

LE VIBRO-GENERATEUR D'AEROSOLS HOMOGENES

N. Zainoun, J.M. Chicheportiche, J.P. Renaudeau

Fluides et Applications

ESCPI-CNAM, 5 Bd Descartes, 77420 Champs sur Marne

fluides@escpi.cnam.fr

TITLE

The vibrating spinning disk

ABSTRACT

The production of heterogeneous drops with a high speed spinning disk results from a partially random natural instability which develops along the jets formed at the edge of the disk. When we impose an artificial disturbance to the liquid flow, the fragmentation of the jets is organized, finally, the size of the produced drops is controlled. A generator of monodispersed aerosols was developed, using as source of disturbance, a piezoelectric actuator imposing to the disk an axial periodic movement, or teeth symmetrically disposed at the periphery of the disk. The currently developed generator allows to produce droplets of diameters between 50 μm and 1 mm with a relative standard deviation less than 0.1. The flow rate, that is function of the drop size, goes from $0.5 \cdot 10^{-6}$ to $4.0 \cdot 10^{-6}$ m^3/s . The dynamic viscosity goes from 0 to $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}^{-1}$ and the surface tension goes from 20 to 80 N/m.

RESUME

La production de gouttes hétérogènes à partir de disques tournant à grande vitesse résulte d'une instabilité naturelle partiellement aléatoire qui s'amplifie le long des jets jusqu'à rupture de ceux-ci. L'excitation des jets par une perturbation contrôlée permet d'organiser la fragmentation et d'obtenir des aérosols homogènes. Un nouveau générateur d'aérosols monodispersé, utilisant comme source de perturbation, soit une cellule piézo-électrique imposant au disque un mouvement périodique axial, soit des dents symétriquement réparties à la périphérie du disque et dans son plan, permet de pulvériser des liquides dont la viscosité peut atteindre $50 \text{ mPa}\cdot\text{s}^{-1}$ et la tension superficielle est comprise entre 20 et 80 N/m ; les diamètres des gouttes peuvent varier entre 50 μm et 1 mm. Avec une déviation standard relative inférieure à 0.1. Les débits vont de $0.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ à $4 \text{ cm}^3/\text{s}$, en fonction de la taille des aérosols.

1. La génération naturelle d'aérosols à l'aide de disques tournant lisses dans la zone de formation de ligaments.

Lorsqu'on injecte un liquide au centre d'un disque tournant, celui-ci s'étale sur le disque et peut se disperser à sa périphérie selon trois processus différents : lorsque le débit est faible, on observe la formation de gouttes individuelles (fig.1), à débit moyen il se forme des ligaments qui se résolvent ensuite en gouttes (fig.2), enfin à grand débit, une nappe liquide s'étend au delà des limites du disque,



Figure 1 : formation de gouttes



Figure 2 : formation de ligaments

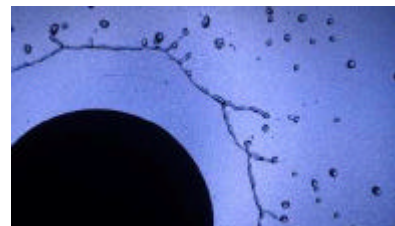


Figure 3 : formation de films

puis se résout directement en gouttes (fig.3). Les trois zones de fonctionnement ont été décrites par plusieurs auteurs, Hinze, Tanasawa, Matsumoto, Leteurtois, Chicheportiche et peuvent être caractérisées en fonction du rayon du disque R, de la vitesse angulaire ω du disque, du débit volumique q_v et des propriétés du fluide, viscosité dynamique μ , masse volumique ρ et tension superficielle σ par trois nombres sans dimension : $Re_E = \frac{r q_v}{R m}$, $Re_T = \frac{r \omega R^2}{m}$ et $Y = \frac{m}{\sqrt{r s R}}$ (fig.4).

$$Re_E = \frac{r q_v}{R m}, \quad Re_T = \frac{r \omega R^2}{m} \quad \text{et} \quad Y = \frac{m}{\sqrt{r s R}} \quad (\text{fig.4}).$$

La zone la plus intéressante est la zone de formation de ligaments, à laquelle nous nous intéressons ici. Dans une représentation $Re_E = f(Re_T)$, utilisant les coordonnées logarithmiques, cette zone peut être représentée d'après Leteurtois pour chaque valeur de Y par un triangle limité par les trois droites d'équations $Re_E Re_T Y^{2.26} = 1,73$, $Re_E Re_T^{0,596} Y^{1,77} = 1,35$ et $Re_E Re_T^{-1,44} Y^{-2,68} = 905$. Dans cette zone, la dégénérescence des ligaments en gouttes résulte d'une instabilité naturelle, semblable à celle décrite pour les ligaments simples issus d'un orifice, qui se propage et s'amplifie le long du jet jusqu'à le couper et former à chaque période une ou plusieurs gouttes. Comme on peut le remarquer

facilement sur la figure 2, les ligaments, dont le nombre est donné par $Z = 0.853 Y^{0.32} \frac{Re_t^{7/9}}{\sqrt{Re_E^{18}}}$, sont

reproductibles, mais ne sont pas cylindriques et la coupure ne se fait pas à égale distance du bord du disque. Il en résulte donc un aérosol polydispersé constitué en général d'une goutte principale et de petites gouttes appelées satellites.

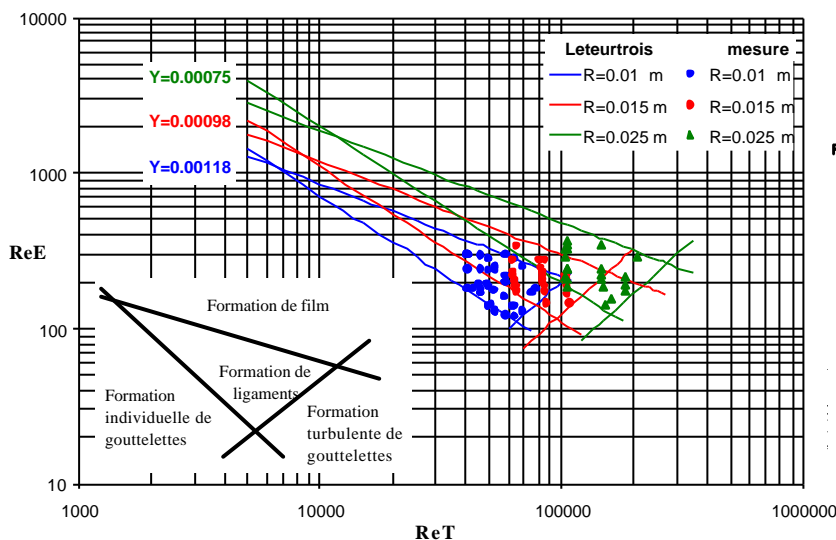


Figure 4 : zones de formation de ligaments pour différentes valeurs de Y

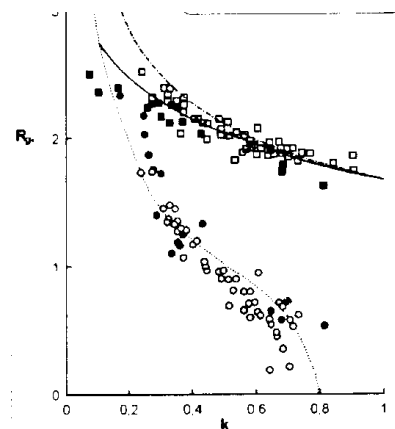


Figure 5 : répartition des gouttes principales et des satellites en fonction du nombre d'onde k

Dans le cas où il se forme une seule goutte par jet à chaque période T de la vibration, le rayon de la

goutte se déduit de l'équation de conservation de la masse et vaut $R_g = \left[\frac{3q_v T}{4pZ} \right]^{1/3}$.

2. La génération contrôlée d'aérosols

L'homogénéité de l'aérosol nécessite que deux conditions soient simultanément réunies :

- le point de coupure des ligaments doit se faire à une même distance du bord du disque pour tous les ligaments. Il se forme alors à chaque période et sur chaque jet une, deux ou plusieurs gouttes identiques pour tous les ligaments, mais de tailles différentes pour chaque jet.
- La condition de coupure doit être telle qu'il se forme à chaque période et sur chaque jet une seule goutte ou plusieurs gouttes de tailles identiques. Comme le montre la figure 5 reprenant les résultats de Rutland et Lafrance dans le cas des ligaments cylindriques, la taille relative des

gouttes principales et des satellites et la présence ou non de ces satellites dépend du nombre d'onde adimensionnel $k = 2\pi \frac{a}{\lambda}$ où a est le rayon du jet et λ est la longueur d'onde, fonction de la vitesse relative de l'écoulement dans le jet V , de la vitesse de propagation de l'onde c et de la période de la vibration T selon la loi $I = (c + V)T$.

Le contrôle de la taille des gouttes nécessite donc le contrôle de la fragmentation, c'est à dire de la vibration qui se propage et s'amplifie sur les ligaments. Comme l'instabilité naturelle n'est pas contrôlable, une méthode consiste à créer une vibration artificielle, reproductible qui est efficace si :

- elle a une amplitude et une fréquence suffisantes pour rompre les ligaments avant l'instabilité naturelle.
- elle remplit la condition de valeur du nombre d'onde adimensionnel pour avoir un aérosol contrôlé, mono, bi ou pluridispersé.

2.1. La génération de la vibration

Plusieurs méthodes sont possibles :

2.1.1 La génération par excitation du liquide sur le disque

Le brevet 914006218 décrit des moyens perturbateurs créant des vibrations sur le liquide au niveau du tube ou de l'orifice d'alimentation ou plus généralement au niveau de la région centrale de l'écoulement sur l'orifice. ce brevet revendique également la possibilité de perturber les ligaments mécaniquement en créant des obstacles concentriques sur le disque. Le générateur de vibration décrit est un générateur électrodynamique muni à son extrémité d'un petit cylindre creux, qui affleure la surface libre du liquide autour du tuyau d'alimentation.

2.1.2. La génération par excitation du disque

Dans le dernier générateur d'aérosols homogènes que nous avons développé (fig. 6), les ligaments sont excités en faisant vibrer le disque (1) le long de son axe de rotation. Le vibreur, tournant à la même vitesse que le disque, est composé d'une plaque encastrée (2) sur un bâti (3) placé entre le moteur d'entraînement (4) du disque et le disque. Cette plaque est déformée par une cellule piézo-électrique (7) excitée à une fréquence et une amplitude convenables par un générateur alternatif.

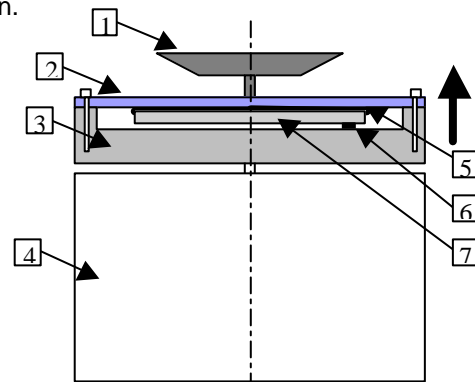


Figure 6 : le vibro-générateur

2.1.3. La génération par disques dentés

Sur les disques à bords lisses, les ligaments tournent à une vitesse angulaire ω_l légèrement plus faible que la vitesse angulaire ω du disque. L'insertion de dents à la périphérie du disque a deux effets selon les dimensions relatives des dents et des diamètres des ligaments :

- Si les dimensions des dents sont comparables aux diamètres des ligaments, on assiste à un phénomène d'accrochage, caractérisé par le fait que le nombre de ligaments devient égal au nombre de dents et la vitesse de rotation des ligaments devient égale à la vitesse de rotation du disque. La présence de dents et l'existence du phénomène d'accrochage ne changent pas les mécanismes de dégénérescence mais modifient quelque peu les plages de fonctionnement (fig.7). Elle présente l'avantage de connaître exactement le nombre de ligaments et de diminuer l'incertitude sur la détermination du rayon des gouttes.
- Si les dimensions des dents sont petites, elles ne permettent pas l'accrochage des ligaments qui glissent sur les dents, mais on constate une organisation de l'écoulement dans les ligaments et de la dégénérescence en gouttes semblable à celle existant avec une vibration. Cette organisation provient du fait que si les dents n'arrivent pas à accrocher les ligaments, elles les perturbent au passage. Si la vitesse de glissement est définie par $w_g = w - w_j$ et Z_d est le nombre de dents, la

fréquence de vibration créée par les dents est $F = \frac{w_g Z_d}{2p}$. Cette méthodologie est très

intéressante, car elle est beaucoup plus simple à mettre en œuvre, ne nécessitant pas de faire vibrer le disque. Elle reste cependant limitée d'une part parce qu'à vitesse de rotation donnée correspond une vitesse de glissement et donc une fréquence, d'autre part parce que l'amplitude de l'excitation est liée à la forme des dents. Cet appareil ne peut avoir qu'un point de fonctionnement pour une vitesse de rotation donnée et ne donne qu'une taille de goutte définie à l'avance. Par ailleurs le glissement des ligaments est une fonction décroissante de la viscosité. Il s'ensuit que la fréquence d'excitation, égale au produit du nombre de dents par la vitesse de glissement devient trop faible pour obtenir la monodispersion.

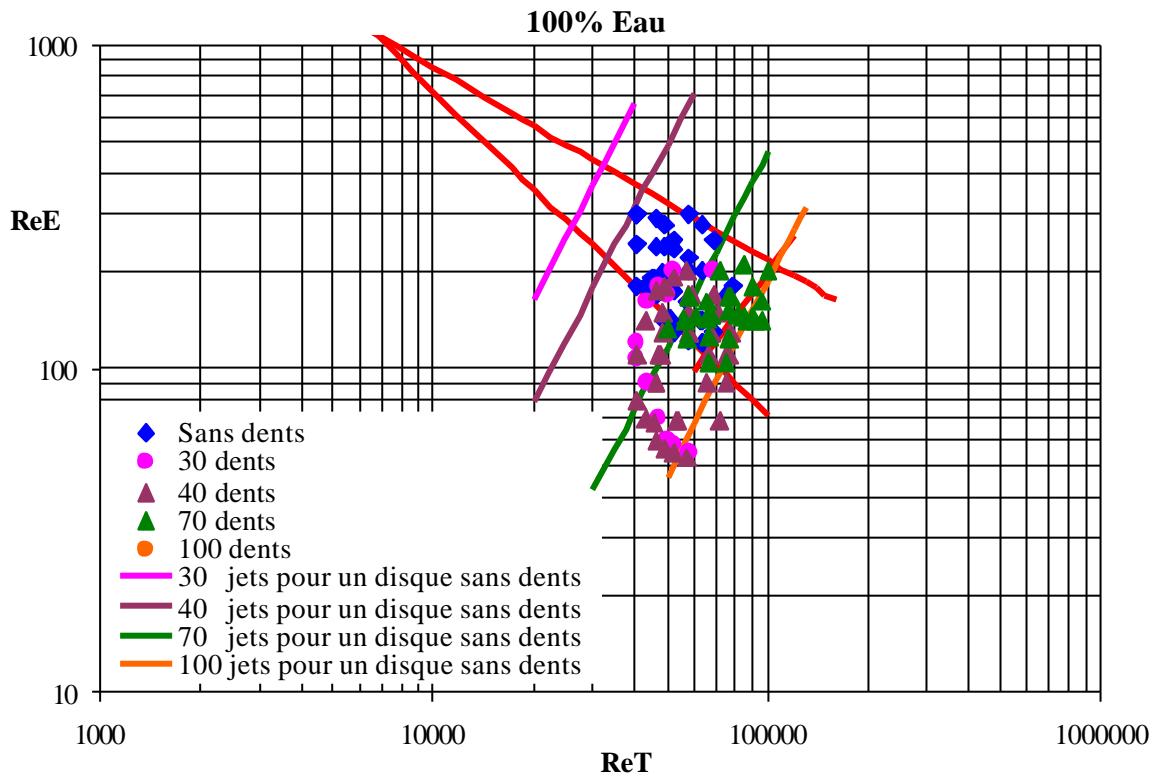


Figure 7 : zone de fonctionnement pour un disque lisse et différents disques dentés avec accrochage des jets

3. Le vibrogénérateur d'aérosols

3.1. Les différents éléments

Le vibrogénérateur comporte trois grandes parties :

Le dispositif d'alimentation du disque en liquide : Il comprend une pompe, un réservoir et un tube d'alimentation. L'alimentation du liquide se fait au dessus du disque et près de celui-ci. Dans cette configuration, le tube d'alimentation doit être positionné perpendiculairement au disque rotatif vibrant et suivant l'axe de rotation. Sa longueur et son diamètre sont calculés de telle façon que l'écoulement soit établi et que le nombre de Reynolds soit très faible ($Re < 50$). De plus, l'extrémité du tube est soigneusement usinée pour ne pas perturber l'écoulement sur la surface de disque. Le bon centrage du tube d'alimentation par rapport au disque est essentiel pour la monodispersion. Il est assuré par un système micrométrique tridimensionnel, permettant de régler la verticalité de tube d'alimentation, puis le centrage.

Le disque de pulvérisation et le vibreur : le disque est l'élément central du dispositif expérimental, son diamètre D et sa vitesse de rotation w sont déterminés par les lois reliant ces grandeurs à la taille

des gouttes. Le disque doit faire l'objet d'un usinage précis concernant la planéité de la surface, l'état des bords et le centrage par rapport à la rotation.

Trois types de disques sont utilisés :

- Des disques à bords lisses, (figure 8).
- Des disques à grandes dents (figure 9).
- Des disques à petites dents (figure 10).



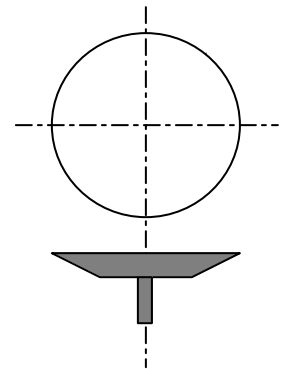
Figure 8



Figure 9



Figure 10



Les dispositifs de commande et de mesure : La visualisation et la mesure de la granulométrie sont réalisées à partir de photographies des jets et gouttes. Les différentes commandes et contrôles concernent le débit, la vitesse de rotation du disque, l'amplitude et la fréquence de la vibration, le flash et l'appareil photographique. Ils sont automatisés sous Labview.

3.2. Les performances du générateur

Le vibro-générateur actuellement développé permet de fabriquer des gouttes de diamètres compris entre 50 μm et 1 mm avec une déviation standard relative < 0.1 . Le débit, qui est fonction de la taille des gouttes, va de $0.5 \cdot 10^{-6}$ à $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$. Des liquides de viscosité dynamique allant de 0 à 50 mPaS^{-1} et des tensions superficielles de 20 à 80 N/m peuvent être ainsi atomisés. La figure 11 montre un exemple d'aérosol contrôlé par mise en vibration du disque ; la figure 12 montre un exemple d'aérosol contrôlé par le glissement des jets sur les dents à la périphérie du disque.

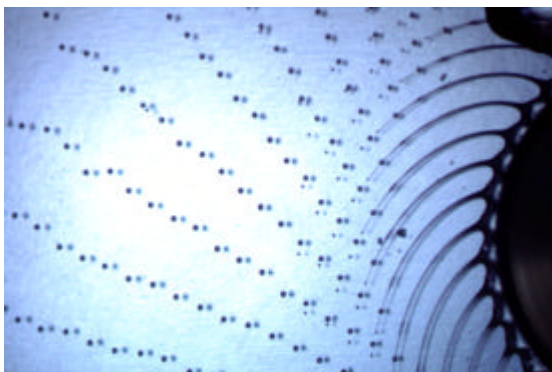


Figure 11 : jets perturbés par une vibration d'amplitude 12 μm et de fréquence 1800 Hz

$R=0,01\text{m}$, $N=44,4 \text{ t/s}$, $Q=1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$, $Z_j=40$,
 30% eau + 70% glycérine : $r=1195 \text{ kg/m}^3$,
 $\mu = 0.026 \text{ PaS}^{-1}$, $s=65 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

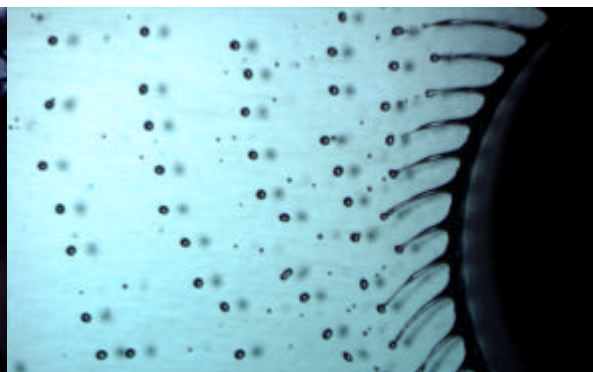


Figure 12 : jets perturbés par des petites dents ; profondeur 100 μm , $Z_d=150$

$R=0,01\text{m}$, $N=78,47 \text{ t/s}$, $q_v=1,95 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, $Z_j=54$
 Eau : $r=1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.001 \text{ PaS}^{-1}$, $s=72 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$.

4. La comparaison avec les générateurs à orifices vibrants

Les principaux appareils permettant d'avoir des aérosols monodispersés sont les dispositifs à orifice vibrant. Les principes conduisant à la fragmentation naturelle ou commandée sont très semblables

dans le cas des orifices vibrants et des disques vibro-rotatifs. La principale différence vient du fait que l'action de la force de pesanteur est remplacée par celle de la force d'inertie centrifuge. Il s'en suit des qualités granulométriques comparables. Le dispositif à disque tournant présente cependant trois particularités importantes :

- il produit simultanément de 30 à 100 jets et offre donc des débits beaucoup plus importants. Des dispositifs à orifices multiples sont cependant développés et permettent d'améliorer les débits des orifices.
- Dans les dispositifs à orifice vibrant, les jets sont quasiment cylindriques et le diamètre des gouttes est environ deux fois celui de l'orifice. Les jets issus des disques ont des diamètres qui diminuent rapidement en s'éloignant du disque. La taille des aérosols est largement dépendante de la distance de fragmentation, qui peut être modifiée en faisant varier l'amplitude et la fréquence de vibration. Il est donc possible de modifier la granulométrie, dans un rapport 1 à 6, par simple modification des réglages.
- Les dispositifs à orifice vibrant sont limités par la présence des orifices, d'autant plus difficiles à usiner qu'ils sont petits et présentant toujours un risque de bouchage en présence d'impuretés.

5. Les voies de développement

Deux principales voies nous paraissent prioritaires :

- Nos résultats montrent que les fluides très visqueux sont plus difficiles à rompre et que des phénomènes d'instabilités de jets peuvent apparaître ; les études commencées pour la compréhension de ce phénomène doivent se poursuivre.
- La limite actuelle vers les petits diamètres et/ou les grands débits doit être reculée en adaptant la technologie.

6. Références

Hinze J.O., Milbourn H., Atomization of liquids by means of a rotating cup, J. Appl mechanics, june 1950.

Tanasawa Y., Miyasaka., Umehara M., Trans. Soc. Mech. Engng. Japan, 25, 879, 888 , 897, 1959

Matsumoto S., Saito K., Takashima Y., Phenomenal transition of liquid atomization from disk, J. Chem. Engng, Japan, Vol. 7, N°1, 1974.

Leteurtrois J.P., 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.

Chicheportiche J.M., Etude de la fragmentation commandée des jets liquide issus de disques en rotation et réalisation d'un générateur de gouttelettes monodispersées. Thèse de Docteorat de l'université Pierre et Marie Curie, 1993.

Chicheportiche, J.M., Renaudeau, Dispositif générant avec un débit élevé un aérosol monodispersé, brevet europeen 91400621.8 , 1991.

Chicheportiche, J.M., Renaudeau, J.P., Zainoun, N., Atomiseur à disque tournant d'aérosols calibrés, demande brevet d'invention 0403679, 2004.

Rutland D.F. , Jameson G.J., Theoretical prediction of the sizes of drops formed in breakup of capillary jets, Chem Eng. Sci. Vol 25, pp 1689-1698, 1970.

Lafrance P. Non linear breakup of laminar liquid jet, Phys Fluids, Vol 18, N°4, April 1975.