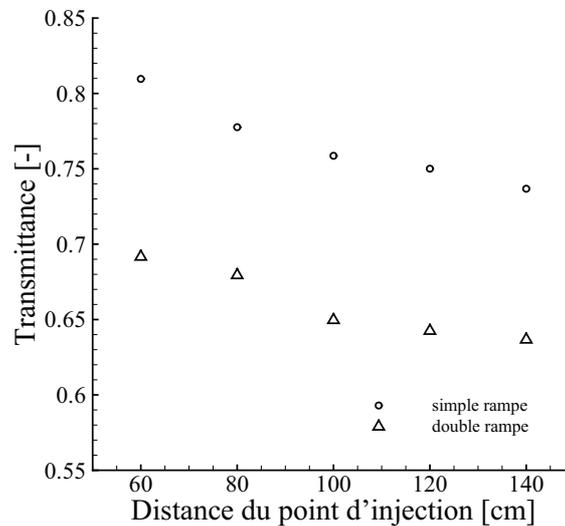


FIGURE 6.11 – Comparaison des transmittances entre une simple rampe (espacement entre tuyères : 10 cm) et une double rampe (écartement entre rampes : 10 cm, espacement entre tuyères : 10 cm)

La comparaison est à présent effectuée à quantité d'eau injectée constante entre un système de simple rampe avec un espacement entre buses de 10 cm et un système de double rampe avec un espacement entre tuyères de 20 cm (l'écartement entre rampes est de nouveau conservé à 10 cm). Nous avons montré dans le paragraphe 6.1.2 les bénéfices apportés sur la capacité du rayonnement infrarouge par une répartition du volume d'eau injecté sur une double rampe (au lieu d'une rampe unique). La mise en parallèle des deux cas est reportée sur la figure 6.12 en terme de transmission dans le domaine visible en fonction de la hauteur dans le rideau. L'atténuation est légèrement plus forte pour le système de double rampe (hormis le point de mesure situé à 140 cm de la buse d'injection) ce qui s'explique probablement par une quantité d'eau mieux répartie (et donc plus importante au sein du rideau), caractéristique d'ailleurs bénéfique dans le cas d'une protection face à une source de rayonnement infrarouge. Là encore, les atténuations du rayonnement par le rideau dans le domaine infrarouge et dans le domaine visible sont voisines mais ce qui est considéré comme avantageux dans un cas ne l'est pas dans l'autre. Une efficacité importante dans le domaine infrarouge s'accompagne d'une augmentation de l'atténuation dans

le domaine visible (à granulométrie équivalente en tout cas), amenant inévitablement une baisse de la visibilité.

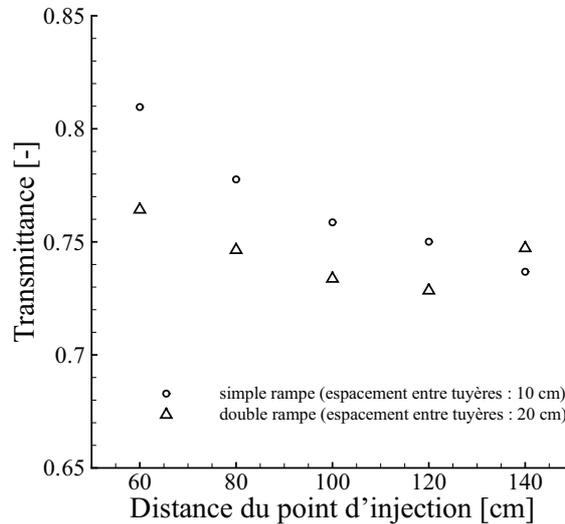


FIGURE 6.12 – Evolution de la transmittance dans le visible pour des configurations de rideaux utilisant la même quantité d'eau

La transmission du rayonnement dans le domaine visible est évaluée expérimentalement pour différents systèmes de double rampe sur la figure 6.13 en fonction de la hauteur. Les espacements entre tuyères de 10 cm (figure 6.13(a)) et 20 cm (figure 6.13(b)) sont considérés pour quatre écartements entre rampes différents (10 cm, 20 cm, 30 cm et 40 cm). Dans le cas d'un espacement entre buses d'injection de 10 cm, le système avec les rampes écartées de 10 cm se distingue par une atténuation globalement plus faible par rapport aux trois autres configurations. Cet écart s'explique de nouveau par la dynamique des gouttes. Un faible écartement entre rampes a tendance à projeter plus rapidement les gouttes au sol (l'écoulement d'air entraîné est plus fort), induisant une fraction volumique plus faible au sein du rideau. En ce qui concerne les trois autres systèmes, les transmissions du rayonnement visible sont voisines. Par ailleurs, pour l'espacement entre buses de 20 cm, la transmission dans le domaine visible est évidemment plus faible du fait d'une quantité d'eau injectée moins importante. On peut constater que l'écart entre les différents systèmes est assez faible.

Bilan :

La quantité d'eau au sein du spray est un paramètre primordial dans la transmission du rayonnement visible par rideau d'eau. Rappelons que cette caractéristique était déjà une des grandeurs majeures dictant l'efficacité d'un rideau en tant que système de protection infrarouge. Toutefois, l'augmentation de la quantité d'eau provoque une transmission du rayonnement visible plus faible, et par conséquent une visibilité probablement moins bonne (en supposant qu'une baisse de la transmission dans le visible se traduit directement par une moins bonne visibilité). On retiendra également que les évolutions des transmissions du rayonnement dans le visible sont

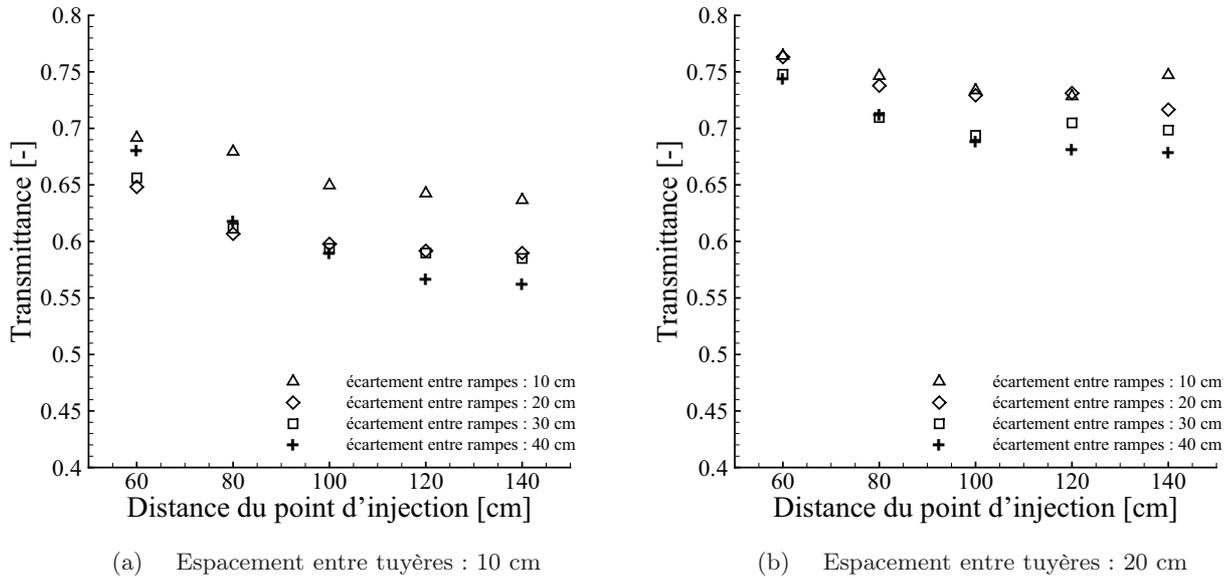


FIGURE 6.13 – Evolution de la transmittance dans le visible pour des systèmes de double rampe sensiblement équivalentes à celle obtenues dans l’infrarouge.

### 6.2.3 Comparaison avec la simulation numérique

Une simulation numérique (utilisation de la méthode de Monte-Carlo) a été réalisée dans les mêmes conditions que les essais expérimentaux avec une émission du rayonnement collimatée et une réception sur une surface réduite (disque de diamètre 8 mm) à une longueur d’onde de 635 nm. Une association de deux rampes écartées de 10 cm avec un espacement entre tuyères d’injection de 10 cm a été utilisée. Les propriétés radiatives sont tirées de la théorie de Mie appliquée à partir de valeurs d’indice issues des travaux de Halle et Query [Hale et Query, 1973], comme dans l’infrarouge. La comparaison avec les données expérimentales est visualisée sur la figure 6.14 en fonction de la hauteur. Une différence d’environ 5 % existe entre les résultats numériques et expérimentaux. En parallèle, la transmission obtenue par une simple loi de Beer basée sur le coefficient d’extinction est ajoutée sur le graphique. La différence de transmissions engendrée par l’utilisation de cette loi est importante. La loi de Beer ne permet pas de rendre compte de la forte anisotropie de la diffusion vers l’avant, induisant une déviation si faible que certains rayons diffusés contribuent quand même au signal reçu par le détecteur. Cette méthode fournit des résultats approximatifs d’une mesure de transmission à travers le rideau d’eau.

### 6.2.4 Ordres de grandeur de transmissions dans le visible

Une étude d’ordres de grandeur pour différentes fractions volumiques en eau et diamètres de gouttes est réalisée pour évaluer les effets engendrés sur la transmission du rayonnement visible. Le domaine utilisé est identique à celui présenté dans la section B.1.2 de l’annexe B (domaine composé de trois zones avec un écran radiatif de 10 cm d’épaisseur). Les sources d’émission et de réception du rayonnement sont identiques sauf que la longueur d’onde considérée se situe dans le

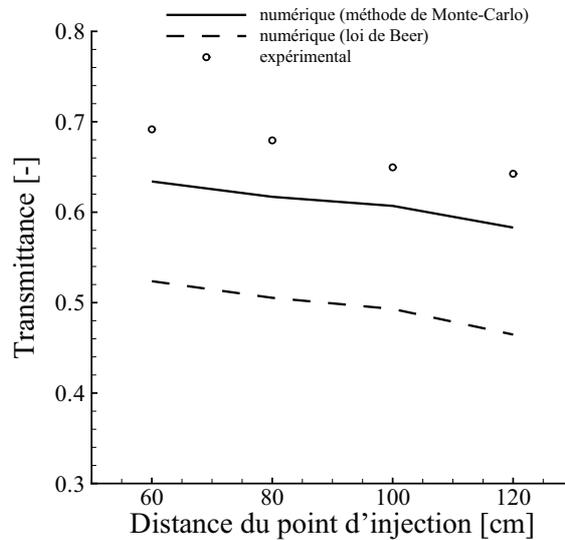


FIGURE 6.14 – Comparaison entre les transmittances numériques et expérimentales obtenues dans le visible pour un système de double rampe (tuyères et rampes espacées de 10 cm)

domaine visible (650 nm). Il a par ailleurs été vérifié que la transmission est invariante suivant la hauteur dans le domaine. Ces valeurs de transmittances sont reportées dans le tableau 6.2 pour différentes valeurs de fraction volumique et diamètre de gouttes. Logiquement, la transmission du rayonnement visible diminue lorsque la fraction volumique augmente ou lorsque les tailles de gouttes diminuent. Pour les systèmes de rideaux d'eau considérés jusqu'à maintenant (à échelle du laboratoire), la fraction volumique est de l'ordre de  $10^{-4}$  m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> d'air et le diamètre des gouttes de l'ordre de 100  $\mu$ m. On obtient alors une transmission du rayonnement d'environ 98 %, ce qui devrait probablement assurer une bonne visibilité à travers le brouillard. Par ailleurs, ce tableau est à mettre en parallèle avec l'étude réalisée avec une source de rayonnement infrarouge (section B.2.1 de l'annexe B). Comme déjà observé auparavant, l'évolution de la transmission est similaire. En revanche, les niveaux obtenus sont plus faibles dans le domaine infrarouge. Cet écart s'explique par le phénomène d'absorption du rayonnement. En effet, en situation de panneau rayonnant, le phénomène d'absorption traduit majoritairement le niveau d'atténuation atteint (la diffusion fortement anisotrope vers l'avant joue un rôle très limité dans la capacité d'atténuation du rideau). Hors, à une longueur d'onde de 650 nm, le coefficient d'absorption est très faible, ce qui explique alors une baisse moins rapide de la transmission dans le domaine visible lorsque la quantité d'eau augmente (par exemple, pour une fraction volumique de  $10^{-4}$  m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> d'air et une taille de gouttes de 50  $\mu$ m, la transmittance obtenue à 5  $\mu$ m est de 71,5 % alors qu'elle vaut 97,3 % à 650 nm). Quelques particularités sont à constater : pour des grosses tailles de gouttes (supérieures à 500  $\mu$ m), la transmission de rayonnement visible est toujours supérieure à 90 % (on peut alors penser que la visibilité d'un tel système sera probablement bonne). En revanche, pour des diamètres inférieurs, l'augmentation de la fraction volumique engendre des atténuations très importantes voire proche de 100 % (notamment pour des fractions volumiques de  $10^{-1}$  m<sup>3</sup> d'eau par m<sup>3</sup> d'air, valeur certes particulièrement élevée). Dans le paragraphe suivant, on tentera de remonter à la notion de visibilité en fonction des paramètres d'opacité.

Signalons qu'une simulation a été effectuée à une longueur d'onde de 400 nm (couleur

bleue). Les résultats obtenus sur la transmission du rayonnement sont quasiment identiques. Par exemple, pour un diamètre de  $100 \mu\text{m}$  et une fraction volumique de  $10^{-3} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air, on obtient une transmission de 0,862 au lieu de 0,860 dans le rouge à 650 nm.

		Fraction volumique [ $\text{m}^3$ d'eau/ $\text{m}^3$ d'air]				
		$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
Diamètre	10 $\mu\text{m}$	0,971	0,798	0,214	0,028	$\approx 0$
	50 $\mu\text{m}$	0,998	0,973	0,743	0,165	0,019
	100 $\mu\text{m}$	0,997	0,983	0,861	0,321	0,041
	500 $\mu\text{m}$	1,000	1,000	0,997	0,992	0,931
	1 mm	0,997	1,000	1,000	1,000	0,998

TABLE 6.2 – Transmittances dans le visible à une longueur d'onde de 650 nm à travers un écran radiatif pour différents diamètres et fractions volumiques

Remarque : le tableau 6.3 présente la transmittance dans le visible obtenue par une loi de Beer basée sur le coefficient d'extinction. Chaque cellule du tableau donne le coefficient d'extinction (partie basse de la cellule) et la transmittance à 650 nm (partie haute de la cellule). Comme déjà observé plus haut, ces valeurs montrent que la loi de Beer fournit une surestimation de l'atténuation du rayonnement visible par le rideau d'eau (comme c'était le cas pour une transmission calculée dans l'infrarouge). L'écart entre les deux méthodes de calcul est très important ici où les zones d'émission et de réception ne sont pas ponctuelles. Pour illustrer ce phénomène, prenons l'exemple d'une configuration avec une fraction volumique de  $10^{-3} \text{ m}^3$  d'eau par  $\text{m}^3$  d'air avec un diamètre de gouttes de  $100 \mu\text{m}$  (grandeurs que nous pouvons rencontrer dans nos cas de simulation). Avec la méthode de Monte-Carlo, la transmittance obtenue est de 86,1 % alors qu'elle atteint uniquement 5 % avec la loi de Beer. De manière globale, le coefficient d'extinction augmente avec la fraction volumique et lorsque la taille des gouttelettes d'eau diminue.

### 6.2.5 Notion de visibilité

Ce qui précède est lié à la notion d'opacité ou concerne des transmittances dans la gamme du rayonnement visible mais ne rend pas directement compte de la "visibilité". La visibilité dépend du niveau de contraste entre un objet et son environnement. On définit le contraste  $C$  comme un rapport de luminance  $L$  :

$$C = \left| \frac{L(\text{objet}) - L(\text{fond})}{L(\text{fond})} \right| \quad (6.1)$$

La valeur du contraste de 0,02 est couramment utilisée comme limite de visualisation d'un objet (elle correspond au contraste d'un objet noir placé sur fond blanc dans des conditions d'illumination solaire). La visibilité d'un objet est alors la distance nécessaire pour réduire le contraste à cette valeur limite. Les travaux bibliographiques de Guillaume [Guillaume, 2006] et

		Fraction volumique [m <sup>3</sup> d'eau/m <sup>3</sup> d'air]				
		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
Diamètre	10 μm	0,74 3,1	0,05 30,7	0 306,4	0 3063,8	0 30638,3
	50 μm	0,94 0,6	0,54 6,1	≈ 0 61,2	0 611,8	0 6118,5
	100 μm	0,97 0,3	0,74 3,1	0,05 30,5	0 306,1	0 3061,3
	500 μm	≈ 1 ≈ 0	0,99 0,1	0,94 0,66	0,51 6,6	≈ 0 66,5
	1 mm	≈ 1 ≈ 0	≈ 1 ≈ 0	0,99 0,08	0,92 0,79	0,45 7,9

TABLE 6.3 – Transmittances calculées par une loi de Beer basée sur le coefficient d'extinction (chaque cellule contient  $\beta$  en bas à gauche en m<sup>-1</sup> et  $Tr_{Beer}$  en haut à droite) à une longueur d'onde de 650 nm pour un écran radiatif avec différents diamètres et fractions volumiques

Tadahisa [Tadahisa, 2002] ont mis en avant une relation liant la visibilité au coefficient d'absorption pour les fumées. Pour les systèmes "lumineux" (émettant de la lumière), cette dernière s'écrit :

$$V = \frac{8}{\beta} \quad (6.2)$$

où  $V$  est la visibilité s'exprimant en mètres et  $\beta$  le coefficient d'extinction. Le coefficient "8" a été obtenu à la suite d'essais expérimentaux sur la visibilité à travers la fumée présentés dans les références précédemment citées. Notons que cette relation est valable pour des trajets entre 5 et 15 mètres. Le tableau 6.4 correspond alors à l'estimation de la visibilité dans un brouillard supposé homogène caractérisé par les fractions volumiques et diamètres de gouttes affichés en entrée de tableau. Lorsque le résultat est inférieur à 5 m ou supérieur à 15 m, cette valeur seuil est simplement affichée puisque l'on sort du cadre d'utilisation de la corrélation. Les valeurs de  $\beta$  utilisées sont renseignées dans le tableau 6.3.

Il s'agit là d'une évaluation approximative qui montre la possibilité de prévoir la visibilité sous réserve d'avoir accès aux paramètres fraction volumique et taille de gouttes. Dans le cas de cette étude, qui nécessiterait certes des approfondissements, la visibilité semblerait réduite à moins de 5 m pour des tailles de gouttes inférieures à 100 μm, ce qui peut potentiellement poser des problèmes même si cela dépend des configurations géométriques. On ne peut pas se contenter d'une telle évaluation d'autant qu'elle est basée sur une corrélation valable pour des fumées (milieu essentiellement absorbant) tandis que notre milieu est essentiellement diffusant. Les notions de "contraste" et de "résolution" doivent être incluses dans l'analyse.

### 6.2.6 Bilan sur l'étude dans le visible

L'étude dans le visible a montré des évolutions de transmissions à travers le rideau similaires à ce que l'on a vu dans l'infrarouge. Une augmentation de fraction volumique ou une diminution de la taille des gouttes diminue la transmission du rayonnement visible. Toutefois, les niveaux

		Fraction volumique [m <sup>3</sup> d'eau/m <sup>3</sup> d'air]				
		10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>
Diamètre	10 μm	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
	50 μm	8,2	< 5	< 5	< 5	< 5
	100 μm	> 15	< 5	< 5	< 5	< 5
	500 μm	> 15	> 15	7,5	< 5	< 5
	1 mm	> 15	> 15	> 15	6,3	< 5

TABLE 6.4 – Evolution de la visibilité (en m) en fonction de la fraction volumique et du diamètre des gouttes

atteints sont moindres puisque le phénomène d'absorption est très limité dans le domaine visible. En considérant qu'une atténuation plus forte des rayons lumineux va engendrer une baisse de visibilité, on a confirmation que les effets bénéfiques du rideau dans l'infrarouge peuvent être pénalisants dans le visible. En effet, augmenter la quantité d'eau (ou diminuer la taille des gouttes) engendre un rideau très efficace face au rayonnement d'une forte source de chaleur. Dans le même temps, cela provoque une perte de visibilité. Toute la difficulté réside alors dans la capacité à utiliser un rideau à la fois protecteur contre les flux de chaleur et laissant une visibilité suffisante.

# Conclusions et perspectives

Les systèmes de rideau d'eau sont utilisés au cours de ces travaux de recherche comme dispositifs de protection contre le rayonnement infrarouge issu d'une forte source de chaleur (incendie par exemple). Ces derniers permettent ainsi de créer de véritables boucliers radiatifs dans l'optique de protéger des biens ou des personnes. Plusieurs avantages mettent en avant l'utilisation de l'eau sous forme pulvérisée. La quantité d'eau injectée est en effet moindre (par rapport à des systèmes de protection incendie tels que le sprinklage qui utilise des gouttes beaucoup plus grosses), pour une efficacité qui est plus intéressante du point de vue de l'interaction avec le rayonnement en tout cas. Par ailleurs, il faut souligner qu'à même quantité d'eau, une pulvérisation de fines gouttelettes engendre une surface d'échange plus importante avec des conséquences bénéfiques sur le plan de l'évaporation par exemple. La combinaison de l'ensemble de ces effets conforte le brouillard d'eau comme un système de protection incendie attractif, ce qui en fait par conséquent un axe de recherche incontournable.

La motivation principale de ce travail résidait dans l'optimisation des systèmes de brouillards et rideaux d'eau en comparant différentes stratégies de pulvérisation. Le but était d'étudier une alternative au jet descendant "classique" où les gouttes sont projetées directement vers le sol, cette manière d'utiliser l'eau injectée n'étant probablement pas optimale. Avec une stratégie ascendante où les gouttelettes d'eau sont lancées vers le haut, il est possible d'obtenir une meilleure répartition de la quantité d'eau au sein du spray, engendrant ainsi des efficacités plus importantes. Par ailleurs, une troisième stratégie qui privilégie l'injection directe du spray "impactant" sur la cible à protéger a également fait l'objet d'une analyse.

Pour réaliser l'ensemble de ces études, des outils de caractérisation ont été mis en place. Le code de calcul BERGAMOTE, développé au sein du laboratoire, permet la modélisation numérique de rideaux d'eau utilisés comme bouclier face au rayonnement. La dynamique du spray est simulée par un couplage eulérien-lagrangien. Le suivi lagrangien permet d'estimer l'ensemble des caractéristiques dynamiques de chaque goutte présente dans le domaine (position, vitesse, diamètre, température, masse). Les phénomènes de dispersion turbulente ainsi que les transferts de chaleur par convection et par évaporation entre la goutte et l'air environnant sont pris en considération. Le résultat produit est la répartition granulométrique connue en tout point du rideau. Par ailleurs, la méthode lagrangienne va également fournir des termes sources simulant l'influence des particules d'eau sur la phase continue. La modélisation de l'écoulement d'air au sein du milieu est effectuée par simulation eulérienne. Elle consiste en une résolution des équations de transport sur la masse, la quantité de mouvement, l'énergie cinétique turbulente et sa dissipation, l'énergie, et l'humidité par méthode des volumes finis. Le couplage des deux méthodes permet d'obtenir l'ensemble des caractéristiques du rideau d'eau.

En ce qui concerne les transferts radiatifs, le milieu diphasique air-gouttelettes considéré est un système à la fois absorbant et diffusant. Le phénomène d'absorption est dû aux gouttes et aux

gaz environnants (vapeur d'eau et dioxyde de carbone). En ce qui concerne la diffusion, seules les particules d'eau en sont responsables. Par ailleurs, cette diffusion est fortement anisotrope vers l'avant (suivant la direction d'incidence du rayon). La modélisation numérique prend en compte l'ensemble de ces phénomènes grâce à la méthode de Monte-Carlo qui va permettre au final d'évaluer la capacité d'atténuation d'un rideau d'eau (après des calculs de flux réalisés avec et sans spray pour comparaison). Signalons que les propriétés radiatives du milieu sont évaluées par la théorie de Mie pour les gouttelettes d'eau et grâce au modèle C-k pour les gaz. Au cours de ces travaux, ce code de calcul a été adapté afin de pouvoir modéliser différentes stratégies de pulvérisation utilisées dans plusieurs configurations radiatives. Par ailleurs, des améliorations sur la partie radiative ont permis de réduire les temps de calcul.

Afin de caractériser expérimentalement les brouillards d'eau, un banc de mesures a été mis en place. Ce dernier permet de déterminer la transmission spectrale pour un large panel de configurations en rideaux d'eau. L'influence de nombreux paramètres sur la capacité d'atténuation de sprays a été évaluée. On pense en premier lieu à la direction d'injection avec des mesures réalisées en pulvérisations descendante et ascendante. Le banc expérimental autorise la caractérisation radiative de systèmes associant plusieurs tuyères d'injection (rampes). Là encore, les paramètres d'étude ont été multiples : direction d'injection, nombre de buses associées ainsi que l'espacement entre elles, angle d'injection, pression d'alimentation (donc le débit d'eau injecté), position de la mesure dans le rideau. L'étude de systèmes en double rampe (en ajoutant une rampe à la première déjà en place) a également été effectuée.

L'ensemble de ces outils de caractérisation a permis d'effectuer une étude comparative de différents systèmes d'injection. Il en est ressorti des pistes d'optimisation menant à une amélioration de la capacité d'atténuation de ces dispositifs de protection incendie.

## **Bilan global sur les résultats obtenus**

Trois stratégies de pulvérisation ont donc été comparées dans l'optique d'une optimisation des systèmes de rideaux d'eau : la pulvérisation descendante, la pulvérisation ascendante et la pulvérisation impactante. Les études réalisées ont été à la fois consacrées à l'aspect numérique et à l'aspect expérimental (à l'échelle laboratoire). Une synthèse des résultats majeurs sur ces trois configurations est présentée ci-dessous.

Le système de pulvérisation descendante possède comme principale caractéristique de projeter directement les gouttelettes d'eau au sol. Ce phénomène engendre évidemment un faible temps de séjour des gouttes dans le domaine (inférieur à la seconde pour la majorité des gouttes). La participation des gouttelettes d'eau à l'interaction avec le rayonnement s'en trouve alors limitée. Par ailleurs, des comparatifs entre résultats numériques et expérimentaux ont permis une validation du code de calcul (aussi bien sur des systèmes en spray unique que sur des systèmes en rampe). Cet accord était attendu puisque l'ensemble des caractéristiques du spray ont été mesurées (granulométrie, débit d'injection, angle d'injection) mais il donne du crédit à l'outil numérique BERGAMOTE. Les rôles joués par l'angle d'injection et l'espacement entre les tuyères disposées sur une rampe ont été évalués numériquement et expérimentalement. Une variation de l'angle d'injection entraîne en fait un effet limité sur la capacité d'atténuation du rideau. En revanche, réduire l'espacement entre les buses provoque une amélioration de l'efficacité du brouillard d'eau par augmentation de la quantité d'eau présente. Toutefois, ce gain se fait au détriment d'une consommation d'eau plus importante. Les effets entre dynamique et transferts radiatifs sont non linéaires et montrent qu'un volume d'eau injecté doublé n'entraîne pas une

efficacité du rideau deux fois "meilleure". Toute la difficulté réside alors dans la définition d'un compromis entre agencement des tuyères d'injection et quantité d'eau utilisée.

De son côté, la stratégie de pulvérisation ascendante propose d'injecter les gouttes vers le haut tout en gardant les mêmes conditions d'injection. Toutefois, il est probable qu'expérimentalement, l'utilisation d'une même buse avec des directions d'injection différentes engendre une modification de la granulométrie (ce qui a permis d'expliquer les différences entre les résultats numériques et les mesures expérimentales). Du point de vue de l'efficacité du rideau, le gain apporté par cette stratégie est considérable (en comparaison avec le cas descendant). Cet écart s'explique par une meilleure utilisation de l'eau au sein du spray. En effet, les gouttelettes d'eau injectées se déplacent dans une phase ascendante puis descendante (celle-ci est d'ailleurs optimisée par une redescende des gouttes dans la zone de spray à contre-courant de l'écoulement d'air). Le temps de séjour s'en trouve alors largement augmenté. La fraction volumique en eau au sein du spray est plus importante que dans le cas descendant. La combinaison de ces phénomènes dynamiques a permis d'expliquer le gain d'efficacité important apporté par la pulvérisation ascendante. Les influences d'une variation de l'angle d'injection et de l'espacement entre les buses d'une rampe ont également été évaluées. Les conclusions observées sont similaires à celles du cas descendant.

La stratégie impactante propose une optique de protection différente des deux autres configurations précédemment citées. En effet, le principe consiste à projeter directement le spray sur la cible à protéger. Cette particularité entraîne une double protection par le spray injecté d'une part et par le film liquide sur la paroi d'autre part (un dispositif de visualisation d'impact de gouttes a permis de conclure que le dépôt était le seul régime d'impact se produisant dans nos conditions d'utilisation). L'apport de ce film liquide sur la capacité d'atténuation du rideau n'est pas négligeable. Toutefois, la transmission spectrale de celui-ci est tributaire des variations du coefficient d'absorption de l'eau en fonction de la longueur d'onde. On observe par conséquent une baisse d'efficacité significative du film dans les petites longueurs d'onde (grands nombres d'onde). Par ailleurs, l'épaisseur de ce film est apparue comme le paramètre primordial dans l'optique d'optimiser la capacité d'atténuation de ce système. En effet, une épaisseur de film importante peut engendrer une transmission du rayonnement quasiment nulle.

En comparant les trois configurations en terme d'efficacité face au rayonnement infrarouge, la stratégie de pulvérisation descendante "classique" offre des capacités d'atténuation limitées (dans nos cas d'étude à l'échelle laboratoire). Le cas ascendant apparaît alors comme une alternative majeure à la configuration descendante en optimisant l'utilisation de la quantité d'eau injectée. Les efficacités obtenues pour ce système d'injection s'en trouve largement améliorées (par un facteur 3 environ en conditions expérimentales et par un facteur avoisinant 4 avec une granulométrie injectée identique). Quant à la stratégie impactante, elle offre une alternative de choix notamment grâce à la présence du film liquide sur la paroi à protéger. L'optimisation des systèmes de protection par rideaux d'eau aura ainsi été l'objectif majeur de ces travaux. Une étude a également été réalisée avec des systèmes de double rampe descendante permettant d'augmenter l'épaisseur du brouillard.

Par ailleurs, ces différentes études ont également apporté plusieurs conclusions complémentaires. Tout d'abord, un fort lien entre la dynamique du spray et les transferts radiatifs a été mis en évidence. En effet, les capacités d'atténuation obtenues sont inévitablement associées aux principaux paramètres dynamiques que sont la fraction volumique en eau au sein du spray et la distribution granulométrique. Une forte quantité d'eau ainsi que des petites tailles de gouttes favorisent une meilleure atténuation du rayonnement infrarouge. Toutefois, ces observations ne doivent pas être déconnectées de la notion de stabilité du brouillard et de la consommation d'eau engendrée. Par ailleurs, des effets non-linéaires entre dynamique et transferts radiatifs sont ap-

parus. Ces phénomènes soulèvent la difficulté d'estimer l'efficacité d'un rideau en configurations réelles (où les débits sont plus élevés) à partir d'expérimentations à échelle du laboratoire. Les essais grandeur nature apparaissent alors nécessaires.

Des différences de comportement suivant le scénario radiatif considéré ont également été mises en avant. Dans une situation de transmission directe (typiquement le cas de nos expérimentations où l'angle et la surface de réception du rayonnement sont très faibles), le phénomène de diffusion est apparu très efficace. En effet, une déviation, même légère, permet au rayonnement de ne pas atteindre la cible à protéger. Les effets d'absorption et de diffusion se cumulent et la transmittance spectrale connaît alors peu de variations en fonction de la longueur d'onde. En revanche, dans le cas d'un scénario du type panneau rayonnant (où la réception du rayonnement est hémisphérique sur une surface étendue), seule l'absorption est réellement efficace pour piloter la capacité d'atténuation du rideau. La diffusion apparaît comme inefficace du fait de sa forte anisotropie vers l'avant (seules les diffusions multiples ou la rétro-diffusion peuvent permettre de dévier suffisamment le rayon incident de sa cible, toutefois ces effets sont très minoritaires dans nos cas d'étude). Par conséquent, la diminution du phénomène d'absorption pour les forts nombres d'onde entraîne une perte d'efficacité significative dans cette même gamme. Cette particularité ne doit par conséquent pas être omise dans le cas d'études avec des surfaces rayonnantes étendues (typique d'une configuration réelle).

Les derniers travaux effectués ont été consacrés à la notion de visibilité au sein du rideau. Cet aspect apparaît d'ailleurs primordial pour une application un peu différente : l'utilisation des brouillards d'eau en tant que systèmes d'extinction et non plus l'étude de rideaux utilisés comme barrière. En effet, un manque de visibilité à travers le brouillard rendrait difficile l'évacuation des personnes et dangereuse l'intervention des pompiers lors d'un sinistre. Pour ce faire, des mesures d'opacité ont été réalisées dans le visible à l'aide d'une diode laser et d'une photodiode. Elles ont montré la faisabilité de la mesure et les premiers résultats indiquent bien évidemment l'atténuation par le brouillard d'eau dans le visible sans pour autant induire une extinction totale de la lumière visible, dans nos études en tout cas. Restera à gérer la correspondance opacité - visibilité et à étendre les situations de mesure.

## **Perspectives**

Les perspectives de développement de ces travaux de recherche sont nombreuses et variées et concernent aussi bien la partie numérique que l'aspect expérimental.

Les premières améliorations pouvant être apportées sont d'abord concentrées sur l'outil numérique. Pour améliorer les temps de simulation, le code de calcul utilisé a été à l'origine parallélisé mais uniquement sur la partie lagrangienne (16 processeurs sont en général employés). En revanche, la simulation eulérienne ne profite pas de la parallélisation et la modélisation de l'écoulement d'air au sein du domaine ne s'effectue que sur un seul processeur. Une parallélisation de cette partie du code engendrerait une réduction des temps de calcul actuels. Signalons que la modélisation des transferts radiatifs à travers le spray est elle aussi parallélisée sur plusieurs processeurs.

L'aspect "couplage" nécessiterait également quelques modifications. En effet, jusqu'à présent, nos conditions d'étude (rideau placé assez loin de la forte source radiative) permettent de ne pas prendre en compte un éventuel couplage entre la dynamique du spray, le rayonnement et la source elle-même. En revanche, le problème deviendrait plus complexe si le rideau d'eau pulvérisé se situait proche de la zone émettrice. Dans ce cas précis, l'émission du rayonnement engendrerait des modifications sur les propriétés radiatives des gouttelettes d'eau au sein du spray, mais ce

sont surtout les interactions eau - feu - flamme qui deviendraient primordiales.

En ce qui concerne la source radiative, nous avons toujours utilisé le spectre d'émission d'un corps noir dans nos cas d'étude. Pour se rapprocher de configurations plus proches de la réalité, il serait intéressant d'introduire le spectre d'émission d'une flamme réelle.

Une perspective majeure concerne la stabilité des rideaux générés, notamment en configuration ascendante. Des études approfondies devraient être entreprises en soumettant les différents brouillards à un vent latéral. En effet, bien que ce système soit plus performant que la pulvérisation descendante, il pourrait perdre de son efficacité s'il se désagrège sous l'effet d'un système de ventilation par exemple. On se rapproche ici d'une application tunnel avec la présence de ventilation.

Dans l'ensemble des applications, nous avons toujours utilisé de faibles débits caractéristiques de nos conditions d'étude à échelle du laboratoire. Numériquement, on pourrait proposer une analyse centrée sur des pressions d'alimentation (et par conséquent débits) plus proches des conditions d'utilisation réelles. Cette étude permettrait d'évaluer, pour chaque stratégie de pulvérisation, les capacités d'atténuation atteintes lorsque le débit devient plus conséquent (pour des utilisations industrielles par exemple). Ce qui manque, ce sont alors les données à l'injection : granulométrie, vitesse, angles d'injection caractéristiques.

Par ailleurs, l'aspect double rampe a uniquement été analysé avec des pulvérisations descendantes. La configuration ascendante mériterait une attention particulière (numériquement et expérimentalement). D'après les résultats déjà obtenus, les niveaux d'atténuation atteints seraient probablement importants en utilisant d'ailleurs des débits faibles (comparés aux débits réels). De la même manière, le cas impactant nécessiterait un approfondissement. Il serait intéressant d'étudier la sensibilité de certains paramètres sur la capacité d'atténuation obtenue. On pense notamment à la distance à la paroi d'impact, aux angles d'injection, à la pression d'alimentation ou encore à l'espacement entre les différentes buses de la rampe. D'autre part, il serait important de développer un dispositif expérimental permettant la caractérisation de la stratégie impactante. Des mesures concernant l'épaisseur du film liquide seraient nécessaires afin de ne plus fixer arbitrairement ce paramètre dans les simulations numériques. L'épaisseur du film a par ailleurs été supposée homogène. Une étude toute particulière doit être menée sur l'écoulement de ce film sur la paroi à protéger, ce qui permettrait de prendre en compte les variations de l'épaisseur avec la hauteur (on s'attend à obtenir une épaisseur de film plus importante en bas de la surface à protéger, d'où une efficacité éventuellement supérieure). La "qualité" du recouvrement devrait également être analysée.

Enfin, la notion de visibilité doit faire l'objet d'une étude plus approfondie. En effet, cet aspect apparaît comme primordial dans l'utilisation des rideaux dans des configurations réelles et dans les applications types "brouillards d'eau". Cet aspect engendre d'ailleurs des interrogations de la part du personnel d'intervention. L'utilisation de systèmes de rideaux d'eau comme dispositifs de protection incendie ne doit pas être déconnectée de la notion de visibilité.



# Bibliographie

- [Bai et Gosman, 1995] BAI, C. et GOSMAN, A. (1995). Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Paper 950283*.
- [Béard, 1994] BÉARD, P. (1994). *Modélisation lagrangienne de la dispersion et de l'évaporation de gouttes dans un écoulement turbulent instationnaire*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace de Toulouse, France.
- [Beck et Watkins, 2002] BECK, J. et WATKINS, A. (2002). On the development of spray submodels based on drop-size moments. *Journal of Computational Physics*, 182:586–621.
- [Beck et Watkins, 2003] BECK, J. et WATKINS, A. (2003). The droplet number moments approach to spray modelling : the development of heat and mass transfer sub-models. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24:242–259.
- [Berlemont *et al.*, 1995] BERLEMONT, A., GRANCHER, M. et GOUESBET, G. (1995). Heat and mass transfer coupling between vaporizing droplets and turbulence using a lagrangian approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38(16):3023–3034.
- [Berour *et al.*, 2004] BEROUR, N., LACROIX, D., BOULET, P. et JEANDEL, G. (2004). Radiative and conductive heat transfer in a nongrey semitransparent medium. application to fire protection curtains. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 86(1):9–30.
- [Bohren et Huffman, 1983] BOHREN, C. et HUFFMAN, D. (1983). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley and Sons, New York.
- [Boulet *et al.*, 2006] BOULET, P., COLLIN, A. et PARENT, G. (2006). Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radiative source. *Fire Safety Journal*, 41:15–30.
- [Boulet et Moissette, 2002] BOULET, P. et MOISSETTE, S. (2002). Influence of the particle-turbulence modulation modelling in the simulation of a non-isothermal gas-solid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(20):4201–4216.
- [Buchlin, 2005] BUCHLIN, J. (2005). Thermal shielding by water spray curtain. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18:423–432.
- [Burry et Bergeles, 1993] BURRY, D. et BERGELES, G. (1993). Dispersion of particles in anisotropic turbulent flows. *International Journal of Multiphase Flow*, 19(4):651–654.
- [Castanet *et al.*, 2005] CASTANET, G., LÉBOUCHÉ, M. et LEMOINE, F. (2005). Heat and mass transfer of combusting monodisperse droplets in a linear stream. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48:3261–3275.
- [Chang, 1998] CHANG, Z. (1998). *Etude des collisions interparticulaires en écoulement turbulent isotrope et anisotrope par une approche lagrangienne à plusieurs trajectoires simultanées*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, France.
- [CNPP, 2007] CNPP (2007). *Document technique APSAD D2 - Brouillard d'eau - Guide pour l'installation de systèmes de protection incendie par brouillard d'eau*.

- [Collin, 2006] COLLIN, A. (2006). *Transferts de chaleur couplés rayonnement - conduction - convection. Application à des rideaux d'eau soumis à une intense source radiative*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- [Collin *et al.*, 2005] COLLIN, A., BOULET, P., LACROIX, D. et JEANDEL, G. (2005). On radiative transfer in water spray curtains using the discrete ordinates method. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 92(1):85–110.
- [Collin *et al.*, 2007] COLLIN, A., BOULET, P., PARENT, G. et LACROIX, D. (2007). Numerical simulation of a water spray - radiation attenuation related to spray dynamics. *International Journal of Thermal Sciences*, 45:856–868.
- [Collin *et al.*, 2008] COLLIN, A., BOULET, P., PARENT, G., VETRANO, M. et BUCHLIN, J. (2008). Dynamics and thermal behaviour of water sprays. *International Journal of Thermal Sciences*, 47:399–407.
- [Collin *et al.*, 2010] COLLIN, A., LECHÈNE, S., BOULET, P. et PARENT, G. (2010). Water mist and radiation interactions : application to a water curtain used as a radiative shield. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 57:537–553.
- [Consalvi *et al.*, 2004] CONSALVI, J., PORTERIE, B. et J.C., L. (2004). Dynamics and radiative aspects of fire / water mist interactions. *Combustion Science and Technology*, 178:721–752.
- [Coppalle *et al.*, 1993] COPPALLE, A., NEDELKA, D. et BAUER, B. (1993). Fire protection : water curtains. *Fire Safety Journal*, 20:241–255.
- [Cossali *et al.*, 1997] COSSALI, G., COGHE, A. et MARENGO, M. (1997). The impact of a single drop on a wetted surface. *Experiments in Fluids*, 22:463–472.
- [Cossali *et al.*, 2002] COSSALI, G., MARENGO, M., COGHE, A. et ZHDANOV, S. (2002). The role of time in single drop splash on thin film. *Experiments in Fluids*, 36:888–900.
- [Delconte, 2009] DELCONTE, A. (2009). *Fluorescence induite par laser multibande appliquée à la mesure de température dans les milieux complexes*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy - Université.
- [Dembélé, 1998] DEMBÉLÉ, S. (1998). *Modélisation et étude expérimentale des transferts de chaleur par rayonnement dans un rideau d'eau diphasique. Application à la protection incendie d'installations industrielles à risques*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [Dewitte, 2006] DEWITTE, J. (2006). *Modélisation de l'impact d'un brouillard de gouttes en évaporation et sous pression sur une paroi chauffée*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse.
- [Eduardo Lemini Aramburo, 2004] EDUARDO LEMINI ARAMBURO, E. (2004). *A new methodology for modelling impinging sprays based on drop size moments*. Thèse de doctorat, University of Manchester Institute of Science and Technology.
- [Faeth, 1977] FAETH, G. (1977). Current status of droplet and liquid combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 3(4):191–224.
- [Gosman et Ioannides, 1981] GOSMAN, A. et IOANNIDES, E. (1981). Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors. *In Proceedings 19<sup>th</sup> Aerospace Science Meeting, AIAA, St-Louis, MO, Paper No 81-0323*.
- [Graham et James, 1996] GRAHAM, D. et JAMES, P. (1996). Turbulent dispersion of particles using eddy interaction models. *International Journal of Multiphase Flow*, 22(1):157–175.

- 
- [Grancher, 1990] GRANCHER, M. (1990). *Simulation de l'évaporation de gouttelettes en écoulement turbulent suivant une approche lagrangienne*. Thèse de doctorat, Université de Rouen, France.
- [Grant et al., 2000] GRANT, G., BRENTON, J. et DRYSDALE, D. (2000). Fire suppression by water sprays. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26:79–130.
- [Griole, 1996] GRIOLET, F. (1996). *Dimensionnement des rideaux d'eau. Modélisation et applications industrielles*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1.
- [Gueyffier, 2000] GUEYFFIER, D. (2000). *Etude de l'impact de gouttes sur un film mince. Développement de la corolle et formation de projections*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI.
- [Guillaume, 2006] GUILLAUME, E. (2006). Effets du feu sur les personnes. *Document LNE (Laboratoire National de métrologie et d'Essais - Synthèse bibliographique, G020284/C672X01/CEMATE/1*.
- [Hald et Buchlin, 2003] HALD, K. et BUCHLIN, J. (2003). Thermal shielding by impinging water spray curtains. *Proceedings of Eurotherm 73 on Computational Thermal Radiation in Participating Media - Mons - Belgium*, pages 379–387.
- [Hald et al., 2005] HALD, K., BUCHLIN, J., DANDRIEUX, A. et DUSSEY, G. (2005). Heavy gas dispersion by water spray curtain : a research methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18:506–511.
- [Hale et Query, 1973] HALE, G. et QUERRY, M. (1973). Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu\text{m}$  wavelength region. *Applied Optics*, 12(3):555–563.
- [Hörter, 1996] HÖRTER, J. (1996). Development of a fundamental experiment to study the impact of monodisperse droplets on thin liquid films. *Diplomarbeit - ONERA - Toulouse*.
- [Kerker, 1969] KERKER, M. (1969). *The scattering of light and other electromagnetic radiation*. New York Academic Press.
- [Le Clercq, 2000] LE CLERCQ, P. (2000). *Contribution à l'étude expérimentale et théorique des interactions gouttes / paroi*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace - Toulouse.
- [Lelong, 2010] LELONG, F. (2010). *Expérimentation, modélisation et simulation de l'impact de gouttes d'eau sur le grainage gonflé des assemblages d'un cœur REP en situation d'accident de perte de réfrigérant primaire*. Thèse de doctorat, IRSN - Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire.
- [Lopez, 1991] LOPEZ, J. (1991). *Les rideaux de fluide appliqués au contrôle des rejets accidentels de gaz dangereux : modélisation et dimensionnement*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1.
- [Meyrand, 2009] MEYRAND, R. (2009). *Contribution à l'étude de l'usage du brouillard d'eau dans la lutte contre les incendies en tunnels ventilés longitudinalement*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers.
- [Modest, 1993] MODEST, M. (1993). *Radiative heat transfer*. Mechanical Engineering Series. Mc Graw-Hill International Editions.
- [Moissette, 2001] MOISSETTE, S. (2001). *Etude dynamique et thermique par la modélisation eulérienne-lagrangienne des effets liés aux interactions turbulence-particules dans un écoulement gaz-solide en conduite verticale non-isotherme*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, France.

- [Moissette *et al.*, 2001] MOISSETTE, S., OESTERLÉ, B. et BOULET, P. (2001). Temperature fluctuations of discrete particles in a homogeneous turbulent flow : a lagrangian model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22(3):220–226.
- [Mundo *et al.*, 1995] MUNDO, C., SOMMERFELD, M. et TROPEA, C. (1995). Droplet - wall collisions : experimental studies of the deformation and breakup process. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2):151–173.
- [Mundo *et al.*, 1997] MUNDO, C., TROPEA, C. et SOMMERFELD, M. (1997). Numerical and experimental investigation of spray characteristics in the vicinity of a rigid wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 15:228–237.
- [Murrell *et al.*, 1995] MURRELL, J., CROWHURST, D. et ROCK, P. (1995). Experimental study of the thermal radiation attenuation of sprays from selected hydraulic nozzles. *In Halon Options Technical Working Conference - Albuquerque - USA*, pages 369–378.
- [Nmira, 2007] NMIRA, F. (2007). *Modélisation et simulation numérique de l'interaction entre un feu et un brouillard d'eau*. Thèse de doctorat, Université de Provence - Marseille.
- [Nmira *et al.*, 2009] NMIRA, F., CONSALVI, J., KAISS, A., FERNANDEZ-PELLO, A. et PORTERIE, B. (2009). A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 44:198–211.
- [Nmira *et al.*, 2008] NMIRA, F., KAISS, A., CONSALVI, J. et PORTERIE, B. (2008). Predicting fire suppression efficiency using polydisperse water sprays. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 53:132–156.
- [Parent *et al.*, 2009] PARENT, G., ACEM, Z., LECHÊNE, S. et BOULET, P. (2009). Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(3):555–562.
- [Parent *et al.*, 2006] PARENT, G., BOULET, P., GAUTHIER, S., BLAISE, J. et COLLIN, A. (2006). Experimental investigation of radiation transmission through a water spray. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 97(1):126–141.
- [Patankar, 1980] PATANKAR, S. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation.
- [Ponticq, 2008] PONTICQ, X. (2008). *Etudes sur les systèmes fixes d'aspersion d'eau en tunnel*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I.
- [Prétrel, 1997] PRÉTREL, H. (1997). *Etude du comportement thermodynamique de pulvérisations liquides sous l'effet du rayonnement infrarouge. Application à la protection incendie par rideau d'eau*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [Pétrissans, 2001] PÉTRISSANS, A. (2001). *Sur les modèles stochastiques lagrangiens de suivi de particules dans un champ turbulent et leur application en écoulement gaz-solide confinés*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, France.
- [Ravigururajan et Beltran, 1989] RAVIGURURAJAN, T. et BELTRAN, M. (1989). A model for attenuation of fire radiation through water droplets. *Fire Safety Journal*, 15:171–181.
- [Rein, 1993] REIN, M. (1993). Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces. *Fluid Dynamics Research*, 12(2):61–93.
- [Rüger *et al.*, 2000] RÜGER, M., HOHMANN, S., SOMMERFELD, M. et KOHNEN, G. (2000). Euler/lagrange calculations of turbulent sprays : the effect of droplet collisions and coalescence. *Atomization Sprays*, 10:47–81.

- 
- [Rioboo *et al.*, 2001] RIOBOO, R., TROPEA, C. et MARENGO, M. (2001). Outcomes from a drop impact on solid surfaces. *Atomization and Sprays*, 11(2):155–165.
- [Roisman et Tropea, 2005] ROISMAN, I. et TROPEA, C. (2005). Fluctuating flow in a liquid layer and secondary spray created by an impacting spray. *International Journal of Multiphase Flow*, 31:179–200.
- [Saint-Georges, 1993] SAINT-GEORGES, M. (1993). *Etude hydrodynamique des pulvérisations liquides pour applications aux rideaux d'eau*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1.
- [Sikalo *et al.*, 2002] SIKALO, S., MARENGO, M., TROPEA, C. et GANIC, E. (2002). Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 25:503–510.
- [Sirignano, 1999] SIRIGNANO, W. (1999). Fluid dynamics and transport of droplets and sprays. *The Press Syndicate of the University of Cambridge, cambridge university press edition*, pages ISSN : 0-582-21884-5.
- [Sommerfeld, 1997] SOMMERFELD, M. (1997). Analysis of isothermal and evaporating turbulent sprays by phase droplet anemometry and numerical calculations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 19(2):173–186.
- [Soufiani et Taine, 1997] SOUFIANI, A. et TAINE, J. (1997). High temperature gas radiative property parameters of statistical narrow-band model for  $h_2o$ ,  $co_2$  and  $co$ , and correlated-k model for  $h_2o$  and  $co_2$ . *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(4):987–991.
- [Stanton et Rutland, 1996] STANTON, D. et RUTLAND, C. (1996). Modelling fuel film formation and wall interaction in diesel engines. *SAE Paper 960628*.
- [Tadahisa, 2002] TADAHISA, J. (2002). Chapter 4 : Visibility and human behaviour in fire smoke. *SFPE Handbook of fire protection engineering*, Third Edition:2-42 : 2–53.
- [Versteeg et Malalasekera, 1998] VERSTEEG, H. et MALALASEKERA, W. (1998). *An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method*. Pearson Education Limited. ISSN : 0-582-21884-5.
- [Wang et Stock, 1993] WANG, L. et STOCK, D. (1993). Dispersion of heavy particles by turbulent motion. *Journal of the Atmospheric Science*, 50:1897–1913.
- [Weiss, 2005] WEISS, C. (2005). The liquid deposition fraction of sprays impinging vertical walls and flowing films. *International Journal of Multiphase Flow*, 31:115–140.
- [Wong et Mengüç, 2002] WONG, S. et MENGÜÇ, M. (2002). Comparison of monte-carlo techniques to predict the propagation of a collimated beam in participating media. *Numerical heat transfer, Part B*, 42(2):119–140.
- [Zimmer, 2001] ZIMMER, L. (2001). *Etude numérique et expérimentale de la turbulence en écoulement gaz - gouttelettes. Applications aux rideaux d'eau en présence de vent latéral*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy I, France.