

Contrôle dimensionnel des aérosols par piézoélectricité

Najib Zainoun, Jean-Marc Chicheportiche et Jean-Pierre Renaudeaux

Laboratoire de Mécanique des Fluides, ESCPI-CNAM

5 Bd Descartes, F77420 Champs sur Marne

email : fluides@escpi.cnam.fr

RÉSUMÉ : Les aérosols qui se forment naturellement lors de la pulvérisation de liquides avec des disques tournants sont naturellement hétérogènes. La superposition à l'écoulement d'une vibration permet dans des conditions bien définies d'amplitude et de fréquence de fabriquer des gouttelettes sphériques homogènes dont on sait prédire le rayon avec une bonne précision. Ce contrôle constitue un facteur de qualité dans les applications biomédicales, qu'elles concernent la nébulisation (ORL, sprays désinfectants,...) ou la fabrication de produits actifs.

1. Introduction

Les aérosols sont des supports utilisés en médecine pour transporter un produit actif sur le lieu où on souhaite qu'il agisse. C'est ainsi qu'on utilise par exemple de nombreux médicaments à vaporiser dans la bouche et destinés à soigner des affections se situant au niveau du poumon ou au niveau du pharynx. Les destinations réelles des gouttelettes injectées sont intimement dépendantes de leurs tailles : les grosses particules sont arrêtées au niveau de la gorge et seules les fines particules vont pouvoir atteindre les poumons. Le contrôle dimensionnel des particules, en permettant de n'émettre que des particules de même taille, constitue un élément important de réussite du traitement.

Les aérosols sont aussi utilisés depuis longtemps pour fabriquer des particules solides par séchage ou solidification à partir de mélanges en phase liquide. C'est ainsi par exemple que le lait en poudre est fabriqué à partir du lait vaporisé puis séché et que de nombreux produits pharmaceutiques sont obtenus par ce procédé. En biologie, la bioencapsulation est une technique en cours de développement, qui consiste à recouvrir les particules, solides ou liquides, d'une membrane. Dans le cas des transplants de cellules vivantes, l'encapsulation a pour objet d'assurer l'immunoprotection (îlots de Langerhans), elle permet également d'ajouter aux cellules des protéines codées avec des gènes supprimant le grossissement et la prolifération des cellules cancéreuses (cancer du cerveau). Dans plusieurs applications thérapeutiques, on cherche, pour augmenter l'efficacité et diminuer les effets secondaires, à injecter le produit actif le plus près possible du site que l'on veut soigner et à le libérer progressivement. Ceci peut être obtenu à partir de microgouttelettes calibrées et encapsulées avec des polymères biodégradables. Cette étude présente un principe de fabrication de gouttes calibrées relevant d'un procédé mécanotransductif industriel appliqué à des jets en rotation et la réalisation d'un nouveau générateur à fort débit.

2. Les générateurs d'aérosols non contrôlés

D'une façon tout à fait générale la formation d'une goutte provient de la dégenérescence d'un jet ou d'une nappe liquide sous l'effet d'une perturbation naturelle ou artificielle. Les trois méthodes suivantes sont actuellement utilisées dans les nébuliseurs médicaux et/ou industriels.

2.1. La dispersion sous pression d'un liquide à travers une buse

2.1.1. Le pulvérisateur hydraulique

Le liquide est mis sous pression (2 à 8 bars) par un gaz ou une pompe dans un réservoir muni d'une buse. A la sortie de la buse, le liquide se fragmente sous forme de nappe, puis de gouttelettes. Les débits vont de 10^{-6} à 160.10^{-6} m³/s et les diamètres moyens des particules sont compris entre 50 et 500 µm, fonctions du débit et de la perte de charge à travers la buse.

2.1.2. Le pulvérisateur pneumatique

L'aérosol est créé par la mise en contact d'un liquide et d'un gaz comprimé, en général de l'air, avant ou après la buse. Les débits vont de $0.5.10^{-6}$ à 20.10^{-6} m³/s et les diamètres moyens des particules sont compris entre 1 et 200 µm.

La dispersion par excitation de la surface libre d'un liquide

La surface libre d'un liquide au repos est excitée par une source acoustique de fréquence comprise entre quelques dizaines de Hz et quelques MHz. Il apparaît des pointes liquides d'où s'échappent des gouttelettes de diamètres compris entre quelques µm et quelques dizaines de µm, dépendant du liquide et de la fréquence d'excitation.

La dispersion par un objet tournant à grande vitesse

Le générateur est un disque, bol ou autre objet tournant à grande vitesse alimenté en son centre par un jet liquide. Le liquide s'étale sur l'objet, puis se résout sur les bords de l'objet soit sous forme d'une nappe liquide (fig.1) qui se résout ensuite en gouttes, soit sous forme de jets (fig.2) qui se transforme en gouttes, soit directement sous forme de gouttes (fig.3).



Figure 1 . Nappe

Figure 2. Jets

Figure 3. Gouttes

3. Les générateurs d'aérosols rotatifs dans la zone de formation de jets

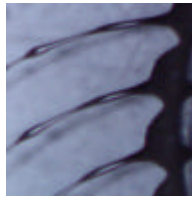


Fig.4. Instabilité

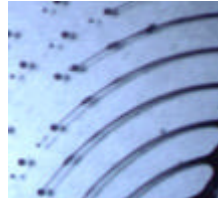


Fig.5. Fragmentation naturelle

Le passage jet à goutte est la conséquence d'une instabilité (fig.4) qui se propage et s'amplifie le long du jet. Lorsque l'amplitude de l'instabilité devient égale au rayon du jet, elle le sectionne et il se forme une goutte principale et un ou plusieurs satellites à chaque longueur d'onde (fig.5).

3.1. Le principe de la fragmentation naturelle dans la zone de formation de jets.

La fragmentation des jets issus des disques en rotation résulte d'un mécanisme semblable à celle des jets cylindriques. il se développe naturellement sur le jet une onde d'instabilité maximale dont la longueur d'onde peut être approchée par la formule de Rayleigh, [Lord Rayleigh, 1894]:

$$l_{\max} = 2\rho R_j \sqrt{2 + 3 \frac{\mu}{\sigma R_j}}, \text{ où } R_j \text{ est le rayon du jet, } \rho, \mu \text{ et } \sigma \text{ respectivement la}$$

masse volumique, la viscosité dynamique et la tension superficielle du liquide. Comme les jets ne sont pas cylindriques et les vibrations naturelles ne sont pas reproductibles, les gouttelettes issues de jets différents ne sont pas identiques et l'aérosol est hétérogène ou polydispersé.

La loi décrivant les rayons R_g des gouttes s'obtient en écrivant l'équation de conservation de la masse pour la dégénérescence jets - gouttes : A chaque période T , il se forme à l'aval du jet m gouttes de rayons R_{gk} (m est en général égal à 1 ou 2, voire 3). Si V_r est la vitesse relative débitante d'un jet au point de fragmentation et R_j le rayon correspondant, Le volume U_i de liquide passant par le jet i pendant le temps T est $U_i = V_r \rho R_j^2 T$. Il est égal au volume de l'ensemble des gouttes formées pendant ce

temps, soit $U_i = \sum_{k=1}^{k=m} \left(\frac{4}{3} \rho R_{gik}^3 \right)$. Le rayon R_g de chaque goutte obéit donc à une loi du

$$\text{type } R_g = f(V_r, R_j, m, F = 1/T).$$

Le principe de la fragmentation forcée . Le contrôle dimensionnel des gouttes.

Si on arrive à organiser la perturbation de telle façon que, les jets étant identiques, ils soient rompus à la même distance du bord du disque, il se forme à chaque période m ($m=1.2.3,..$)gouttes différentes sur une longueur d'onde, mais reproductibles d'une longueur d'onde à l'autre. On a un aérosol m -dispersé.

De plus si on arrive à contrôler la perturbation de telle façon qu'il se forme à chaque période une seule goutte, on obtient un aérosol monodispersé ou homogène. Comme le débit total s'écrit $q_v = ZV_r \rho R_j^2$, le rayon R_g des gouttes homogènes sphériques

s'écrit $R_g = \left[\frac{3q_v T}{4\rho Z} \right]^{1/3}$ où Z est le nombre de jets à la périphérie du disque.

4. Les contrôles

La dernière relation montre que lorsqu'on a des gouttes sphériques homogènes, les rayons de ces gouttes peuvent être déterminés si on connaît le débit, la période de vibration et le nombre de jets. Elle n'indique pas les conditions auxquelles on obtient ces gouttes homogènes.

Le contrôle dimensionnel des gouttelettes suppose que les conditions suivantes soient réunies :

- être dans la zone de formation de jets,
- arriver à exciter les jets de façon à ce qu'ils se coupent tous à la même distance du bord du disque,
- arriver à obtenir une seule gouttelette par longueur d'onde.

4.1. La zone de formation de jets

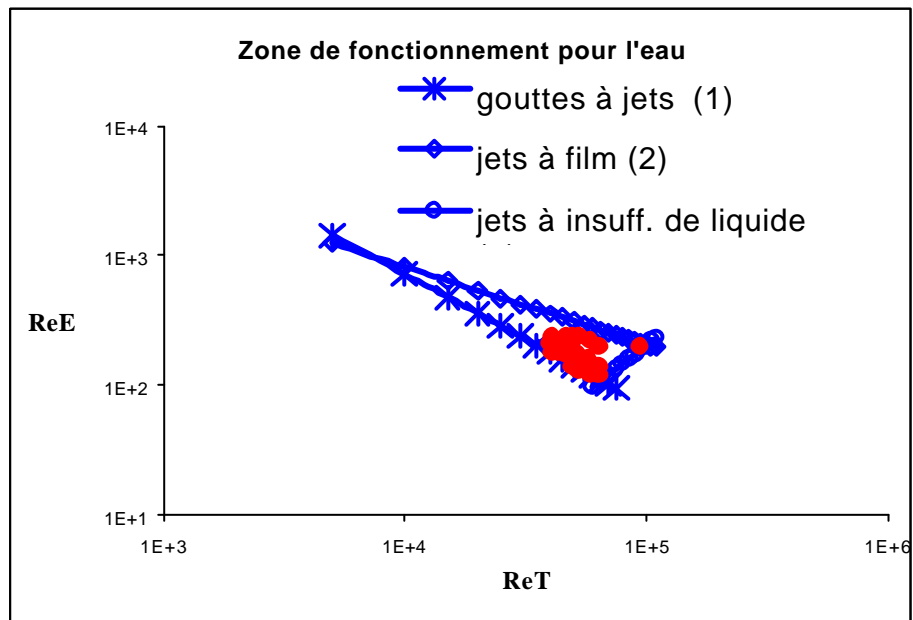


Figure 6. Zone de fonctionnement

La zone de formation de jets a été déterminée expérimentalement. Elle est une fonction de trois nombres sans dimension [Leteurtris, 1974]. Un nombre de Reynolds relatif à l'écoulement $Re_E = \frac{r q_v}{R m}$, un nombre de Reynolds lié à la rotation du disque

$$Re_T = \frac{r R w^2}{m} \text{ et un nombre de Ohnesorge rapporté au disque } Y = \frac{m}{\sqrt{r s R}}$$

liquide et un disque donné, la valeur de Y est fixée, la zone de fonctionnement est comprise dans un triangle limité par les trois fonctions : (Fig.6)

- (1) : $Re_E Re_T Y^{2.26} = 1.73,$
- (2) : $Re_E Re_T^{0.596} Y^{1.77} = 1.35,$
- (3) : $Re_E Re_T^{-1.44} Y^{-2.68} = 905$

4.2. Le contrôle de la fragmentation

Le contrôle de la fragmentation consiste en :

- savoir générer sur le jet une onde efficace, capable de couper le jet avant l'onde naturelle. L'expérience montre que les jets peuvent être excités en imprimant au disque un mouvement vibratoire de quelques micromètres d'amplitude selon son axe [Chicheportiche et al., 2004]. La condition supplémentaire à l'efficacité est que la distance de fragmentation forcée soit inférieure à la distance de fragmentation naturelle.
- savoir prédire le rayon R_g de la goutte, qui est directement lié au rayon R_j du jet au point de fragmentation. Comme les rayons des jets diminuent rapidement le long des abscisses curvilignes relatives, la prédiction du rayon R_g nécessite les modélisations du comportement du jet non perturbé et du comportement de l'onde sur le jet. Le modèle que nous avons développé s'inspire du modèle de Rayleigh établi pour les jets simples cylindriques, mais intègre la variation de rayon du jet en définissant une longueur d'onde locale.

Les études de propagation réalisées en envoyant un train d'ondes et en mesurant sa vitesse de propagation dans le jet ont permis de montrer qu'il se développe une onde capillaire purement progressive qui se propage à la vitesse $C+V_r$ où C est la vitesse de propagation dans un fluide au repos donnée par la formule de Lord Kelvin

$$C = \left(\frac{2ps}{rT} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ et } V_r \text{ est la vitesse débitante relative dans le jet. La longueur d'onde}$$

locale $I_e = (c + V_r)T$ est calculée avec la vitesse débitante locale (fig.7).

Le rayon de fragmentation est défini par la distance R_f du centre du disque à laquelle se fait la fragmentation. Il est lié à la longueur d'onde locale, à l'amplitude de la vibration initiale, au facteur d'amplification de l'onde lui-même fonction du liquide à disperser ainsi

qu'à la loi d'évolution du rayon du jet supposé non perturbé qui dépend du point de fonctionnement. La figure 8 montre la distance R_f prédite par la théorie locale et les résultats expérimentaux pour de l'eau et pour différentes amplitudes d'excitation du disque comprises entre 0.5 et 15 μm .

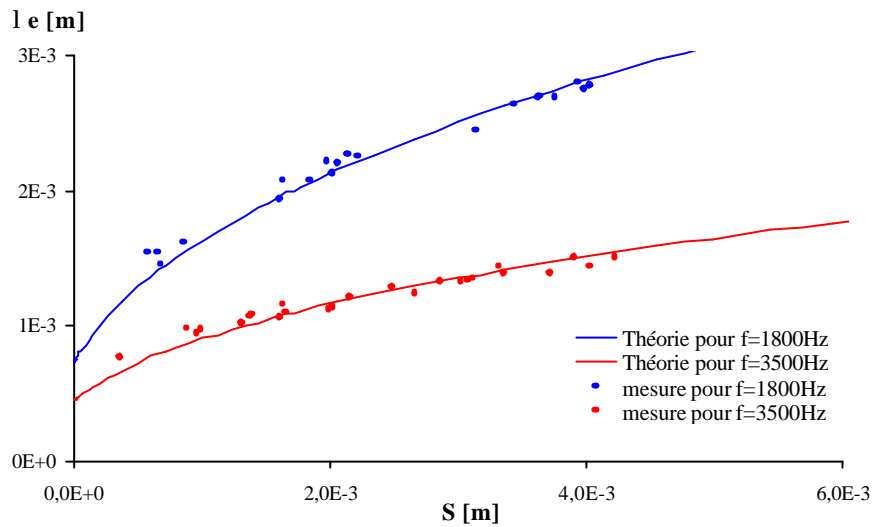


Fig.7. Variation de la longueur d'onde locale l_e en fonction de l'abscisse curviligne S pour deux fréquences d'excitation

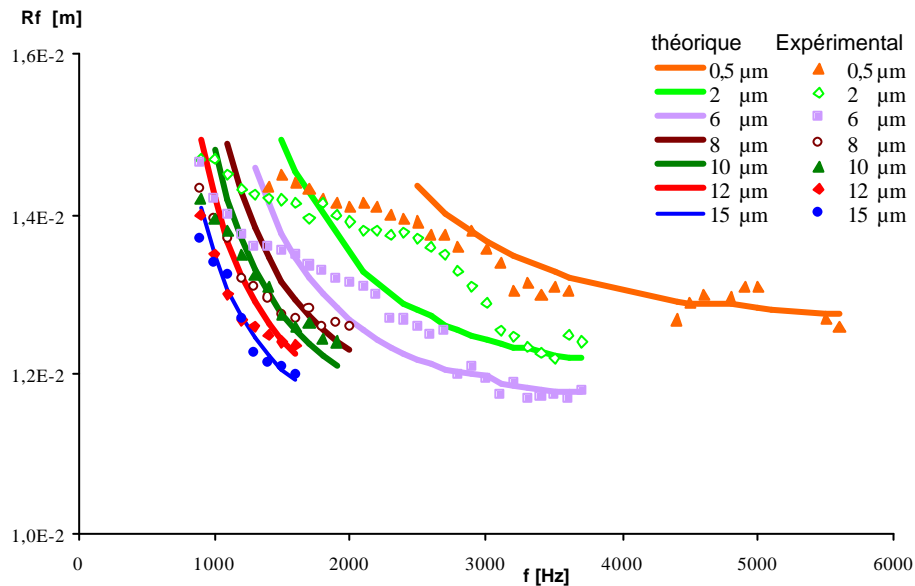


Fig.8. Evolution du rayon de fragmentation en fonction de la fréquence d'excitation et pour différentes amplitudes de vibration.

On peut observer sur ces courbes que, pour un point de fonctionnement donné, la distance de fragmentation et par suite le rayon des gouttes peuvent être modifiés par simple réglage de l'amplitude et surtout de la fréquence.



La connaissance du rayon R_g des gouttes nécessite la détermination du nombre de jets Z qui se forment naturellement sur les bords du disque lisse. Dans le cas des disques à bords lisses, $Z = 0.574 Y^{1/2} Re_T^{5/6}$ lorsque $0.0163 \leq Y \leq 0.621$ d'après Hinze [Hinze, Milborne, 1950]. Dans le cas de disques à bords dentés, on observe un phénomène d'accrochage des jets sur les dents, lorsque celles-ci sont suffisamment grandes (Fig.9). Le nombre de jets est alors égal au nombre de dents.

4.3. La monodispersion

Fig 9. Accrochage des jets aux dents

Le fait d'obtenir une fragmentation contrôlée n'entraîne pas nécessairement la formation à chaque période d'une seule goutte. Les dimensions relatives des gouttes principales et des satellites sont liées à la longueur d'onde locale. Lorsque celle-ci diminue, on observe une diminution progressive de la taille des satellites. Ils disparaissent lorsque la longueur d'onde locale devient inférieure à la longueur d'onde d'instabilité maximale.

5. le vibro-générateur rotatif

Il comprend trois parties (Fig.10):

- le dispositif d'alimentation composé d'une pompe (1) et d'un tuyau (2) débouchant au dessus du centre du disque,
- le disque (3) mis en mouvement de rotation par un moteur (4) et mis en vibration le long de son axe de rotation par un vibreur (5) placé entre le moteur et le disque. Le vibreur est une plaque encastree sur un bâti tournant excitée par une cellule piézo-électrique collée sur la face opposée à celle supportant le disque,
- les dispositifs de commande et de contrôle gérés par un ordinateur (6) comprennent :
 - la commande de la pompe d'alimentation et mesure du débit correspondant
 - la commande de la vitesse de rotation du moteur, de 0 à 20000 tours/minute et mesure de cette vitesse,
 - la commande de la fréquence, de 0 à 10000 Hz., et de l'amplitude de la vibration du disque, de 0 à 15 μm ,
 - le contrôle de la granulométrie réalisé par la prise de photographies (7) et un traitement d'images semi-automatique.

L'ensemble des opérations de commande et de contrôle sont faites automatiquement à partir d'un PC et de divers logiciels réalisés sous Labview., qui permettent (actuellement pour l'eau) de choisir les différents réglages à effectuer pour obtenir une granulométrie donnée en fonction du rayon du disque et du point de fonctionnement choisi. Ces logiciels assurent également la sécurité du système et notamment la fiabilité de la cellule piézo-électrique .

Le vibro-générateur, dans sa configuration actuelle, permet d'obtenir des aérosols monodispersés de diamètres supérieures à $50\ \mu\text{m}$ avec des débits allant de 1.5 à $4 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^3/\text{s}$ selon les diamètres avec des liquides ayant des viscosités inférieures à $50\ \text{mPas}^{-1}$ et des tensions superficielles comprises entre 20 et $80\ \text{N/m}$.

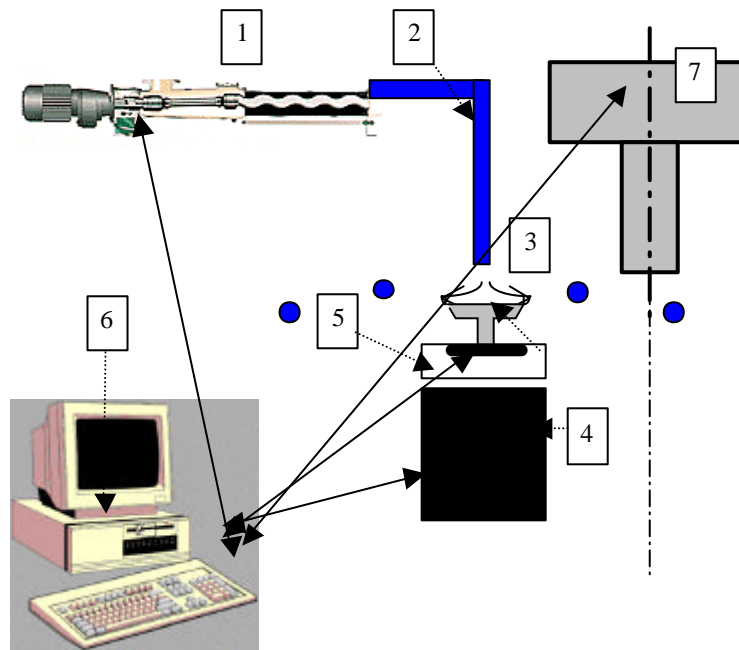


Fig.10. Dispositif expérimental de production d'aérosols contrôlés

6. Exemple de résultats de contrôle de gouttelettes

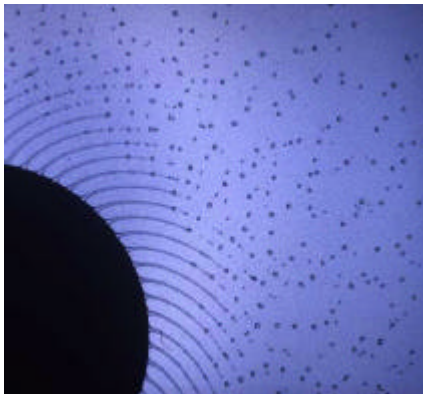


Fig.11. Exemple d'aérosol polydispersé

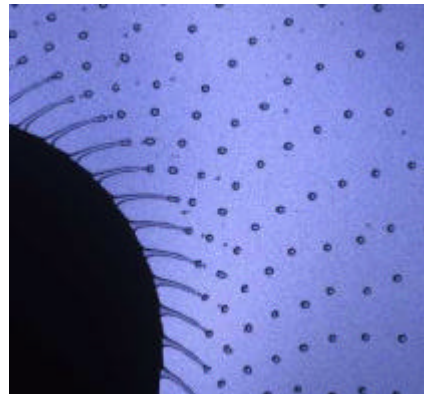


Fig.12 Exemple d'aérosol contrôlé

6. Conclusions

Selon le Comité français des Aérosols, la France produit chaque année 86 millions d'unités aérosols destinées au marché pharmaceutique et vétérinaire. Ce marché a été brutalement freiné par les restrictions apportées à l'utilisation des gaz propulsifs. Dans ce domaine particulier, qui représente 16% de la production française d'aérosols et où le liquide vaporisé n'est en général pas chimiquement neutre, la génération à partir de disques tournants d'aérosols contrôlés présente des avantages, à la fois sur le plan de l'efficacité du produit et du respect de l'environnement. Le contrôle nécessite à la fois la connaissance fondamentale du processus naturel de dégénérescence des gouttes et la maîtrise des technologies de vibrations. Le générateur que nous avons présenté n'est pas universel. Les principales limitations, qui concernent de façon liée débit et taille des particules, viennent de l'énergétique vibratoire. La diminution significative des tailles de gouttelettes passe par une augmentation de l'amplitude et/ou de la fréquence de vibration. Par ailleurs le processus d'amplification ou de non amplification des ondes sur les fluides très visqueux reste encore mal connu.

7. Références

- [Chicheportiche et al., 2004] Chicheportiche, J.M., Renaudeau, J.P., Zainoun, N., Atomiseur à disque tournant d'aérosols calibrés, demande brevet d'invention 0403679, 2004
- [Hinze JO, Milborn H, 1950] Atomization of liquids by mean of a rotating cup, J. Appl. Mechanics, june 1950
- [Leteurtrou, 1974] Dispersion fine d'un liquide à l'aide d'un disque en rotation, thèse de 3^{ème} cycle de l'Université Pierre et Marie Curie, 1974.
- [Lord Rayleigh, 1894] Theory of sound , 2nd Edition, Macmillan , London, 1894