COLLECTE DES AEROSOLS PAR LES GOUTTES : IMPACT DU PHENOMENE DE CAPTURE ARRIERE EN REGIME LAMINAIRE STATIONNAIRE

E. Belut[1]

[1]INRS, 1 rue du Morvan, F-54500 Vandoeuvre, France
*Courriel de l'orateur : emmanuel.belut@inrs.fr

TITLE

Aerosol scavenging by drops: impact of rear capture in case of steady laminar wake

RESUME

Dans de nombreux procédés ou phénomènes physiques naturels, des gouttes d'eau en chute libre dans l'air collectent les particules d'aérosol en suspension. Nous étudions dans cet article, à l'aide de simulations numériques à l'échelle de la goutte, l'impact exact du phénomène de capture arrière, dû au retour des particules prises dans la recirculation en aval de la goutte. Les simulations réalisées ne mettent pas en évidence une contribution notable du phénomène de capture arrière pour les particules du minimum de Greenfield, pour des Reynolds de goutte compris entre 20 et 400 et pour des particules d'aérosol soumises à la force de traînée et au mouvement brownien uniquement. Nous observons en revanche qu'une quantité notable d'aérosols peut être entrainée dans le sillage de la goutte sans être capturées, aussi convient-il de distinguer ce stockage temporaire de la capture elle-même, afin d'éviter les biais d'interprétation.

ABSTRACT

The scavenging of aerosol particles by free-falling droplets is frequently encountered in industrial or natural depollution processes. By means of numerical simulations at drop's scale, we study in this article the exact impact of rear capture, due to particles going back to the rear of the drop because of the rear standing eddy. The simulations show no evidence of a noticeable contribution of rear capture for drop Reynolds number ranging between 20 and 400 and for aerosol particles submitted only to Brownian motion and drag force. However, it is shown that a noticeable amount of particle can be carried along in the wake of the drop without being captured, hence is it necessary to distinguish temporary storage from capture to avoid interpretation bias.

MOTS-CLÉS : épuration, aérosol, goutte, capture arrière / **KEYWORDS:** aerosol scavenging, drop, rear capture

1. INTRODUCTION

Le lavage des atmospheres chargées en aérosols par le biais de pulvérisations d'eau constitue une méthode d'épuration de l'air couramment employée en milieu professionnel. Il s'agit également d'un processus influent dans la physique de l'atmosphère (rabattement des aérosols par les pluies). Lorsqu'une goutte traverse un nuage d'aerosol, les principaux mécanismes de collecte qui interviennent sont l'impaction inertielle et l'interception directe à la surface de la goutte, la diffusion Brownienne des particules vers la surface de la goutte, la capture par diffusiophorèse et thermophorèse dans le cas de gouttes s'évaporant ou se condensant (et dans les cas anisothermes), ainsi que la capture par le biais des différentes interactions électrostatiques. Non seulement ces différents mécanismes de collecte agissent simultanément, mais ils sont fortement couplés avec le champ de température et de fraction de vapeur et avec le champ de concentration en aérosol au voisinage de la goutte. Tous ces champs évoluent par ailleurs de manière fortement couplée avec l'écoulement d'air autour de la goutte. Parmi les différents mode de collecte, un des moins documentés est le mode de capture arrière. La capture arrière se produit lorsqu'une particule d'aérosol est prise dans la zone de recirculation permanente qui apparait dans le sillage de la goutte pour certains régime d'écoulement. Ce phénomène a été pour la première fois suggéré par (Beard & Grover, 1974) : la recirculation arrière apparait pour des Reynolds de goutte (Re_d) supérieurs à 20 et présente son élongation maximale pour $Re_d \approx 200 - 300$, avant de dégénérer en un sillage instationnaire stable. Observant experimentalement un sursaut d'efficacité de collecte pour les aérosols peu inertiels du Greenfield Gap[1] et pour $100 < Re_d < 300$, suivi d'une nouvelle diminution de l'efficacité de collecte pour des Reynolds supérieurs, Pruppacher attribua ce sursaut au phénomène de capture arrière (Pruppacher, Klett, & Wang, 1998). Ce sursaut avait également été observé numériquement par Beard et Grover (Beard & Grover, 1974).
Bien que ce sursaut semble effectivement corrélé avec le développement de la recirculation arrière, il n'existe en réalité aucun travaux qui démontre une relation entre les deux.

[1] aérosols de diamètre aérodynamique de quelques centaines de nanomètres à un micromètre présentant une efficacité de collecte minimale

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2019-16616

Dans une étude précédente (Cherrier, Belut, Gerardin, Tanière, & Rimbert, 2017), nous avons employé la modélisation numérique microphysique pour calculer précisément l'efficacité de collecte des aérosols par des gouttes. Les calculs concernaient des particules du régime Brownien (collecte dominée par la diffusion) à inertiel (collecte dominée par l'impaction), pour des gouttes chutant en air calme à leur vitesse terminale à des Reynolds inférieurs à 100, en l'absence de forces phorétiques (cas isothermes sans évaporation).
Dans cet article, nous utilisons maintenant la même approche de modélisation pour examiner en détail la contribution de la capture arrière sur l'efficacité totale de collecte, pour des Reynolds de goutte compris entre 20 et 400 et pour des particules d'aérosol soumises à la force de traînée et au mouvement brownien uniquement. Les données de simulations sont utilisées pour illustrer la trajectoire des aérosols autour de la goutte et leur interaction avec le sillage, conduisant soit à l'éjection hors de la zone de recirculation arrière, soit à la capture arrière. La contribution de la capture arrière est quantifiée et nous proposons de distinguer la capture définitive par la goutte du stockage temporaire au voisinage de la goutte.

2. MODELISATION ET HYPOTHESES ASSOCIEES

On considère des particules d'aérosol supposées sphériques de diamètre aérodynamique d_p compris entre 2 nm et 20 µm et des gouttes d'eau en chute libre dans les conditions normales, avec des Reynolds de goutte $Re_d \in [10{,}400]$ (gouttes de diamètre $d_d \in [200\ \mu m, 1.24\ mm]$). La fraction volumique d'aérosol est supposée suffisamment faible ($\alpha_p < 10^{-6}$) pour négliger l'effet de l'aérosol sur l'écoulement (approche one-way). Ainsi la modélisation de l'écoulement (dans et hors de la goutte) peut être faite indépendamment de la dynamique des aérosols. Les conditions sont supposées isothermes et l'air saturé en humidité, il n'y a donc pas évaporation ou condensation de la goutte. Dans les conditions considérées, les écoulements sont laminaires (sauf pour $Re_d > 300$, forçage laminaire-axisymétrique) et le nombre de Weber We_d est suffisamment petit pour que la goutte reste sphérique. Deux phases continues et incompressibles, séparées par une interface indéformable sont présentes. Un repère lié à la goutte en translation uniforme est choisi et les écoulements sont modélisés par les équations de Navier-Stokes et discrétisées et résolues par la méthode des volumes finis avec un schéma d'ordre 3 (QUICK). Les équations du mouvement sont adimensionnées par les grandeurs caractéristiques du problème. Ceci permet d'effectuer des études paramétriques en fonction du couple Re_d, d_dsans modifier la grille de calcul. Dans les cas étudiés, l'écoulement est stationnaire et axisymétrique et la modélisation est donc réalisée en 2D-axisymétrique. Le couplage entre les écoulements externes et internes à la goutte est pris en compte en imposant la continuité de la contrainte tangentielle à l'interface air/eau. Une description lagrangienne est utilisée pour modéliser les trajectoires des particules. Bien que l'écoulement soit axisymétrique, les trajectoires des aérosols sont calculées en 3D du fait du mouvement brownien. Thermophorèse, diffusionphorèse et forces électriques ne sont pas prises en compte conformément à l'objectif du présent article exposé plus haut. Les collisions entre particules et leur agrégation sont négligées, les fréquences correspondantes étant petites par rapport à la fréquence de collision avec la goutte. Enfin, les aérosols sont supposés capturés dès qu'il y a contact avec la goutte.

On définit classiquement l'efficacité de capture E_c comme le rapport entre le débit numérique de particules d'aérosol capturées et le débit numérique de particules qui traverseraient la section de capture de la goutte[2] si leurs trajectoires ne déviaient pas autour de la goutte. Numériquement, elle est calculée en suivant des trajectoires de particules placées initialement en amont de la goutte, sur une surface normale à la trajectoire de la goutte. Ainsi, numériquement $E_c = \frac{j_{p_c}}{\frac{\pi}{4}(d_d+d_p)^2 N_{p_{inj}}}$, où j_{p_c} est le nombre de particules capturées et $N_{p_{inj}}$ est la concentration numérique surfacique sur la surface d'injection en amont de la goutte.
La qualité des simulations a été systématiquement vérifiée (indépendance par rapport à la taille du domaine de calcul, à la discrétisation spatiale, au nombre de trajectoires suivies, convergence statistique, etc.). Les résultats ont été également validés à l'aide des données expérimentales ou théoriques disponibles, suivant le cas. On se reportera à (Cherrier et al., 2017) pour davantage de détails.

3. RESULTATS

3.1. Phénoménologie

Les Figure 1 et 2 proposent une représentation axisymétrique de la position instantanée de particules d'aérosol initialement placées en amont d'une goutte, à la même coordonnée axiale mais à différentes coordonnées radiales. L'écoulement, relativement à la goutte, est de la gauche vers la droite. L'effet du développement de la zone de recirculation arrière, via l'augmentation du nombre de Reynolds, est visible Figure 1 pour des particules Browniennes (diamètre aérodynamique de 2 nm) et pour des particules du minimum de Greenfield (diamètre aérodynamique de 1 µm).

[2] disque de diamètre $d_d + d_p$, d_p étant le diamètre d'aérosol considéré

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2019-16616

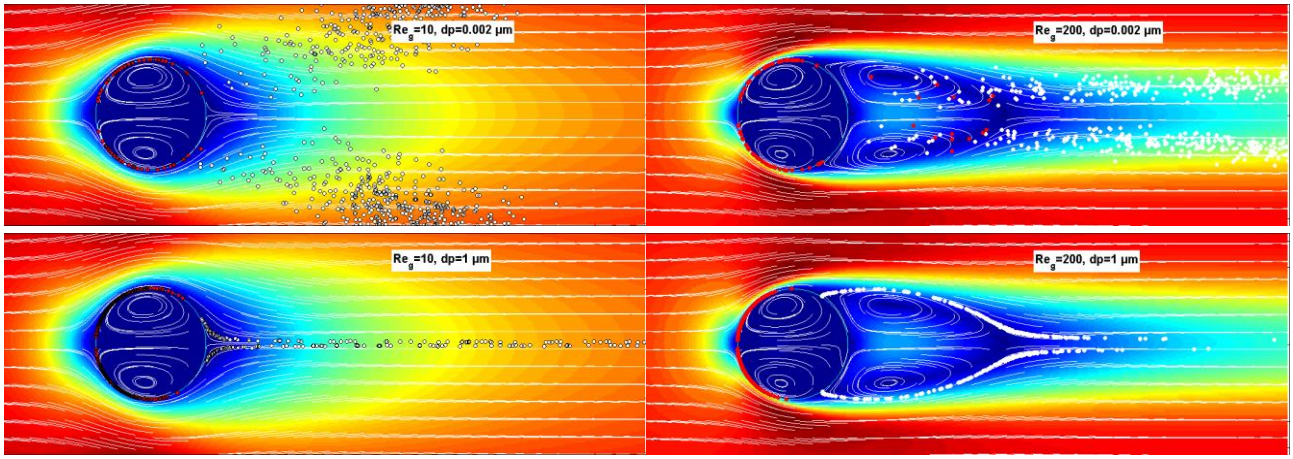

Figure 1. Comportement d'un aérosol Brownien (en haut, d_p = 2 nm) et d'un aérosol du minimum de Greenfield (en bas, d_p = 1 µm) au voisinage d'une goutte en chute libre dans l'air pour différents Reynolds. En couleur: champ de vitesse des fluides (en rouge : vitesse de chute, en bleu: vitesse nulle), en blanc lignes de courant. Points rouges : particules capturées à terme, points blancs : particules non capturées.

Les particules Browniennes, très diffusantes, entrent aisément dans la zone de recirculation arrière et sont ainsi capturées de manière relativement isotrope : la capture arrière est notable. Les particules du minimum de Greenfield en revanche se comportent comme des traceurs parfaits et suivent les contours de la zone de recirculation sans y pénétrer, elles sont ainsi capturées essentiellement frontalement et non à l'arrière de la goutte. Ce résultat peut être formalisé en utilisant les données de simulation pour tracer la répartition du flux surfacique de particules déposées sur la goutte, en fonction de la position angulaire (Figure 2).

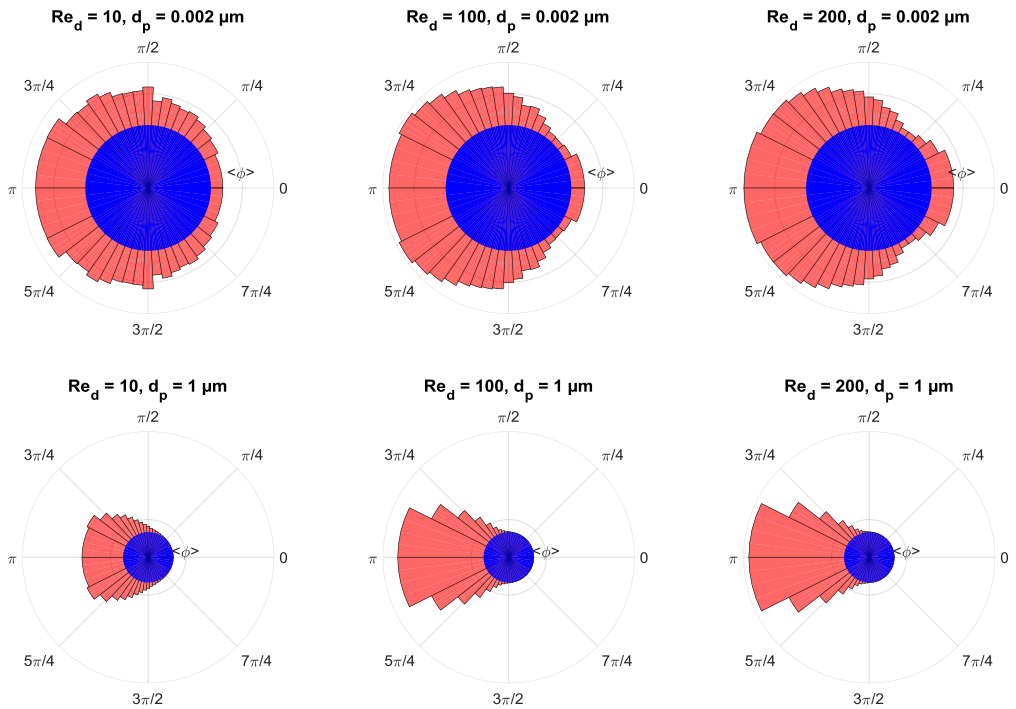

Figure 2. Répartition angulaire du flux surfacique de particules déposées sur la goutte, pour une direction d'incidence à 0°. Le flux est adimensionné par sa valeur moyennée $< \phi >$ sur la surface de la goutte.

La Figure 3 reporte d'un point de vue quantitatif l'évolution de l'efficacité de collecte en fonction du Reynolds des goutte, pour différentes taille de goutte, telle que calculée par les simulations. On n'observe pas de rebond de l'efficacité de collecte corrélée avec le développement de la zone de recirculation à l'arrière de la goutte. Le rebond d'efficacité de collecte observé dans (Beard & Grover, 1974; Pruppacher et al., 1998) est donc soit attribuable à l'effet des forces phorétiques qui favoriseraient l'introduction des particules dans la zone de recirculation arrière, y compris dans le minimum de Greenfield, soit à un biais numérique ou expérimental dans leurs travaux.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2019-16616

3.2. Interprétation de la collecte : capture définitive ou stockage temporaire ?

Qu'il y ait à terme contact ou non entre les particules et la surface de goutte, les particules qui entrent dans la couche limite de la goutte sont accélérées par celle-ci, ce qui provoque leur entraînement. Cet effet est d'autant plus notable que les particules ont un comportement de traceur (particules du minimum de Greenfield). De même, les particules pénétrant dans la zone de recirculation arrière, même si elles finissent le plus souvent par être éjectées sans être capturées par la goutte, vont présenter un temps de résidence élevé dans cette zone morte. Il existe ainsi au final un fort potentiel de stockage temporaire des aérosols dans le sillage de la goutte. Expérimentalement il sera difficile de distinguer les particules entrainées des particules capturées, ce qui peut constituer un biais. En revanche les simulations permettent de dériver les quantités d'aérosols stockées dans la couche limite de la goutte et dans la zone de recirculation arrière en régime établi (Figure 5), ainsi que les temps caractéristiques de remplissage et de purge de ce stockage (Figure 4).

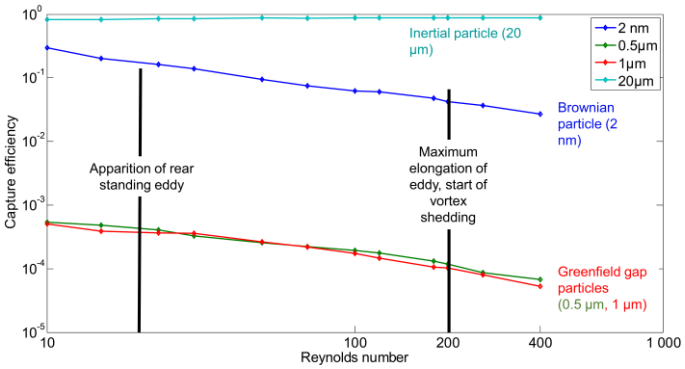

Figure 3. Efficacité de collecte en fonction du Reynolds pour différents diamètres aérodynamiques d'aérosols

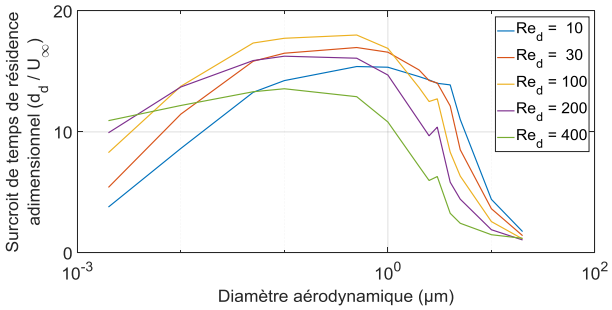

Figure 4. Temps supplémentaire nécessaire pour purger à 99% le voisinage de la goutte, par rapport à une traversée directe de la goutte. Adimensionné par le temps caractéristique de transit d_d/U_∞

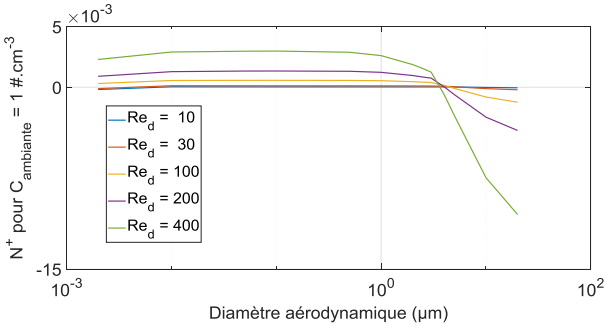

Figure 5. Nombre de particules en sureffectif au voisinage de la goutte par rapport à l'ambiance, pour $C_{ambiante}$ = 1 cm^{-3}.

Ainsi, par rapport à un simple transit rectiligne, le temps de résidence des aérosols au voisinage de la goutte est prolongé d'un facteur allant jusqu'à 18 pour les particules du minimum de Greenfield (en d'autres termes, la goutte transporte des particules sur une distance allant jusqu'à 19 fois son diamètre). Du fait de ce temps de résidence, la concentration en particules au voisinage de la goutte peut devenir plus élevée que celle de l'ambiance (Figure 5) : ainsi, malgré la capture il existe une surconcentration d'aérosol autour de la goutte pour d_p < 4µm, l'effet augmentant avec le Reynolds des gouttes. Cette surconcentration correspond aux aérosols transportés avec l'air autour de la goutte. En revanche pour d_p > 4µm, l'importante efficacité de collecte résulte malgré tout en une déplétion locale d'aérosols.

4. CONCLUSIONS

Les simulations réalisées ne mettent pas en évidence une contribution notable du phénomène de capture arrière pour les particules du minimum de Greenfield, pour $Re_d \in [20, 400]$ et pour des particules d'aérosol soumises à la force de traînée et au mouvement brownien uniquement. Le rebond d'efficacité de collecte observé dans (Beard & Grover, 1974; Pruppacher et al., 1998) est donc soit attribuable à l'effet des forces phorétiques, soit un artefact numérique et expérimental lié à la méthode de détermination de l'efficacité de collecte. Nous observons qu'une quantité notable d'aérosols peut être entrainée dans le sillage de la goutte sans être capturées. Il convient donc de distinguer ce stockage de la capture elle-même.

Beard, K., & Grover, S. (1974). Numerical collision efficiencies for small raindrops colliding with micron size particles. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *31*(2), 543–550.

Cherrier, G., Belut, E., Gerardin, F., Tanière, A., & Rimbert, N. (2017). Aerosol particles scavenging by a droplet: Microphysical modeling in the Greenfield gap. *Atmospheric Environment*, *166*, 519–530.

Pruppacher, H. R., Klett, J. D., & Wang, P. K. (1998). *Microphysics of clouds and precipitation*. Taylor & Francis.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2019-16616