

Rayonnement dans les brouillards d'eau Influence des conditions d'injection

Sullivan Lechêne, Gilles Parent, Anthony Collin, Pascal Boulet

LEMTA

Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée
Equipe Transfert Radiatif

Faculté des Sciences et Techniques
Nancy - Université

Nancy-Université



Journées d'Etude en Rayonnement Thermique
5-6 Février 2009



Sommaire

- 1 Les rideaux d'eau : de la théorie aux applications
- 2 Modélisation d'un spray
- 3 Modélisation des transferts radiatifs à travers le spray
- 4 Résultats numériques
- 5 Bilan - Perspectives

Généralités sur les rideaux d'eau

Définition

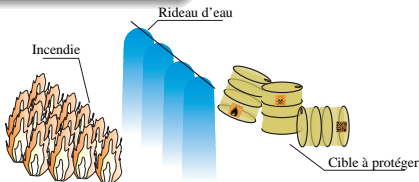
Pulvérisations de très fines particules d'eau dispersées dans l'air

But

Limiter la propagation du rayonnement
Protéger des biens ou des personnes

Fonctionnement

Effet combiné d'absorption et de diffusion du rayonnement par les gouttelettes



Applications actuelles



Problèmes

Techniques essentiellement empiriques

Besoins d'optimisation



Critères d'optimisation

Niveau d'atténuation

Consommation d'eau

Objectifs

Comparer numériquement et expérimentalement différentes stratégies de pulvérisations

- Direction d'injection des gouttes
 - Configuration descendante
 - Configuration ascendante
 - Configuration horizontale
 - Configuration à 45° ...
- Géométrie de la pulvérisation
 - Spray plat, spray hémisphérique, cône plein, cône creux ...
 - Utilisation en spray impactant
 - Utilisation en rampes (plusieurs buses d'injection)

Paramètres essentiels

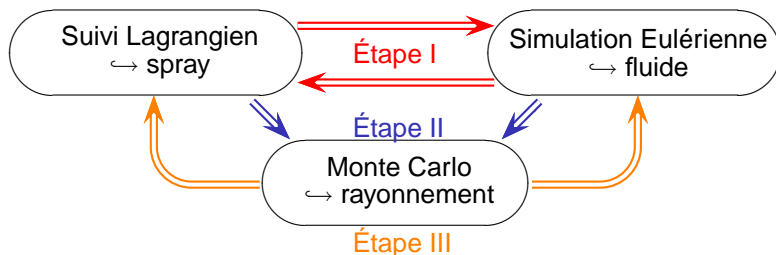
- Niveau d'atténuation
- Fraction volumique en gouttes
- Diamètre des gouttes

Schéma de principe de la simulation

Couplage de trois codes de calculs

Ecoulement diphasique où l'air est entraîné par la chute des gouttelettes d'eau (couplage eulérien-lagrangien)

Transferts thermiques dans le brouillard d'eau (méthode de Monte-Carlo pour le rayonnement)



Suivi lagrangien et simulation eulérienne

Suivi lagrangien des gouttes

- Equations utilisées pour le suivi :
 - Equation de la trajectoire
 - Principe fondamental de la dynamique (forces de traînée et gravité)
 - Equation de la chaleur
 - Bilan de masse
- Prise en compte des effets de convection et évaporation et de la dispersion turbulente

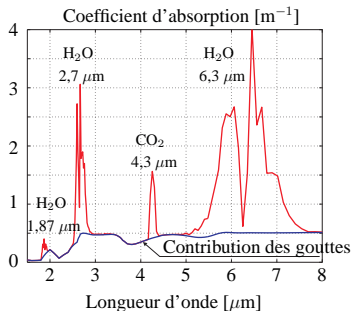
Simulation eulérienne de l'air entraîné

- Equations de bilan sur la masse, la quantité de mouvement, l'énergie et l'humidité
- Modèle de turbulence de type $k-\epsilon$
- Résolution par la méthode des volumes finis

Propriétés radiatives

Détermination

- Théorie de Mie pour les gouttes : absorption, diffusion (fortement anisotrope suivant la direction d'incidence) et fonction de phase (cumulée)
- Modèle G-k pour les gaz H_2O et CO_2 (coefficient d'absorption)
- Additivité simple des coefficients d'absorption des deux phases



$$\kappa = \kappa_{gaz} + \sum_{i=1}^{N_{classes}} \kappa_i$$

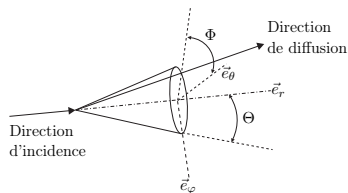
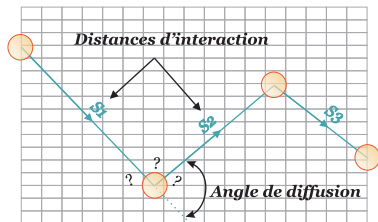
Méthode de Monte-Carlo

- Quantum défini par une quantité d'énergie, une direction de propagation (choix aléatoire) :

$$\omega_0 = 2 \pi R_\omega \quad \text{et} \quad \cos^2 \delta_0 = R_\delta \quad \text{où} \quad R_i \in]0; 1]$$

- Distance d'interaction S_σ : $R_\sigma = \exp\left(-\int_0^{S_\sigma} \sigma ds\right)$
- Nouvelle direction de propagation choisie à partir de :

$$R_\Theta = \frac{1}{2} \int_0^\Theta P(\theta) \sin \theta d\theta \quad \text{et} \quad \Phi = 2\pi R_\Phi$$



Convergence numérique du code radiatif

Moyens numériques

- Utilisation d'un cluster 16 noeuds (processeurs 3,2 GHz munis de 2 Go de RAM)
- Temps de simulation de quelques heures à une journée en moyenne

Critère de convergence

- Basé sur la variance et l'écart-type

$$\text{Var}(\phi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i^2 - \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i \right]^2$$

$$\sigma(\phi) = \sqrt{\text{Var}(\phi)}$$

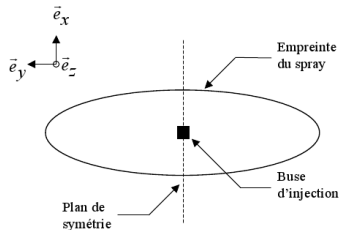
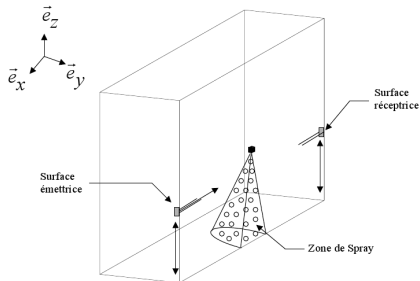
- Valeur

$$\frac{\sigma(\phi)}{\bar{\phi}} \leq 0,5\%$$

Description des cas étudiés (1/2)

Plusieurs stratégies de pulvérisations en spray seul

- Configuration descendante
- Configuration ascendante
- Schéma de principe en injection descendante :



Description des cas étudiés (2/2)

Caractéristiques du spray : tuyère 4000 67 à 2,6 bars

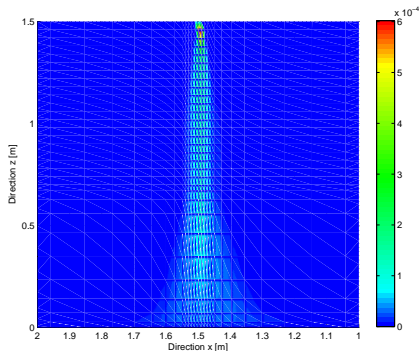
- Débit : $0,25 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$
- Polydispersion avec 20 classes de gouttes
- Granulométrie définie par une loi Log-normale avec $D_{ln} = 110 \mu\text{m}$ et $\delta_{ln} = 0,4$
- Injection elliptique ($17,4^\circ$ et $40,4^\circ$)
- Données mesurées expérimentalement

Caractéristiques radiatives

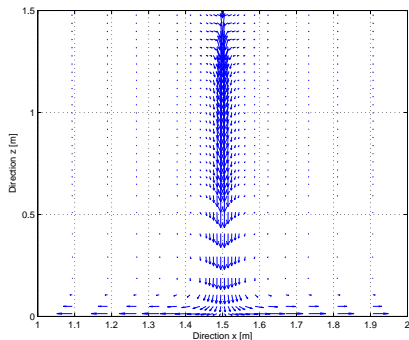
- Rayonnement en milieu absorbant, diffusant et non gris
- Panneau radiant ou surface ponctuelle de type corps noir à 1000K

Dynamique du spray

● Coupe dans le plan central du spray



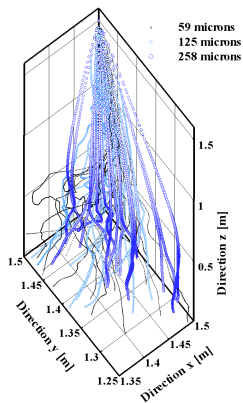
Fraction volumique [m^3 d'eau /
 m^3 d'air]



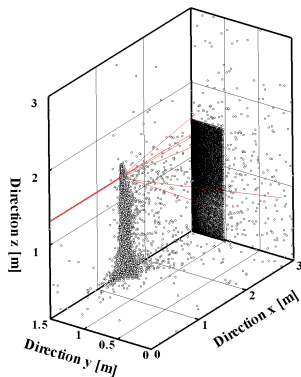
Vitesse de l'air entraîné

Visualisations du spray

● Trajectoires



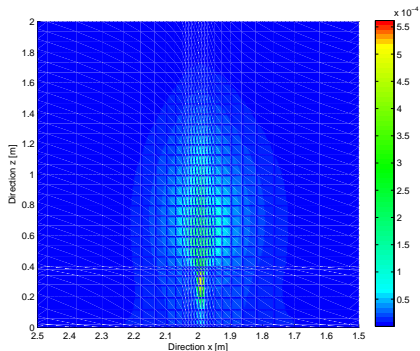
Gouttes (59-125-258 microns)



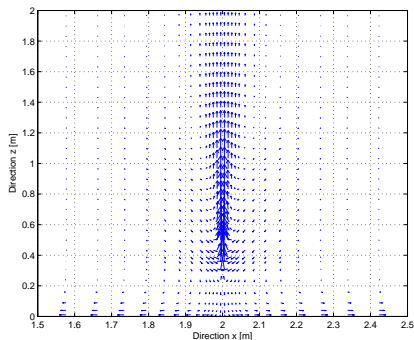
Quantas ($\lambda = 2 \mu\text{m}$)

Dynamique du spray

● Coupe dans le plan central du spray



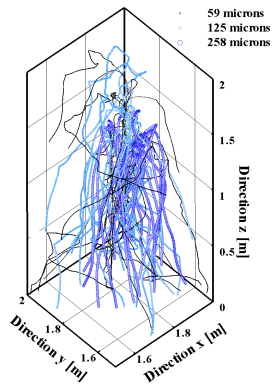
Fraction volumique [m^3 d'eau /
 m^3 d'air]



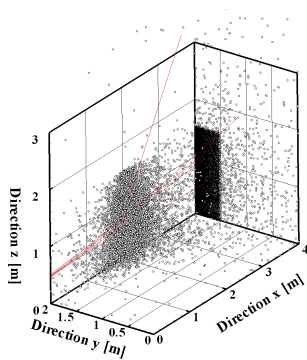
Vitesse de l'air entraîné

Visualisation du spray

● Trajectoires



Gouttes (59-125-258 microns)



Quantas ($\lambda = 2 \mu\text{m}$)

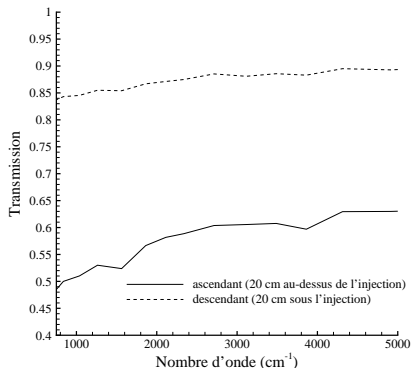
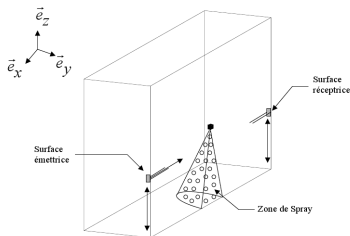
Transmission et atténuation spectrale

- Transmission :

$$T_r = \frac{\text{Flux spectral avec spray}}{\text{Flux spectral sans spray}}$$

- Atténuation :

$$A_t = 1 - T_r$$



Explications par le temps de séjour des gouttes

Descendant

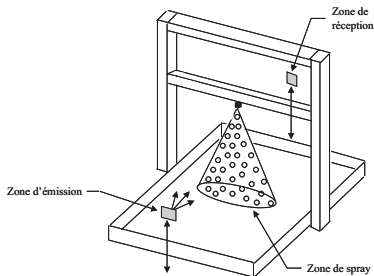
- Gouttes de diamètre $59 \mu\text{m}$: 1,2 s (1 % de gouttes évaporées)
- Gouttes de diamètre $125 \mu\text{m}$: 0,7 s (pas d'évaporation)
- Gouttes de diamètre $258 \mu\text{m}$: 0,6 s (pas d'évaporation)

Ascendant

- Gouttes de diamètre $59 \mu\text{m}$: 5,5 s (53 % de gouttes évaporées)
- Gouttes de diamètre $125 \mu\text{m}$: 3,1 s (pas d'évaporation)
- Gouttes de diamètre $258 \mu\text{m}$: 1,7 s (pas d'évaporation)

Validation expérimentale

● Schéma du dispositif expérimental



- Source de rayonnement infrarouge : infraline de dimensions 6,5*19,5cm chauffée à 1000 K
- Un spectromètre FTIR (Matrix par Brüker) incluant un double détecteur MCT-InSb analyse le faisceau incident
- Une caméra infrarouge aide à l'alignement du spectromètre et de la source émettrice + données d'atténuation complémentaires

En résumé...

Résultats

- Accord entre la dynamique du spray et les transmissions spectrales obtenues
- Plus grande capacité du spray ascendant à atténuer le rayonnement infrarouge

Perspectives

- Etude de la granulométrie des buses expérimentales
- Approfondir l'étude spray ascendant - spray descendant
- Etude de rampes descendantes et ascendantes
- Etude du spray impactant