

FILTRATION D'AEROSOL SUBMICRONIQUE PAR COAGULATION BIPOLAIRE

L. UNGER*, P. EHOARN et J.-P. BORRA

Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas, UMR 8578,
Equipe Décharges Electriques et Environnement,
Ecole Supélec, Plateau de Moulon, 91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France.

INTRODUCTION

La filtration d'effluents particulaires implique de séparer les particules du fluide porteur. Les méthodes de filtration diffèrent essentiellement par la nature des forces utilisées pour réaliser cette séparation. Quelle que soit la méthode, il existe une taille de particules pour laquelle l'efficacité est minimale (elle se situe pour la plupart des mécanismes entre $0.1\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$). Si les particules sont chargées électriquement, la force électrique coulombienne est une force efficace pour réaliser la séparation particules-fluide, surtout dans le domaine de taille submicronique.

La coagulation bipolaire est le processus de captation - sous l'effet des forces électriques coulombiennes - de particules polluantes chargées par des particules collectrices chargées de la polarité opposée. Le manque de données expérimentales sur la coagulation bipolaire est une des limites à la compréhension de ce processus, par ailleurs identifié comme permettant de filtrer efficacement les particules polluantes. L'utilisation d'un système original de production de gouttes d'eau fortement chargées (Pulvérisation Electro-HydroDynamique), et la caractérisation précise des populations de particules mises en présence, permettent d'envisager l'amélioration de l'efficacité de ce type de procédé, ainsi que l'étude plus précise du processus de coagulation. Dans ce but, un filtre électrostatique a été conçu et testé (débits de gaz traités de l'ordre de 20 L/min, concentration de polluants de l'ordre de 10^5 p.cm^{-3}). Le principe de ce filtre est de (i) charger électriquement les polluants par décharge électrique (ii) produire des collecteurs liquides chargés électriquement de la polarité opposée et (iii) mélanger les deux populations dans des conditions permettant la captation des polluants sur les collecteurs liquides.

MONTAGE EXPERIMENTAL & METHODES DE CARACTERISATION

1. Montage général

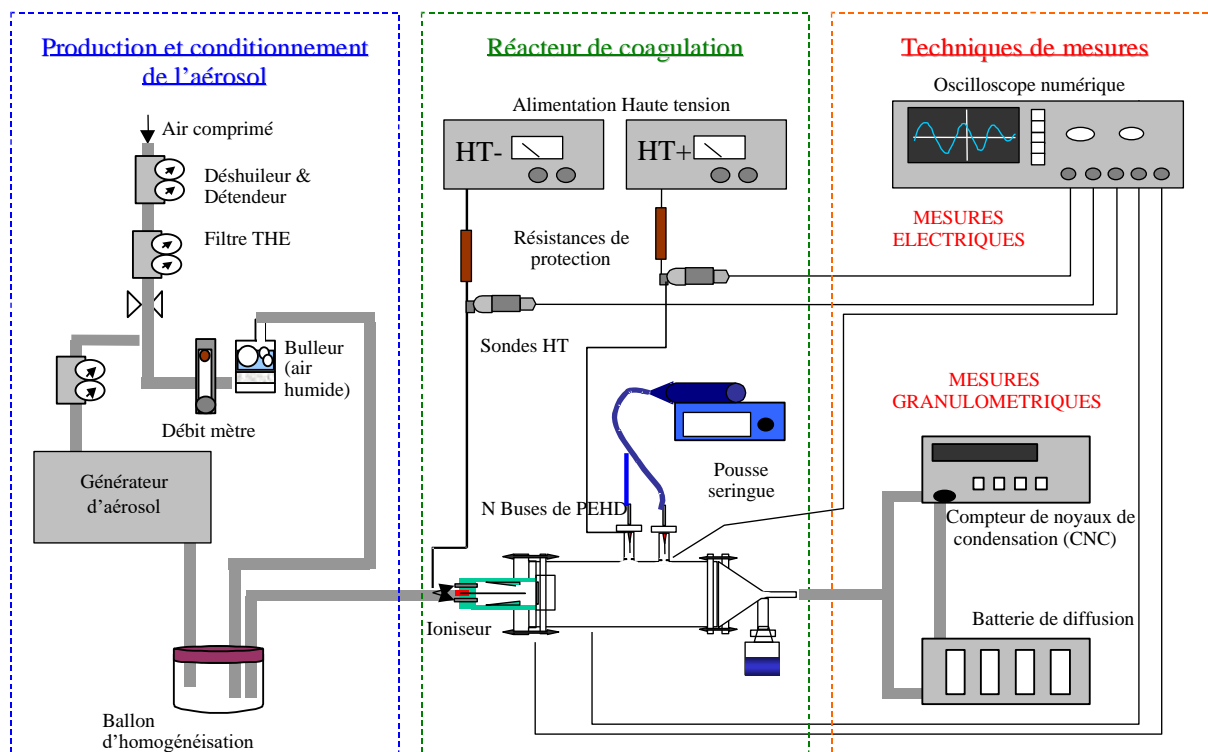


Figure 1 : Schéma du montage expérimental

Le montage expérimental est découpé en plusieurs parties : (i) production de l'aérosol neutre, (ii) charge de l'aérosol neutre dans une décharge électrique de polarité négative, (iii) production de gouttelettes collectrices d'eau chargées positivement, (iv) injection des polluants dans le réacteur de coagulation (zone où sont produites les gouttes d'eau), (v) caractérisation du laveur par la mesure de la concentration de polluant à différents niveaux.

2. Production de l'aérosol neutre

L'aérosol neutre de départ est produit à l'aide d'un générateur Sinclair-Lamer (production de gouttelettes de DiEthylHexylSebaçat par condensation hétérogène). Cet aérosol est unimodal, monodispersé, et le diamètre des particules varie entre 0.44 μm et 1.13 μm dans cette étude. Cet aérosol est mélangé avec un débit d'air dont l'humidité est contrôlée et est nécessaire au bon contrôle du fonctionnement de la décharge.

3. Charge des particules polluantes

Le chargeur utilisé est une décharge électrique à pression atmosphérique (décharge couronne ou glow), dans lequel le polluant neutre est injecté et chargé. La décharge électrique est produite en appliquant une différence de potentiel entre un fil et un cylindre, grâce à une alimentation haute tension. Le fil est polarisé, et le cylindre de masse est utilisé pour collecter le courant électrique du aux ions gazeux créés dans l'espace inter électrodes. Le contrôle du régime de décharge est essentiel pour maîtriser le niveau de charge acquis par les particules pendant leur passage dans la décharge (qui dépend du diamètre des particules, du champ électrique E dans l'espace inter électrodes et du produit $Nixt$ de la densité d'ions gazeux par le temps passé par les particules dans cette densité d'ions).

Ce chargeur a été caractérisé (cf. Unger *et al.* 2001), ce qui permet de connaître précisément le niveau de charge et la concentration des particules polluantes qui sont injectées dans le coagulateur. Les niveaux de charge obtenus dans ce chargeur sont cohérents avec ceux donnés par la loi de charge par champ lorsque les particules polluantes sont sphériques, ce qui est le cas ici. La Figure 2 montre le schéma du chargeur utilisé.

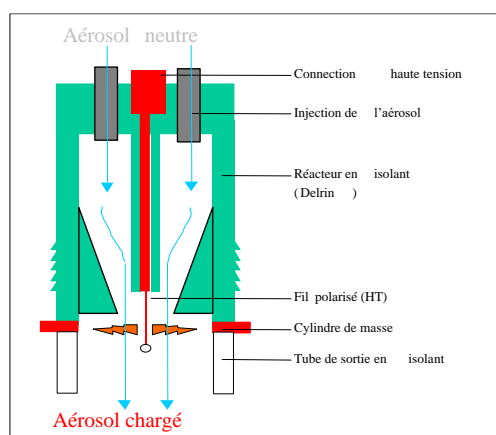


Figure 2 : Schéma du chargeur par décharge couronne

4. Production des collecteurs liquides par Pulvérisation Electro-Hydrodynamique

Le procédé de production des particules collectrices d'eau utilisé est la pulvérisation électro-hydrodynamique (Ehouarn *et al.* 1999). Une buse alimentée en eau, et polarisée à la haute-tension, permet de produire un cône de liquide qui se fragmente en un spray de gouttelettes chargées. Ce procédé permet d'obtenir des gouttelettes dont la taille est, dans nos conditions, de l'ordre de 100 μm et dont la charge électrique est très élevée ($\approx 50\%$ de la charge limite de Rayleigh, soit de l'ordre de $25 \cdot 10^6$ charges par goutte). L'intérêt de ce système pour la coagulation électrique est donc de disposer de collecteurs liquides très fortement chargés, de taille contrôlée. Par ailleurs, les débits d'eau utilisés sont faibles (de l'ordre de 100mL/h par buse), ce qui est un atout important en termes d'application du procédé. La Figure 3 montre le schéma de principe du système de pulvérisation électro-hydrodynamique.

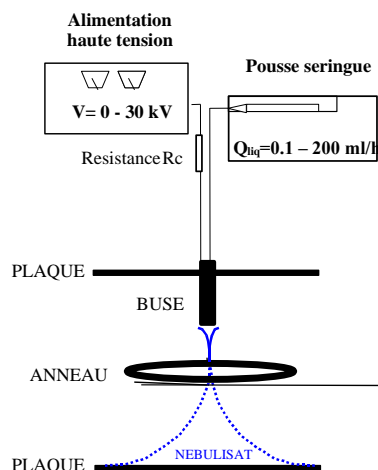


Figure 3 : Schéma du système de pulvérisation électro-hydrodynamique

Des mesures tant granulométriques (à l'aide d'un PDA) qu'électriques (mesures de courants) ont permis de caractériser précisément les gouttelettes produites par ce procédé.

5. Réacteur de coagulation - Méthodes de mesure

Afin de mélanger les polluants chargés négativement avec les collecteurs liquides chargés positivement, plusieurs sprays sont mis en place dans un réacteur de géométrie cylindrique, et les polluants sont injectés dans cette zone le long de l'axe du cylindre.

Les deux systèmes de production (chargeur par décharge d'une part, et buses de PEHD d'autre part) ont déjà été calibrés dans les études précédentes. Les caractéristiques physiques (diamètre, charge, concentration) des polluants que l'on injecte dans le réacteur de coagulation sont donc connues, ainsi que celles des gouttes collectrices.

La détermination de l'efficacité de coagulation implique de caractériser les concentrations de polluants à tous les niveaux du système : amont et aval du chargeur, amont et aval des buses de coagulation. Les concentrations aux différents niveaux sont appelées comme suit :

- C_0 est la concentration de particules à l'entrée du système
- $C_{1^{off}}$ est la concentration de particules en sortie de chargeur lorsque celui-ci est éteint (la différence entre $C_{1^{off}}$ et C_0 permet d'estimer les pertes par impaction, interception et diffusion dans le chargeur)
- C_1 est la concentration de particules en sortie de chargeur, lorsque celui-ci fonctionne
- C_{1^+} est la concentration de particules en sortie de chargeur lorsque les buses fonctionnent (en effet, la charge d'espace positive des sprays crée un champ électrique qui attire les polluants chargés négativement, et C_{1^+} est donc différent de C_1)
- C_2 est la concentration de particules en sortie de réacteur (après passage des polluants dans les sprays d'eau) lorsque le chargeur est éteint (injection de polluants neutre dans le réacteur)
- C_{lavage} est la concentration de particules en sortie de réacteur lorsque le chargeur fonctionne (injection de polluants chargés dans le réacteur).

Les efficacités de collection sont alors définies comme suit :

- L'efficacité de coagulation unipolaire (i.e. efficacité de collection de polluants neutre)

$$E_{coagunip} = 1 - C_2 / C_{1^{off}}$$

- L'efficacité de coagulation bipolaire (i.e. efficacité de collection de polluants chargés de la polarité opposée à celle des collecteurs)

$$E_{coagbip} = 1 - C_{lavage} / C_{1^+}$$

Le but de cette étude a été (i) d'une part de montrer la faisabilité d'un tel système de filtration humide (ii) d'autre part d'étudier l'influence des différents paramètres expérimentaux (caractéristiques des polluants, des collecteurs et conditions de mélange) sur l'efficacité de coagulation dans le double but (i) de mieux maîtriser le processus de coagulation et (ii) de dimensionner un prototype.

RESULTATS & DISCUSSION

Un système de filtration basé sur le même principe que celui présenté ici a été étudié par Bertinat (Bertinat, 1980). Une approche analytique simplifiée de la collection par une goutte d'eau d'une particule polluante, et des hypothèses simplificatrices quant à la répartition des gouttes dans le réacteur de coagulation permet d'exprimer l'efficacité de coagulation bipolaire en fonction des propriétés des particules polluantes, des gouttes et de la zone de coagulation :

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{\langle C_g t_{poll} \mu_p q_g \rangle}{\varepsilon_0}\right)$$

où C_g et q_g sont respectivement la concentration (m^{-3}) et la charge (C) des gouttes collectrices, μ_p mobilité électrique des polluants ($m^2.V^{-1}.s^{-1}$), t_{poll} le temps de transit des polluants dans le réacteur, ε_0 la constante diélectrique du vide ($F.m^{-1}$), et où le symbole $\langle \dots \rangle$ signifie la moyenne sur le volume du réacteur. Comme μ_p et q_g sont constantes et déterminées par les points de fonctionnement du chargeur et des sprays, la moyenne $\langle C_g t_{poll} \rangle$ est donc la quantité permettant de décrire les conditions de mélanges des polluants avec les collecteurs, puisqu'elle intègre l'inhomogénéité de la concentration de collecteur ainsi que le temps passé par les polluants dans chacune des zones de différentes concentrations de collecteurs.

Les résultats présentés correspondent à l'étude paramétrique du processus de coagulation électrique, permettant de définir l'impact des différents paramètres expérimentaux (charge des polluants, temps de transit des polluants dans le réacteur, concentration du polluant, concentration de collecteurs) sur l'efficacité de collection globale (macroscopique) du réacteur.

1. Influence de la mobilité électrique – coagulation bipolaire et unipolaire

Lorsque la tension du chargeur est modifiée, la charge des polluants est modifiée de manière contrôlée, ce qui permet d'observer l'influence de la mobilité électrique sur l'efficacité de coagulation (voir Figure 4).

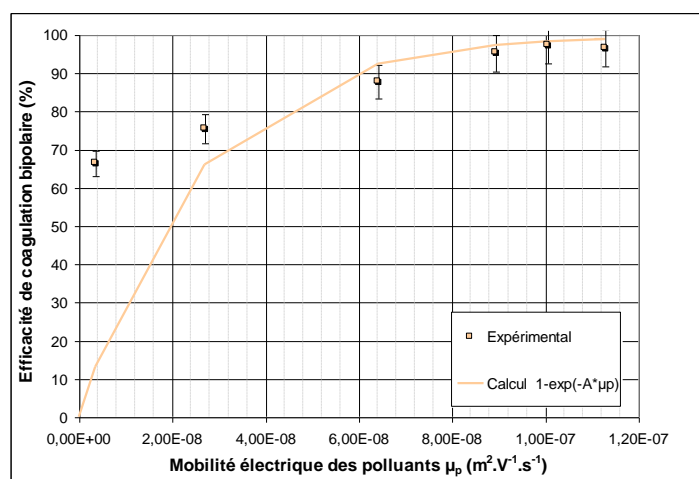


Figure 4 : Efficacité de coagulation bipolaire en fonction de la mobilité électrique des polluants (4buses, $Q_p=10L/min$, $d_p=0.44\mu m$) (expérimentale=points et calculée=trait continu)

On observe que :

- L'augmentation de mobilité des polluants augmente la force de Coulomb entre les polluants et les collecteurs, ce qui induit une augmentation de l'efficacité de coagulation
- L'influence de la mobilité électrique est bien décrite par une formule de type Bertinat, lorsque les polluants sont suffisamment chargés ($\mu_p > 5.10^{-8} m^2.V^{-1}.s^{-1}$)
- Pour les faibles niveaux de charges (faible mobilité) on tend vers l'efficacité de coagulation unipolaire mesurée lorsque le chargeur est éteint ($E_{coagunip}=64\%$ dans ce cas)
- Les efficacités atteintes, pour un débit d'aérosol polluant de 10L/min et avec 4 buses en fonctionnement, sont importantes (de l'ordre de 97% en nombre)

2. Débit d'aérosol dans le réacteur – temps de transit

Une variation de débit de l'aérosol permet de jouer sur le temps de transit t_{poll} des polluants dans le réacteur. La Figure 5 montre les efficacités obtenues pour trois débits d'aérosol différents entre 5 et 15 L/min.

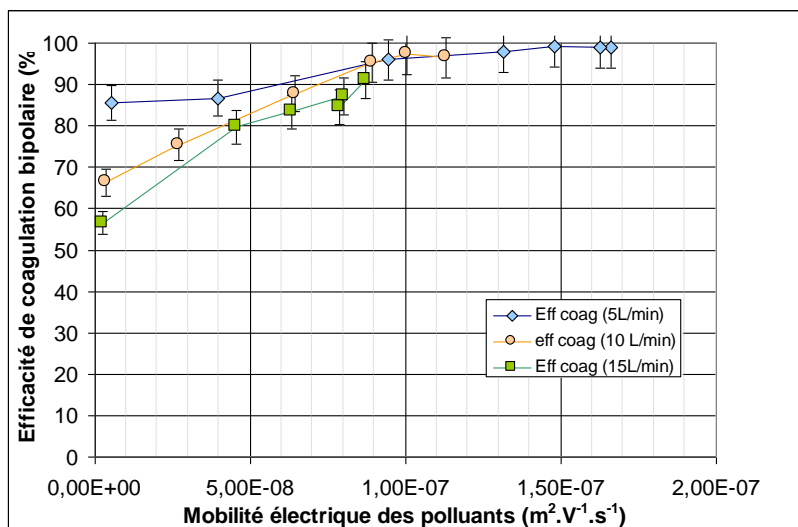


Figure 5 : Efficacité de coagulation bipolaire en fonction de la mobilité électrique du polluant, pour différents débits d'aérosol polluant (4buses, $Q_p=5-15L/min$, $d_p=0.44\mu m$)

On observe que :

- La diminution du temps de transit (par augmentation du débit) induit une réduction de l'efficacité de coagulation, et ce d'autant plus que les polluants sont peu chargés. Il semble donc que lorsque les polluants sont suffisamment chargés ($\mu_p > 1.10^{-7} m^2.V^{-1}.s^{-1}$), les forces électriques soient prépondérantes devant les forces hydrodynamiques et permettent d'arriver aux mêmes efficacités de coagulation, malgré des temps de transit plus courts
- Comme précédemment, on observe, pour les faibles mobilités, des efficacités comparables aux efficacités unipolaires mesurées lorsque le chargeur est éteint (pour 5, 10 et 15 L/min, on obtient comme efficacités unipolaires respectivement 87%, 64% et 45%). Il faut souligner que pour le débit de 5 L/min, l'efficacité de coagulation est supérieure à 99% lorsque les polluants ont des mobilités électriques supérieures ou égales à $1,5.10^{-7} m^2.V^{-1}.s^{-1}$.

3. Influence de $C_{polluant}$

L'influence de la concentration de polluant sur l'efficacité de coagulation a été quantifiée en modifiant la concentration d'aérosols injectés dans le réacteur de coagulation. Ce paramètre est très important en termes d'application du système, puisqu'il permet de quantifier la limite d'efficacité que l'on pourra obtenir en fonction de la concentration de l'aérosol à filtrer. La Figure 6 montre l'influence de la concentration de polluant sur l'efficacité de coagulation d'une buse (a), ainsi que le type d'abaque que l'on peut établir à partir de ces résultats (b).

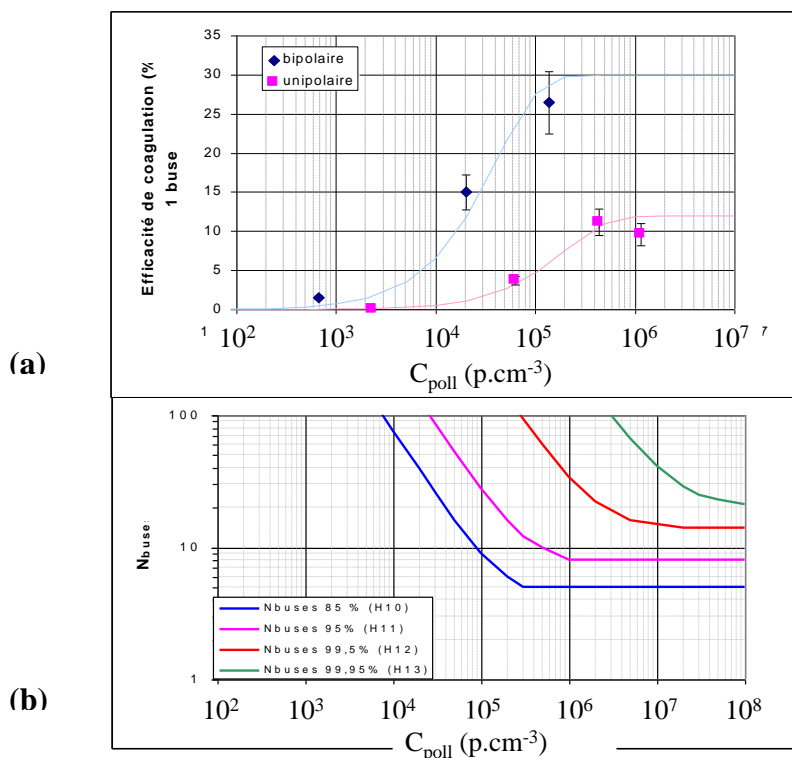


Figure 6 : (a) efficacité de coagulation d'un buse en fonction de la concentration de polluants injecté (bipolaire $\mu p=10^{-7} m^2.V-1.s-1$, 1 buse, $d_p=0.44\mu m$) (b) Extrapolation effectuée à partir des résultats du (a) et montrant le nombre de buses à utiliser en fonction de la concentration de polluants pour différentes efficacités bipolaire visées

On observe que :

- La diminution de concentration de polluants induit une diminution notable d'efficacité
- Ce fait expérimental est important au regard de l'application, puisqu'il permet de fixer une limite à l'efficacité maximale que l'on peut atteindre, tout en conservant un nombre de buses raisonnables (i.e. en conservant un débit d'eau par débit de gaz traité inférieur à ceux des systèmes déjà utilisés $Q_{liq}/Q_{gaz} = 10^{-3}$). Une extrapolation de ce type est montrée en (b).

CONCLUSION

La conception et le calibrage de deux sources d'aérosols chargés (par décharge couronne d'une part, et pulvérisation électro-hydrodynamique d'eau d'autre part) ont permis l'étude de la coagulation bipolaire. Les conditions de production contrôlées de chacune des populations permet en effet d'extraire des informations des mesures macroscopiques d'efficacité.

Cette étude a permis :

- d'une part de montrer la faisabilité d'un tel procédé de filtration (les efficacités obtenues – jusqu'à 99 % en nombre selon les conditions – permettent d'envisager une application du procédé), d'autant plus que les conditions de coagulation sont volontairement défavorables (gamme de taille sub-micronique, faible miscibilité des polluants huileux sur les collecteurs aqueux)
- d'autre part de préciser les conditions de mélanges optimales des polluants avec les collecteurs liquides ; ces résultats expérimentaux de coagulation bipolaire où les propriétés des particules (diamètre, charge, concentration) sont connues permettent d'envisager la comparaison avec un modèle numérique du processus de coagulation

Une étude du processus de coagulation à l'aide d'un Anémomètre à Phase Doppler est prévue, et devrait permettre d'établir une cartographie des particules polluantes et des collecteurs. La définition des conditions optimales de coagulation permettra de progresser dans la maîtrise de ce processus.

Références :

- M. P. BERTINAT, " Charged Droplet Scrubbing for Controlling Sub-micron Particle Emissions ", *Journal of Electrostatics*, Vol. 9, pp. 137-158, 1980
- P. Ehouarn, L. Unger, J.-P. Borra, « PEHD : Domaines de stabilité et lois d'échelle du mode cone-jet-glow selon la tension, le débit et la conductivité », *15^{ème} Congrès Français sur les Aérosols*, Paris, 8-9 décembre 1999
- L. Unger, J.-P. Borra, « Charge de particules submicroniques dans une décharge : conditions de fonctionnement du chargeur et effet de la forme des particules sur la loi de charge », *17^{ème} Congrès Français sur les Aérosols*, Paris, 11-12 décembre 2001