



**HAL**  
open science

# Modèle eulérien et impact de paramètres physiques sur le refroidissement évaporatif d'un spray de gouttelettes d'eau

F. Raoult, Stéphanie O.L. Lacour, F. Trinquet, L. Fournaison, Anthony Delahaye

► **To cite this version:**

F. Raoult, Stéphanie O.L. Lacour, F. Trinquet, L. Fournaison, Anthony Delahaye. Modèle eulérien et impact de paramètres physiques sur le refroidissement évaporatif d'un spray de gouttelettes d'eau. 13ème colloque inter-universitaire Franco-Québécois sur la thermique des systèmes, May 2017, Saint-Lô, France. 6 p. hal-01734800

**HAL Id: hal-01734800**

**<https://hal.science/hal-01734800>**

Submitted on 15 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.

# MODÈLE EULÉRIEN ET IMPACT DE PARAMÈTRES PHYSIQUES SUR LE REFROIDISSEMENT ÉVAPORATIF D'UN SPRAY DE GOUTTELETTES D'EAU

Fabien **RAOULT**<sup>a,\*</sup>, Stéphanie **LACOUR**<sup>a</sup>, François **TRINQUET**<sup>a</sup>, Laurence **FOURNAISON**<sup>a</sup>,  
Anthony **DELAHAYE**<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Irstea, GPAN, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes, Antony 92160, France*

---

## RÉSUMÉ

L'utilisation d'un spray de fines gouttelettes d'eau permet de refroidir l'air grâce à l'évaporation des gouttelettes d'eau. L'étude de ce mélange diphasique est assez complexe en raison des nombreux paramètres influençant le système (vitesse, température, humidité, caractéristiques des gouttes,...) ainsi que de nombreux phénomènes physiques présents (évaporation, dispersion, sédimentation, collision, dépôt,...). Cet article présente le développement d'un modèle eulérien simulant l'injection de gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air. Ce modèle repose sur la description de trois variables transportées : la température potentielle liquide, le contenu spécifique en eau totale, et la concentration en nombre de gouttelettes. L'évaporation et la nucléation des gouttes sont modélisées, puis couplés à un modèle de dispersion de type gaussien. Les résultats numériques sont comparés à des mesures expérimentales. De bonnes similitudes sont observées sur le refroidissement de la température de l'air. Une analyse paramétrique est également réalisée afin de déterminer l'influence de certains paramètres (humidité relative, débit d'eau injecté, et rayon médian de la distribution en taille de goutte).

**Mots Clés :** *Brumisation, Spray, froid évaporatif, modèle eulérien, évaporation, dispersion*

---

## NOMENCLATURE

### Symboles :

a	rayon des couches du spray, m
D	coefficient de diffusion, m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
d	diamètre, m
C <sub>p</sub>	capacité calorifique massique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
HR	humidité relative, %
k	conductivité thermique, J.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
L	longueur caractéristique, m
L <sub>évap</sub>	chaleur latente massique d'évaporation de l'eau, J.kg <sup>-1</sup>
ṁ	débit, L.h <sup>-1</sup>
N <sub>c</sub>	concentration en nombre de gouttelettes, m <sup>-3</sup>
n	densité de concentration en nombre, μm <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup>
p	pression partielle, Pa
q	humidité spécifique, kg <sub>eau</sub> .kg <sub>mél</sub> <sup>-1</sup>
R	constante des gaz, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
r	rayon, m
t	temps, s
T	température, K
u	vitesse, m.s <sup>-1</sup>
V	volume des couches du spray, m <sup>3</sup>

### Lettres grecques :

θ <sub>L</sub>	température potentielle liquide, K
ρ	masse volumique, kg.m <sup>-3</sup>
σ <sub>c</sub>	écart type logarithmique de la distribution, SI

### Indices / Exposants :

0	référence
a	air ambiant
crit	critique
Évap	évaporation
Disp	dispersion
i	numéro de la couche du spray
L	eau liquide
méd	médiane de la distribution
moy	moyenne de la distribution
Nuc	nucléation
sat	saturation
spray	spray
v	vapeur d'eau
w	eau total (vapeur+liquide)

---

\* auteur correspondant

Adresse électronique : [fabien.raoult@irsta.fr](mailto:fabien.raoult@irsta.fr)

## 1. INTRODUCTION

La brumisation est une technique consistant à produire et disperser de fines gouttelettes d'eau dans l'air à l'aide de buses d'injection (également appelées atomiseurs). Cette technologie est utilisée dans de nombreuses applications telles que dans le domaine alimentaire pour conserver la teneur en eau de certaines denrées alimentaires, ou dans l'industrie manufacturière pour nettoyer ou dégraisser des pièces industrielles. Les sprays de gouttes d'eau sont aussi utilisés sous formes de rideaux d'eau pour limiter la progression d'incendies ou de poussières.

La brumisation de gouttelettes d'eau est également utilisée pour améliorer la capacité de refroidissement de l'air qui est un médian thermique assez limité. D'une part, lorsque des gouttes d'eau sont injectées dans l'air, elles s'évaporent en emmagasinant de l'énergie provenant de l'air. Il s'agit d'un refroidissement adiabatique. D'autre part, lorsque les gouttelettes d'eau impactent une surface chauffée, une fine couche d'eau se forme sur cette surface et le coefficient de transfert de chaleur s'en retrouve amélioré. Il s'agit d'un refroidissement par aspersion qui intensifie les échanges thermiques.

La montée en puissance des ordinateurs de calcul, permet de réaliser grâce à la CFD (Computational Fluid Dynamics) des études d'écoulements complexes comme les écoulements avec des gouttelettes d'eau. L'influence de certains paramètres sur le refroidissement a ainsi pu être étudiée. Tissot montre par exemple dans [1] que l'injection de petites gouttelettes ( $<50\mu\text{m}$ ) en contre-courant augmente la surface d'échange entre l'air et les gouttes d'eau. La capacité de refroidissement du spray est ainsi augmentée. Ces résultats rejoignent ceux de Montazeri et al. En effet, dans [2], ils montrent que l'utilisation de petites gouttelettes avec une distribution en taille de goutte étendue permet également d'améliorer les performances de refroidissement. Ils montrent aussi que le refroidissement de l'air est plus important pour des températures ambiantes élevées et des humidités relatives faibles. Alkhedhair et al. dans [3] et Chahine et al. dans [4] ont, eux, étudiés l'influence de la vitesse de l'écoulement d'air. Ils ont remarqué que plus la vitesse de l'air est grande et plus la performance de refroidissement diminue.

Dans la majorité des cas [1-3], l'approche Lagrangienne-Eulérienne est utilisée et permet d'avoir accès à la trajectoire des particules. Mais elle nécessite par conséquent le lancement de plusieurs particules pour obtenir des valeurs statistiques fiables. De plus, le couplage entre la phase dispersée et la phase porteuse nécessite une approche itérative. Pour des études avec des géométries d'écoulement plus complexes (par exemple à l'intérieur d'un échangeur), l'approche lagrangienne nécessite alors un nombre très important de lancements de particules pour déterminer des flux

liquides aux parois. Le coût de calcul est alors très élevé.

L'approche Eulérienne-Eulérienne est, elle, moins utilisée [4-5]. Mais elle présente certains avantages par rapport à l'approche lagrangienne. Par exemple, dans [5], Bouzereau et al. considèrent les gouttelettes d'eau comme une phase dispersée. Le changement de phase de l'eau est alors représenté par des lois thermodynamiques et microphysiques agissant comme terme source/puits dans l'équation de transport. Cette approche permet de suivre la trajectoire du nuage de particules, mais elle ne permet pas d'obtenir la trajectoire de chaque particule. De plus, les phases porteuse et dispersée sont résolues simultanément. Les temps de calcul d'une approche eulérienne sont par conséquent moins lourds. Elle est donc mieux adaptée pour des écoulements en topographie complexe.

Cet article présente le développement d'un modèle Eulérien-Eulérien pour décrire le refroidissement d'un écoulement d'air dans lequel on injecte des gouttes d'eau. Basé sur le modèle d'un panache d'aéroréfrigérant, le modèle a été adapté à des cinétiques d'évaporation rapides rencontrées dans le refroidissement d'échangeurs. Il est présenté dans la partie deux. Dans la troisième partie, on simule l'injection d'eau dans une veine d'essai en reproduisant une expérience présentée dans [6], et, les paramètres de simulation sont présentés. La quatrième partie de cet article concerne tout d'abord la comparaison des températures obtenues numériquement à celles obtenues expérimentalement. Puis une analyse paramétrique est effectuée afin de déterminer l'influence de certains paramètres sur l'efficacité de refroidissement.

## 2. PRÉSENTATION MODÈLE EULÉRIEN

Le modèle eulérien est basé sur un modèle de dispersion de panaches d'aéroréfrigérants [7]. Le modèle proposé représente uniquement les phénomènes d'évaporation, de nucléation et de dispersion d'un nuage de gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air. Ce modèle repose sur trois variables transportées : la température potentielle liquide,  $\theta_L$ , le contenu spécifique en eau totale,  $q_w$ , et la concentration en nombre de gouttelettes,  $N_c$ .

La température potentielle liquide,  $\theta_L$ , correspond à la température qu'aurait une particule d'air ramenée adiabatiquement à la pression de référence, ( $p_0=10^5\text{Pa}$ ), après évaporation de toute l'eau liquide qu'elle contient. Cette variable est donc conservative pour l'évaporation, et sa formulation est la suivante :

$$\theta_L = T_a \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\left( \frac{R_a}{c_p a} \right)} \cdot \left( 1 - \frac{L_{\text{évap}} q_L}{c_p a T_a} \right) \quad (1)$$

Le contenu spécifique en eau totale,  $q_w$ , correspond à la somme du contenu spécifique en vapeur d'eau,  $q_v$ , et du contenu spécifique en eau liquide,  $q_L$ . Cette quantité est transportée et diffusée par l'écoulement d'air. Elle est également conservative pour l'évaporation.

$N_c$ , correspond au nombre de gouttelettes par unité de volume. Afin de décrire les spectres de gouttelettes, on fait l'hypothèse que la concentration en nombre de goutte suit une loi de distribution lognormale pour la taille:

$$n(r) = \frac{N_c}{\sigma_c \sqrt{2\pi r}} \exp\left(\frac{-1}{2\sigma_c^2} \left(\ln \frac{r}{r_{méd}}\right)^2\right) \quad (2)$$

Où  $r_{méd}$  est la médiane de la distribution et  $\sigma_c$  est l'écart type logarithmique. Le modèle d'évolution des gouttes par évaporation/nucléation, décrit ci-dessous, est couplé à un modèle de dispersion de type gaussien décrit ensuite [8]. L'équation de transport diffusion est la suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{2} \left( -u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{D_v}{\rho} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)_{Disp} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right)_{Évap/Nuc} \quad (3)$$

Avec :  $c$  une des trois variables transportées. Le couplage de la dispersion avec l'évaporation /nucléation a ensuite été réalisé en prenant en compte le phénomène de dispersion sur la première moitié du pas de temps, tandis que sur la seconde moitié du pas de temps, l'évaporation ou la nucléation des gouttelettes d'eau est résolue.

### 2.1. Modélisation de l'évaporation/nucléation

La température potentielle liquide,  $\theta_L$ , et la teneur en eau totale,  $q_w$ , étant conservatives pour l'évaporation, leur variation est nulle en l'absence du phénomène de dispersion. Seule la concentration en nombre goutte,  $N_c$ , possède des termes sources pour l'évaporation et la nucléation:

$$\frac{\partial N_c}{\partial t} = \left( \frac{\partial N_c}{\partial t} \right)_{Évap} + \left( \frac{\partial N_c}{\partial t} \right)_{Nuc} \quad (4)$$

Lorsque l'air est saturé en vapeur d'eau, le terme dû à l'évaporation disparaît et inversement, si l'air est sous-saturé, le terme de nucléation disparaît dans l'équation (4). La nucléation n'est possible qu'en présence d'un air saturé.

La modélisation du terme de nucléation a été repris de [7]. En revanche, la modélisation de l'évaporation, est modifiée. Dans [7], l'évaporation est traitée en évaporant uniquement les gouttes de petites tailles. En effet, une taille critique de goutte,  $r_{crit}$ , en-dessous de laquelle les gouttes s'évaporent totalement est calculée. Ce  $r_{crit}$  est défini à partir de l'équation de la décroissance d'une goutte développée dans [9] et reprise dans [7]:

$$r \frac{dr}{dt} = A_3 \cdot s \quad (5)$$

Avec  $r$  est le rayon des gouttelettes et  $A_3$  et  $s$  sont définis par :

$$A_3 = \left[ \frac{\rho_L R_v T_a}{p_{v sat} D_v} + \frac{L_{évap} \rho_L}{k_a T_a} \left( \frac{L_{évap}}{T_a R_v} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

$$s = \frac{p_v}{p_{v sat}} - 1 \quad (7)$$

L'équation (5) est ensuite intégrée sur un temps  $\Delta t$  :

$$\int_{r_{crit}}^0 r dr = A_3 \cdot s \cdot \int_t^{t+\Delta t} dt' \quad (8)$$

La formule du rayon critique est la suivante :

$$r_{crit} = \sqrt{-2A_3 \cdot s \cdot \Delta t} \quad (9)$$

Où  $s$  est négatif, et  $\Delta t$  est le pas de temps. Pour des panaches d'aéroréfrigérant, ce  $\Delta t$  est très grand compte tenu des dimensions du domaine et des cinétiques d'évaporation très lentes. Mais le processus d'évaporation pour un spray de gouttelettes est plus rapide. L'équation (9) ne peut donc pas être reprise dans notre cas. En intégrant l'équation (5), sur un pas de temps,  $dt$ , plus petit, l'équation est la suivante :

$$\int_{r(t)}^{r(t+dt)} r' dr' = A_3 \cdot s \cdot \int_t^{t+dt} dt' \quad (10)$$

La nouvelle approche consiste à diminuer le diamètre des gouttes en recalculant à chaque pas de temps numérique,  $dt$ , le rayon médian de la distribution:

$$r_{méd}(t + dt) = \sqrt{(r_{méd}(t))^2 + 2A_3 \cdot s \cdot dt} \quad (11)$$

La concentration en nombre de gouttes totale correspond alors à l'intégrale de  $n(r)$  sur les classes de taille, et est recalculée à partir de  $r_{méd}(t+dt)$  et du  $\sigma_c$  qu'on suppose constant.  $N_c(t+dt)$  s'écrit alors :

$$N_c(t + dt) = \int_0^{+\infty} n(r) \cdot dr \quad (12)$$

### 2.2. Modélisation de la dispersion

La modélisation de la dispersion des gouttelettes d'eau dans l'air est basée sur les équations présentées par Kraabol et al. dans [8]. Le modèle reprend les approximations Gaussiennes développées dans [10,11] qui décrivent le transport et la diffusion de substances passives dans un écoulement d'air. Pour un spray de gouttelettes symétrique, l'approximation gaussienne se simplifie et s'écrit :

$$d_{spray}^2(t + dt) = 2D_v \cdot dt + d_{spray}^2(t) \quad (13)$$

Le spray est divisé en huit couches cylindriques dont leur rayon et leur volume sont calculés selon les relations suivantes :

$$a_i(t + dt) = \frac{i}{8} d_{spray}(t + dt) \quad (14)$$

$$V_i(t + dt) = \pi L [a_i(t + dt)^2 - a_{i-1}(t + dt)^2] \quad (15)$$

Avec :  $i$  le numéro de la couche,  $L$  la longueur caractéristique correspondant à la longueur parcourue par le spray sur un pas de temps  $dt$ , et  $a_0=0$ .

Lorsque le spray se disperse, chaque couche cylindrique du spray s'agrandit. Elle est recalculée sur chaque pas de temps. De l'air ambiant est ainsi mélangé au spray sur la couche externe, tandis que les couches internes se mélangent. Les variables transportées ( $\theta_L$ ,  $q_w$ ,  $N_c$ ) sont recalculées par pondération volumique :

$$c_i(t + \Delta t) = \frac{c_i(t) \cdot [a_i^2(t) - a_{i-1}^2(t + \Delta t)] + c_{i+1}(t) \cdot [a_{i+1}^2(t + \Delta t) - a_i^2(t)]}{a_i^2(t + \Delta t) - a_{i-1}^2(t + \Delta t)} \quad (16)$$

Avec  $c_i$  une des trois variables transportées pour la couche  $i$ . A noter que  $c_0$  correspond à la valeur dans le milieu ambiant.

### 3. Simulations

Dans cette partie, la simulation de l'injection d'eau dans une veine d'essai est tout d'abord présentée. Puis, les différents paramètres de simulations sont décrits.

#### 3.1. Simulation de l'injection

Lorsqu'une quantité d'eau est atomisée dans un écoulement d'air, il existe près de la buse deux régions. La première correspond à la partie entre la sortie des gouttes de la buse et le moment où le spray commence à se disperser. Durant cette période, l'élargissement du spray est assez faible. La deuxième région correspond à l'expansion du spray jusqu'à ce que la vitesse des gouttes atteigne celle de l'écoulement d'air. Cette expansion est linéaire avec le temps. Cette diminution de la vitesse des gouttes est principalement due aux frottements de l'air sur les gouttes.

Avec le modèle de Kraabol, il faut représenter la source de gouttelettes lorsque celles-ci atteignent la vitesse de l'air. La détermination de cette position est assez complexe puisqu'elle dépend de la buse d'injection (angle, diamètre de la buse, pression d'injection,...). Elle est généralement obtenue de manière expérimentale, à partir de mesures de caractérisation de la buse permettant de déterminer la décroissance des vitesses des gouttes ainsi que l'angle du cône d'injection. Ces grandeurs permettent de déterminer le diamètre initial,  $d_{spray_i}$ , et la position,  $x_s$ , telle que  $u_{goutte}=u_a$  (tableau 1). Dans la zone de formation du spray, on néglige l'évaporation.

Tableau 1: Paramètres d'entrée du modèle

$u_a$ (m/s)	$T_a$ (K)	HR (%)	$\dot{m}_L$ (L/h)	$r_{méd}$ ( $\mu$ m)	$\sigma_c$ (UI)	$d_{spray_i}$ (m)	$x_s$ (cm)	$D_v$ ( $m^2/s$ )
1	298.2	35	1.4	7.6	0.6	0.17	40	0.2

#### 3.2. Paramètres de simulation

Le modèle développé permet notamment d'observer l'influence de l'injection de gouttes d'eau sur les paramètres thermophysiques de l'air. Le modèle nécessite plusieurs paramètres d'entrée qui sont résumés dans le tableau 1. Les valeurs indiquées dans ce tableau correspondent aux conditions expérimentales. Les paramètres de la distribution lognormale ( $r_{méd}$  et  $\sigma_c$ ) ont été déterminés en se basant sur la distribution en taille de gouttes dans [6].

A partir de ces paramètres, la concentration en nombre de goutte à l'état initial,  $N_{c_{init}}$ , peut être obtenues :

$$N_{c_{init}} = q_{L_{init}} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_L \cdot \frac{4}{3} \pi r_{moy}^3} \quad (17)$$

Avec :

$$q_{L_{init}} = \frac{4\dot{m}_L}{3600\pi \rho_a \cdot u_a \cdot d_{spray_i}^2} \quad (18)$$

Les trois équations de conservations sont résolues en fonction du temps, et un certain nombre de grandeurs en sont déduites. L'écoulement étant supposé uniforme, il est alors possible de déterminer l'évolution de ces paramètres en fonction de la position  $x=u_a \cdot t$ .

### 4. RÉSULTATS

Dans cette partie, les résultats du modèle eulérien sont tout d'abord comparés à des mesures expérimentales effectuées par Tissot dans une veine d'essai [6]. Puis une analyse paramétrique est ensuite effectuée sur l'humidité relative de l'air, le débit d'eau injecté et le rayon médian de la distribution.

#### 4.1. Compétition évaporation/dispersion

La figure 1 représente l'évolution de la température de l'air dans lequel des gouttelettes d'eau ont été injectées (en  $x=0$ m).

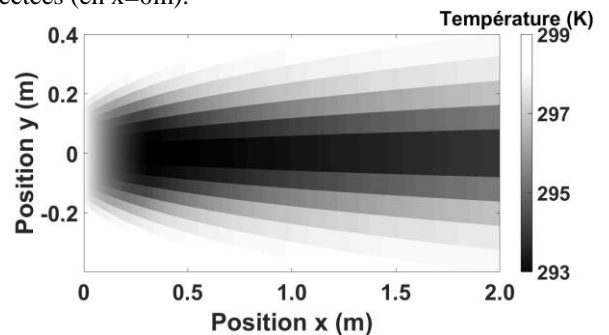


Figure 1: Évolution de la température de l'air en fonction de la position  $x$

Un gradient de température entre le centre et la périphérie du spray existe. La température de l'air est plus basse au centre du spray qu'en périphérie. En effet,

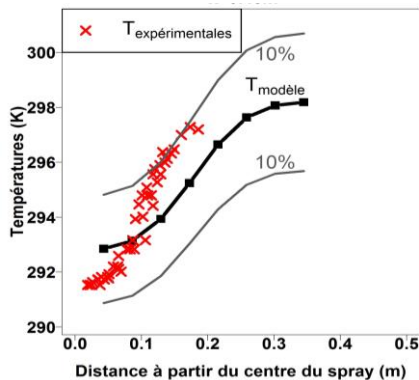


Figure 2.a:  $x=0.45m$

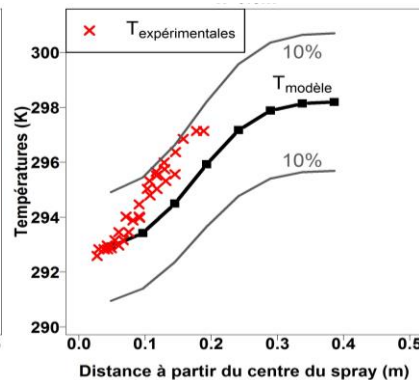


Figure 2.b:  $x=0.60m$

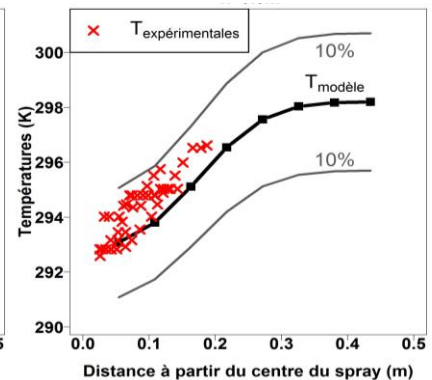


Figure 2.c:  $x=0.80m$

Figure 2: Comparaison des températures du modèle avec des températures mesurées expérimentalement

la dispersion du spray mélange les couches externes du spray avec de l'air ambiant. Les couches extérieures du spray se mélangeant en premier ont donc une température plus élevée. Le phénomène de dispersion (augmentation de la température) s'oppose donc à l'évaporation des gouttes d'eau (refroidissement de l'air).

#### 4.2. Comparaison des températures

Afin de valider le modèle eulérien développé, les températures de chaque couche obtenues ont été comparées aux mesures expérimentales de Tissot [6]. Trois positions en aval de l'injection des gouttelettes d'eau ont été étudiées :  $x=0.45m$ ,  $x=0.60m$ , et  $x=0.80m$ .

Les résultats de la figure 2, montrent que les températures des couches obtenues par le modèle eulérien, et les mesures sont assez proches. En effet, pour les trois positions les écarts restent inférieurs à 10%.

Les écarts de température peuvent être dus à des incertitudes de mesures expérimentales. Mais ces écarts sont également imputables aux hypothèses du modèle. En effet, l'hypothèse de la source fictive considérée pour la simulation de l'injection néglige l'évaporation des gouttes dans les deux régions proches de l'injection. De plus, l'hypothèse réalisée sur la symétrie du spray ne permet pas de prendre en considération le phénomène de sédimentation qui déforme le spray.

Les résultats obtenus de cette comparaison de températures restent très satisfaisants compte tenu de la simplicité du modèle mis en oeuvre.

#### 4.3. Analyse paramétrique

Les résultats du modèle eulérien développé étant validés, une analyse paramétrique a ensuite été effectuée sur certains paramètres d'entrée (tableau 1) : l'humidité relative de l'air ambiante (HR), le débit d'eau ( $\dot{m}_L$ ), et le rayon médian ( $r_{\text{méd}}$ ). Lorsqu'un paramètre d'entrée du modèle est modifié, les autres paramètres correspondent à ceux du cas de référence (valeurs du tableau 1).

La figure 3.a compare les températures de la 1<sup>ère</sup> couche pour cinq humidités d'air différentes. Pour une humidité de 70%, le refroidissement de l'air est tout d'abord rapide, puis est ralenti lorsque l'air se rapproche de sa saturation en vapeur d'eau. A 90% d'humidité, l'air étant trop proche de la saturation, très peu d'eau s'évapore. Entre 10% et 50% d'humidité, l'air est plus sec. La cinétique d'évaporation des gouttes d'eau est d'autant plus élevée, que la différence de teneur en vapeur d'eau dans l'air présent entre les gouttes est loin de la saturation. La remontée de la température observée pour 10%-50% peut être due à l'évaporation totale des gouttes ou à la prépondérance de la dispersion sur l'évaporation. A partir de ce point, l'humidité a très peu d'influence sur la température de l'air. Par exemple, à  $x=0.5m$ , les températures de la première couche sont très proches pour 30% et 50%.

La figure 3.b compare les températures de la 1<sup>ère</sup> couche pour cinq débits d'eau différents. Pour des débits allant de 1L/h à 3L/h, le refroidissement de l'air est d'autant plus important et rapide que la quantité d'eau injectée à évaporer est élevée. Puis, l'air remonte en température lorsque toute l'eau est évaporée ou lorsque, le refroidissement dû à l'évaporation n'est plus suffisant pour s'opposer au réchauffement de l'air dû à la dispersion. Mais lorsque que le débit injecté est trop élevé (4L/h et 5L/h), l'air se sature en vapeur d'eau. Par exemple, pour le débit de 4.0L/h, l'air devient saturé vers  $x=0.2m$ . L'évaporation des gouttes n'est donc plus possible. Puis, l'air non saturé des couches externes se mélange à l'air saturé, et l'évaporation des gouttes reprend. Mais l'air étant proche de son état de saturation, l'évaporation des gouttes est ralentie. En effet, à partir de  $x=0.3m$  la température de l'air est plus élevée pour 4L/h que pour 3L/h. Ainsi, il existe un débit d'eau optimal permettant de maximiser l'évaporation.

La figure 3.c compare les températures de la 1<sup>ère</sup> couche pour cinq tailles de gouttes différentes. La cinétique d'évaporation des gouttes est d'autant plus rapide et importante que la taille des gouttes est petite. En effet, pour une même quantité d'eau injectée, le nombre de gouttelettes est plus grand si  $r_{\text{méd}}$  est petit. La

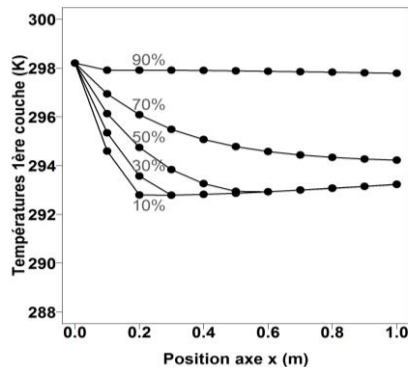


Figure 3.a: humidité relative(%)

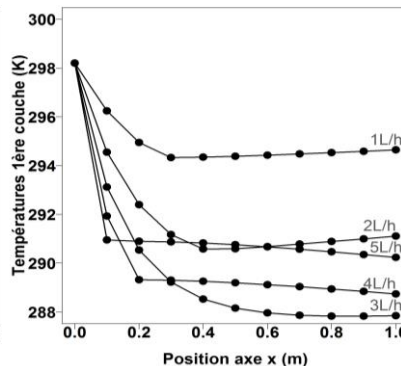


Figure 3.b: Débit d'eau

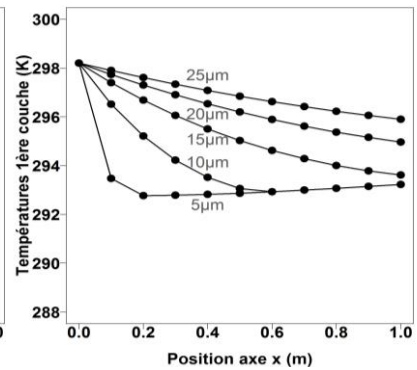


Figure 3.c: Rayon médian

Figure 3: Analyse paramétrique. Comparaison de la température de la 1ère couche pour: a. l'humidité relative (%), b. le débit d'eau injecté (L/h), c. le rayon médian de la distribution ( $\mu\text{m}$ )

surface d'échange entre l'air et les gouttelettes est par conséquent plus grande car elle varie en inverse du rayon médian. Pour les régions proches de l'injection, l'air est donc refroidi plus efficacement si  $r_{\text{méd}}$  des gouttes est petit. Le rayon médian n'a ensuite plus d'influence sur la température de l'air lorsque la dispersion prédomine sur l'évaporation.

## 5. CONCLUSION

Cet article présente la modélisation d'un spray à l'aide d'une approche eulérienne. Le modèle développé permet de représenter l'évaporation et la dispersion des gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air. L'approche adoptée consiste à utiliser trois variables transportées : la température potentielle liquide ( $\theta_L$ ), la teneur en eau totale ( $q_w$ ), et la concentration en nombre de gouttes ( $N_c$ ). Le spectre des gouttes est représenté par la loi de distribution lognormale. Afin de modéliser l'évaporation, le rayon médian de cette distribution est recalculé à chaque pas de temps selon l'équation de décroissance d'une goutte (équation (4)).

Les résultats du modèle eulérien ont ensuite été comparés à des mesures expérimentales réalisées par Tissot dans [6]. Les écarts de température entre les résultats sont assez faibles (en dessous de 10%). Ils sont principalement dus aux hypothèses réalisées dans le modèle (source fictive et symétrie du spray) et aux imprécisions liées aux mesures. Le modèle eulérien développé pourra donc être appliqué à des géométries d'écoulement plus complexes avec des effets pariétaux.

Une analyse de sensibilité a finalement été effectuée sur l'humidité relative de l'air (HR), le débit d'eau injecté ( $\dot{m}_L$ ), et le rayon médian de la distribution ( $r_{\text{méd}}$ ). On montre qu'un air sec, des gouttes de petites tailles, et une quantité d'eau injectée optimale permettent d'augmenter les performances de refroidissement de l'air. Ce modèle permet également de déterminer pour des temps de calcul courts et une précision suffisante, la distance à l'injection pour laquelle la température de l'air atteint sa valeur minimale.

## RÉFÉRENCES

- [1] TISSOT, J., BOULET, P., TRINQUET, F., FOURNAISON, L., et MACCHI-TEJEDA, H., Air cooling by evaporating droplets in the upward flow of a condenser, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50(11), pp. 2122-2131, (2011).
- [2] MONTAZERI, H., BLOCKEN, B., et HENSEN, J.L.,M., CFD analysis of the impact of physical parameters on evaporative cooling by a mist spray system, *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 608-622, (2015).
- [3] ALKHEDHAIR, A., GURGENCI, H., JAHN, I., GUAN, Z., et HE, S., Numerical simulation of water spray for pre-cooling of inlet air in natural draft dry cooling tower, *Applied Thermal Engineering*, vol. 61(2), pp. 416-424, (2013).
- [4] CHAHINE, A., MATHARAN, P., WENDUM, D., MUSSON GENON, L., BRESSON, R., et CARISSIMO, B., Modelling atmospheric effects on performance and plume dispersal from natural draft wet cooling towers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 136, pp. 151-164, (2015).
- [5] BOUZEREAU, E., MUSSON GENON, L., et CARISSIMO, B., Application of a semi-spectral cloud water parameterization to cooling tower plumes simulations, *Atmospheric Research*, vol. 90(1), pp. 78-90, (2008).
- [6] TISSOT, J., Amélioration des performances énergétiques et environnementales des systèmes frigorifiques au moyen de la brumisation des condenseurs à air, *PhD thesis, Université Henri Poincaré*, Nancy, France, (2011).
- [7] BOUZEREAU, E., Représentation des nuages chauds dans le modèle météorologique MERCURE : application aux panaches d'aéroréfrigérants et aux précipitations orographiques, *PhD thesis, Université Paris VI*, Paris, France, (2004).
- [8] KRAABOL, A.G., KONOPKA, P., STORDAL, F., et SCHLAGER, H., Modelling chemistry in aircraft plumes 1 : comparison with observations and evaluation of a layered approach, *Atmospheric Environment*, vol. 34(23), pp. 3939-3950, (2000).
- [9] PRUPPACHER, H.R., et KLETT, J.D., Microphysics of clouds and precipitation, *Atmospheric Sciences Library*, Kluwer Academic Publishers, (1997).
- [10] KONOPKA, P., Analytical Gaussian solutions for anisotropic diffusion in a linear shear flow, *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, vol. 20, pp. 78-91, (1995).
- [11] SCHUMANN, U., KONOPKA, P., BAUMANN, R., BUSEN, R., GERZ, T., SCHLAGER, H., SCHULTE, P., et VOLKERT, H., Estimation of diffusion parameters of aircraft exhaust plumes near the tropopause from nitric oxide and turbulence measurements, *Journal of Geophysical Research*, vol. 100, pp. 14147-14162, (1995).