

## MODELISATION DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES A PHASE DISPERSEE : APPLICATION AUX SYSTEMES PROPULSIFS

G. Lavergne\*, P. Berthoumieu+\*

\*, +\*ONERA Centre de Toulouse, DMAE, unité Multiphasique Hétérogène

\*Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'espace  
02 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.  
Tél : 0562252835

### Résumé :

*La modélisation des écoulements diphasiques dans les chambres de combustion, développée à l'ONERA/DMAE, est basée sur l'approche Euler/Lagrange, Euler pour la phase gazeuse, Lagrange pour la phase liquide. Différents modèles associés au comportement des gouttes de carburant ont été élaborés et intégrés dans un module de simulation numérique. Ces modèles concernent, la pulvérisation, la dispersion turbulente, l'évaporation, les interactions gouttes/paroi, l'allumage et les interactions entre phase (gaz, liquide). Le module diphasique permet de calculer de nombreuses configurations de zones d'écoulement diphasique dans les turbomachines, statoréacteurs, moteurs fusée, moteur à piston ou autre foyer industriel. Des études approfondies sont actuellement conduites sur la modélisation : - de la fragmentation primaire d'un jet liquide, - des zones denses en gouttes, - des aspects instationnaires des écoulements diphasiques et de l'allumage d'un brouillard.*

### Abstract :

*Two phase flow modelling in combustion chambers, developed at ONERA/DMAE, is based on the Euler/Lagrange approach, respectively for the continuous and dispersed phases. Different models linked to the behaviour of a liquid fuel droplet have been elaborated, and integrated in a numerical simulation module. These models concern liquid jet break up, droplet turbulent dispersion, evaporation, droplet wall interactions, auto-ignition, and interactions between the two phases (liquid and gas). The two phase flow module now permits to calculate numerous configurations, from ramjet to turbojet, as well as for space propulsion, internal combustion engines, or any industrial burner. Improved studies are now lead on the modelling of : - primary break up, - dense zones in two phase flow, - unsteady aspects of the two phase flow and spray ignition.*

### Mots clés :

**Écoulements diphasiques, modélisation, chambre de combustion**

## 1 INTRODUCTION

Les recherches conduites à l'ONERA/DMAE concernent les écoulements diphasiques à phase dispersée. Elles trouvent principalement leurs applications, à l'ONERA, dans la simulation des écoulements diphasiques de chambres de combustion de systèmes propulsifs. En combustion aérobie, la phase continue est composée d'air, et la phase dispersée est formée de gouttes de carburant liquide. En propulsion spatiale, le comburant peut être un autre liquide pulvérisé (moteur bi-ergols) ou de l'hydrogène gazeux (moteur cryogénique) ou une

composition de gaz (moteur à propergol solide). Les différents processus physiques liés à la présence de gouttelettes peuvent être décrits chronologiquement depuis l'injection jusqu'à la combustion (figure 1). Tout d'abord, le jet liquide continu issu des injecteurs sera désintégré en ligaments (fragmentation primaire) puis, sous l'effet des forces aérodynamiques, en un brouillard de gouttes (pulvérisation secondaire). Ensuite, au sein de ce brouillard, les gouttes interagissent (coalescence), tout en étant transportées par l'écoulement gazeux (dispersion turbulente). En aval, lorsque la densité de gouttes devient plus faible, le comportement de ces dernières se rapprochera de celui d'une goutte isolée. On pourra alors considérer le mouvement d'une goutte, en particulier sa dispersion par les structures turbulentes, son évaporation, l'interaction avec une paroi et la pulvérisation secondaire par les forces aérodynamiques.

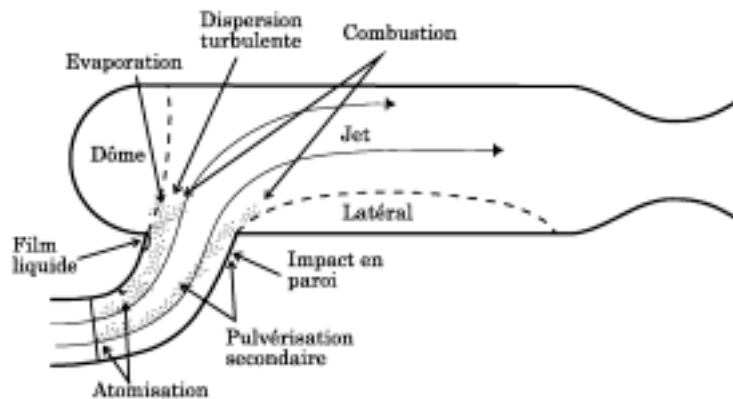


Fig. 1 : Phénomènes physiques relatifs à la phase liquide dans une chambre de combustion de statoréacteur.

La méthodologie adoptée au DMAE pour la modélisation de chacun des processus mentionnés ci-dessus est de procéder en différentes étapes : réalisation d'expériences de base pour l'aide à l'élaboration de modèles, validation des modèles sur des expériences en conditions plus réalistes et intégration de ces modèles dans le module diphasique.

Pour la modélisation des écoulements à phase dispersée, l'approche qui est retenue au DMAE est une approche eulérienne lagrangienne (figure 2). L'écoulement gazeux est considéré comme une phase continue, simulée avec une approche eulérienne (code MSD). La phase liquide est composée d'un ensemble de gouttelettes, dont on calcule les trajectoires avec une approche lagrangienne (code SPARTE)[1, 2, 3]. Cette modélisation est adaptée pour le type de configurations où la phase dispersée peut être considérée comme diluée, en aval des systèmes d'injection. De plus, elle permet une richesse de modélisation basée sur l'étude du comportement d'une goutte isolée qui est directement utilisable.

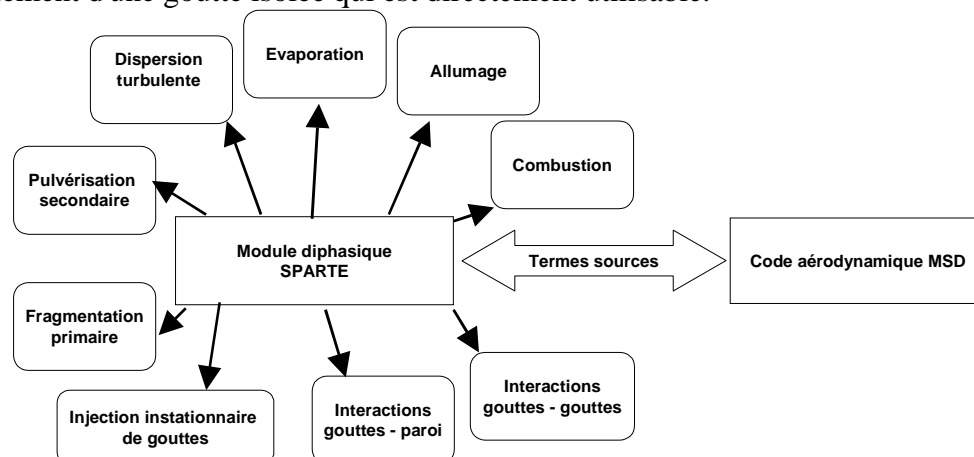


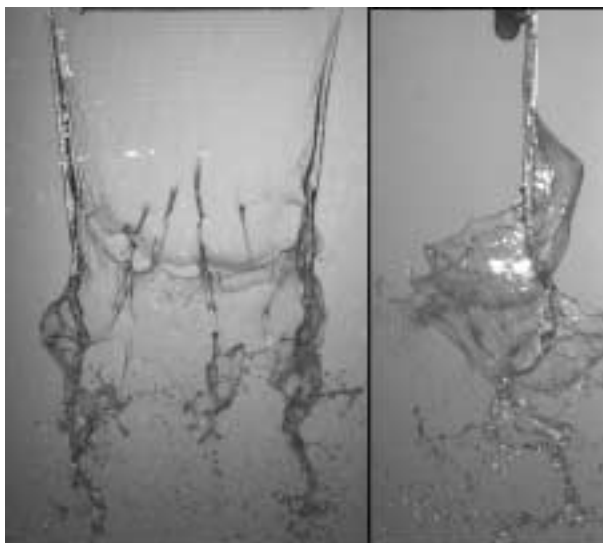
Fig. 2 : Méthodologie de calcul, organigramme du module diphasique SPARTE

L'objet de cet article est avant tout de faire un état de l'art de la modélisation des écoulements diphasiques à phase dispersée rencontrés en propulsion, et de mettre en évidence les problèmes encore non résolus pour lesquels un effort particulier doit être effectué.

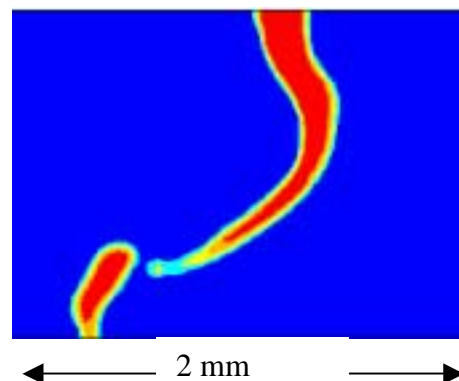
## 2 MODÉLISATION DE LA PHASE LIQUIDE

### 2.1 Fragmentation primaire

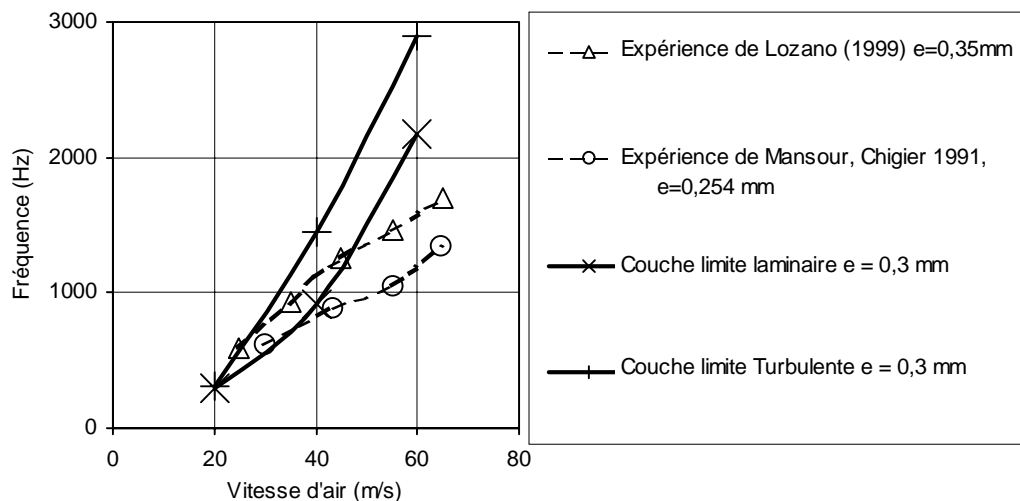
Dans la modélisation de la phase liquide, le phénomène de fragmentation de jet ou de nappe est prépondérant; il constitue en effet la première phase correspondant à la formation des gouttes. Les caractéristiques du brouillard de gouttes formé sont déterminantes puisqu'elles représentent les conditions initiales de la phase liquide. Tous les travaux de simulation numérique des écoulements diphasiques réalisés à ce jour ont montré l'importance primordiale d'une connaissance très précise de la granulométrie des brouillards sur la prédiction des performances d'une chambre de combustion. La complexité de ce processus physique rend la modélisation très ardue, et à ce jour, aucun modèle satisfaisant ne peut être utilisé. De nombreuses études visant à améliorer la compréhension des phénomènes physiques sont réalisées actuellement. On peut par exemple citer les travaux sur l'instabilité de nappes liquides avant sa désintégration, à partir d'une approche de stabilité linéaire [4]. Un exemple de visualisation de la désintégration d'une nappe liquide plane est donné sur la figure 3a. On peut observer les différents types d'instabilités présents sur ce type de configurations, qui conditionnent la pulvérisation de la nappe en gouttes. D'autres travaux, basés sur le formalisme de maximum d'entropie sont aussi réalisés [5]. Cette méthode reste encore très empirique, à cause de ses nombreux degrés de liberté. Une approche plus récente de suivi d'interface (VOF : Volume Of Fluid) donne des résultats encourageants. Des calculs réalisés en 2D (figure 3b, 3c) sur une nappe liquide donnent des fréquences de battement en bon accord avec l'expérience, à condition de bien simuler le cisaillement aérodynamique au niveau des interfaces gaz-liquide [6]. On peut enfin citer de nombreuses corrélations empiriques qui permettent d'obtenir des résultats sur des grandeurs moyennes du brouillard de gouttelettes [7].



3a : Visualisation de la désintégration d'une nappe liquide plane.



3b : Simulation numérique de l'instabilité de la nappe (Approche VOF 2D)



### 3c : Comparaison expérience – simulation VOF sur la fréquence de battement de la nappe

Fig. 3 : Désintégration d'une nappe liquide plane.

Dans l'état actuel des connaissances de la pulvérisation, la prédiction des caractéristiques d'un brouillard issu d'un injecteur est impossible. Un effort de recherche important devra être consacré à ce thème, surtout sachant l'importance cruciale de ces caractéristiques qui représentent les conditions initiales de toute simulation d'écoulement diphasique. L'utilisation de données expérimentales détaillées (obtenues par technique Phase-Doppler) permet de contourner cet obstacle, mais sont à l'heure actuelle trop coûteuses pour envisager une utilisation industrielle.

## 2.2 Dispersion turbulente

Après leur formation, les gouttes sont transportées et dispersées par l'écoulement turbulent instationnaire. Les effets de la turbulence sur ce transport doivent être reproduits. De nombreuses études ont été réalisées, et ont montré l'importance des échelles caractéristiques de la turbulence et du temps de relaxation des gouttes sur le phénomène de dispersion [8,9,10]. En effet, comme on peut le voir sur la figure 4, les gouttes peuvent être capturées par les structures turbulentes ou bien les traverser rapidement.

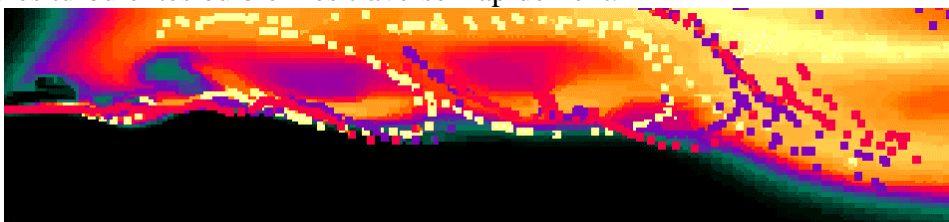


Fig. 4 : Dispersion de gouttes par des structures turbulentes.

La modélisation, qui doit reproduire cette interaction goutte-structure turbulente, dépend fortement de la méthode de simulation de l'écoulement gazeux. Dans le cas d'une simulation instationnaire de l'écoulement turbulent (DNS ou LES) calculant toutes les échelles significatives de l'écoulement, il suffit de déterminer la trajectoire des gouttes à l'intérieur de ces structures. Par contre, avec une modélisation de l'écoulement moyen (approche de type  $k-\epsilon$ ), il faudra recréer les fluctuations turbulentes et instationnaires de vitesse. Différents modèles stochastiques ont été développés [1]. Les résultats obtenus sur un grand nombre de configurations bidimensionnelles permettent de bien retrouver les caractéristiques moyennes de la dispersion. On peut toutefois noter d'une part le manque de validation des modèles de dispersion sur des configurations tridimensionnelles complexes, et d'autre part la difficulté de

modéliser la turbulence par une approche de type k- $\epsilon$  qui sera aussi une source d'erreurs pour la dispersion des gouttes.

### 2.3 Evaporation

La modélisation de l'évaporation d'une goutte est étudiée depuis de nombreuses années [11, 12, 13]. Au cours de son évaporation, une goutte subit des échanges de chaleur et de masse avec l'écoulement gazeux. Ces échanges sont très sensibles aux différents paramètres du gaz et du liquide. En particulier, la convection et les propriétés physiques auront une influence significative sur le taux d'évaporation. Différents modèles, basés sur des hypothèses simplificatrices ont été élaborés. Leur validité est directement liée à la vérification de ces hypothèses. On peut par exemple noter, sur la figure 9b, que l'interaction entre les gouttes d'un jet monodisperse modifie radicalement leur évaporation. En effet, les transferts de masse et de chaleur sont diminués à cause de la proximité des autres gouttes. De plus, dans le cas d'un environnement à haute pression et à haute température, les phénomènes physiques liés au point critique rendent encore plus complexe l'étude de l'évaporation. Enfin, dans le cadre d'application de chambres de combustion, le carburant utilisé est très rarement monoespèce. Il importera alors de modéliser les différents transferts entre les espèces.

La figure 5 présente l'évolution de la température à l'intérieur et à la surface d'une goutte et le taux d'évaporation correspondant pour trois modèles d'évaporation.

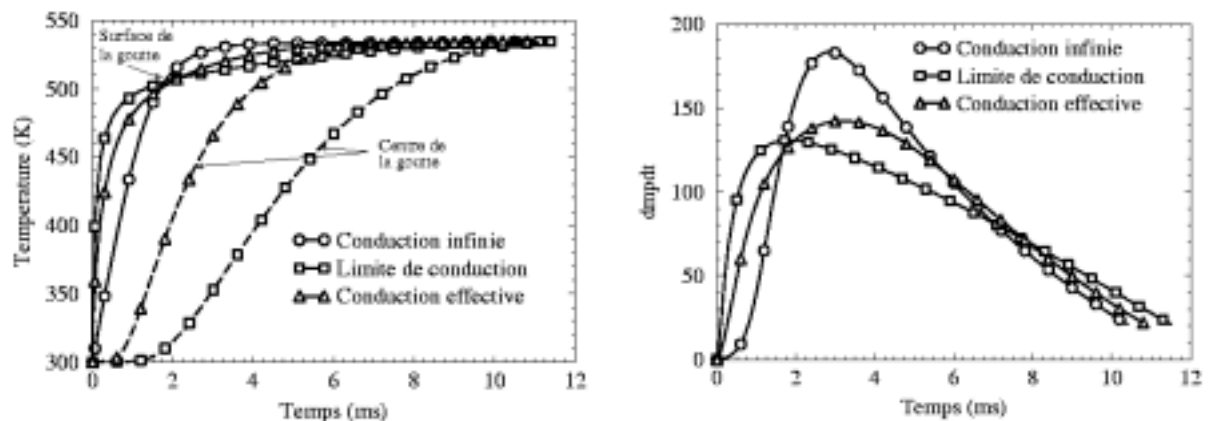
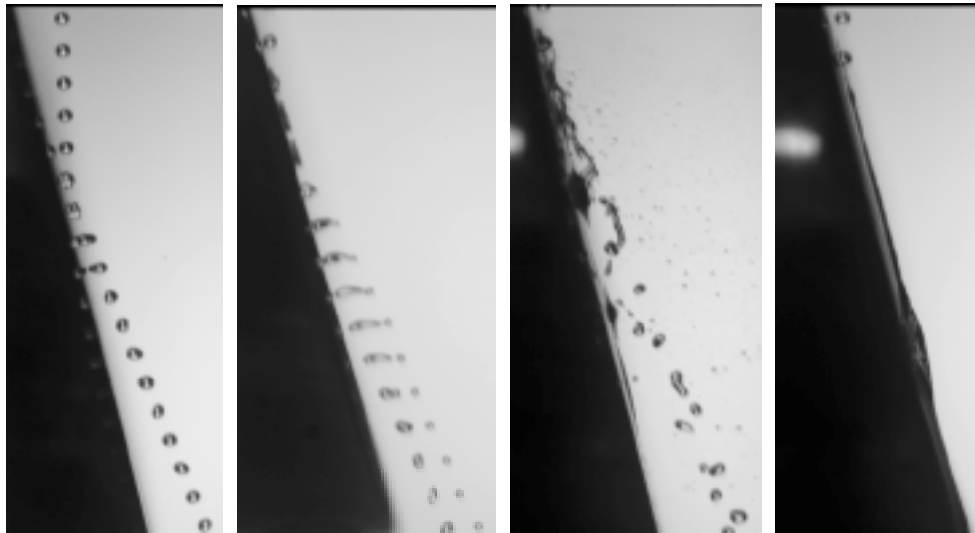


Fig. 5 : Exemple de résultats sur la comparaison de trois modèles d'évaporation.

### 2.4 Interaction goutte paroi

Les différents régimes d'interaction entre une goutte et une paroi sont très variés, et dépendent majoritairement de la taille, de la vitesse et des propriétés physiques de la goutte, de l'état de la surface de la paroi (température, rugosité), et de la présence ou non d'un film liquide. Les processus physiques observés peuvent être classés (figure 6a) en fonction de plusieurs paramètres adimensionnels, tels que le nombre de Weber d'impact, le nombre d'Ohnesorge, le paramètre de surchauffe, et les paramètres de rugosité et d'épaisseur de film [14,15, 16].



Rebond      Création d'un satellite      Désintégration      Dépôt

Fig. 6a : Régimes d'impact de gouttes sur une paroi chaude

Une classification de ces régimes est présentée dans un diagramme ( nombre d'Ohnesorge, nombre de Reynolds, figure 6b). Le rebond, qui sera surtout observé dans le cas d'une paroi chaude, le dépôt partiel ou total seront les principaux régimes d'interaction. Différents modèles ont été élaborés à partir des caractérisations expérimentales de l'ONERA/DMAE [17].

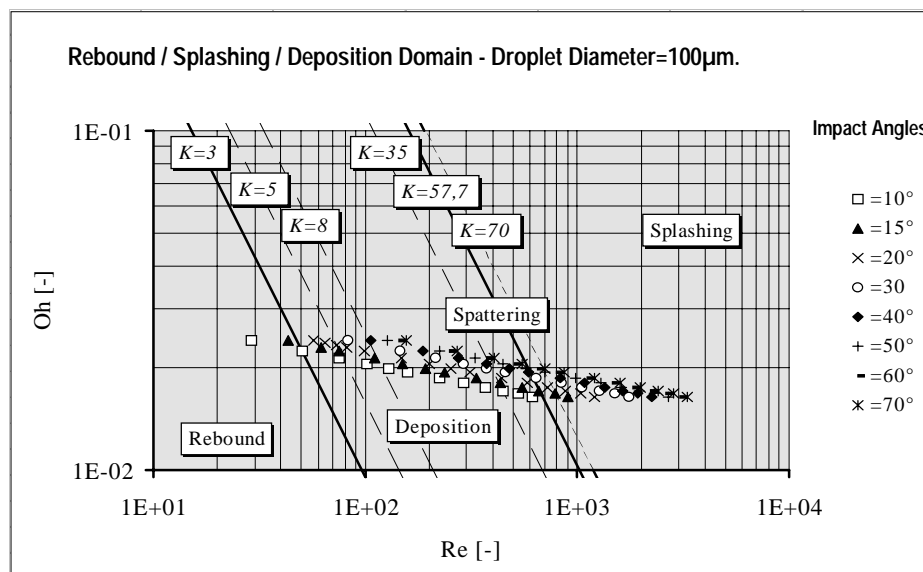


Fig. 6b : Classification des différents régimes d'impact.

Des travaux de recherche sur l'interaction de gouttes en présence d'un film liquide se poursuivent actuellement. En particulier, le phénomène d'arrachage de gouttes par le cisaillement de l'écoulement gazeux est un point qui peut être crucial pour la connaissance de la répartition du liquide dans un système d'injection et dans une chambre de combustion (remontée de flamme, inflammation spontanée).

## 2.5 Jets denses

L'hypothèse d'écoulement diphasique dilué sert de base pour l'approche Euler/Lagrange. On peut noter que cette hypothèse est mise en défaut dans certaines zones d'une chambre de combustion. En particulier, près des injecteurs, la densité du brouillard de gouttes est très

élevée, ce qui se traduit par de nouveaux phénomènes physiques liés aux interactions entre gouttes. Les principaux aspects à prendre en compte sont alors les collisions entre gouttes, qui conduisent à une augmentation du phénomène de pulvérisation secondaire, et les modifications des régimes d'évaporation et de transport des gouttes. La complexité de ces phénomènes rend les modélisations difficiles, certains aspects pouvant être abordés à partir d'expériences de base telles que l'étude de la collision de gouttes (figure 7a), puis intégrés dans des codes de simulation [18]. D'autres aspects, comme la modélisation de l'influence du sillage des gouttes autour d'une goutte de référence sur la traînée et sur le taux d'évaporation, sont encore difficiles à appréhender sur le plan de la simulation numérique, mais ont fait l'objet de nombreux travaux au DMAE [19, 20]. L'influence du paramètre de distance (C rapport entre la distance moyenne entre gouttes et la taille moyenne des gouttes) sur le coefficient de traînée est bien mis en évidence sur la figure 7b.

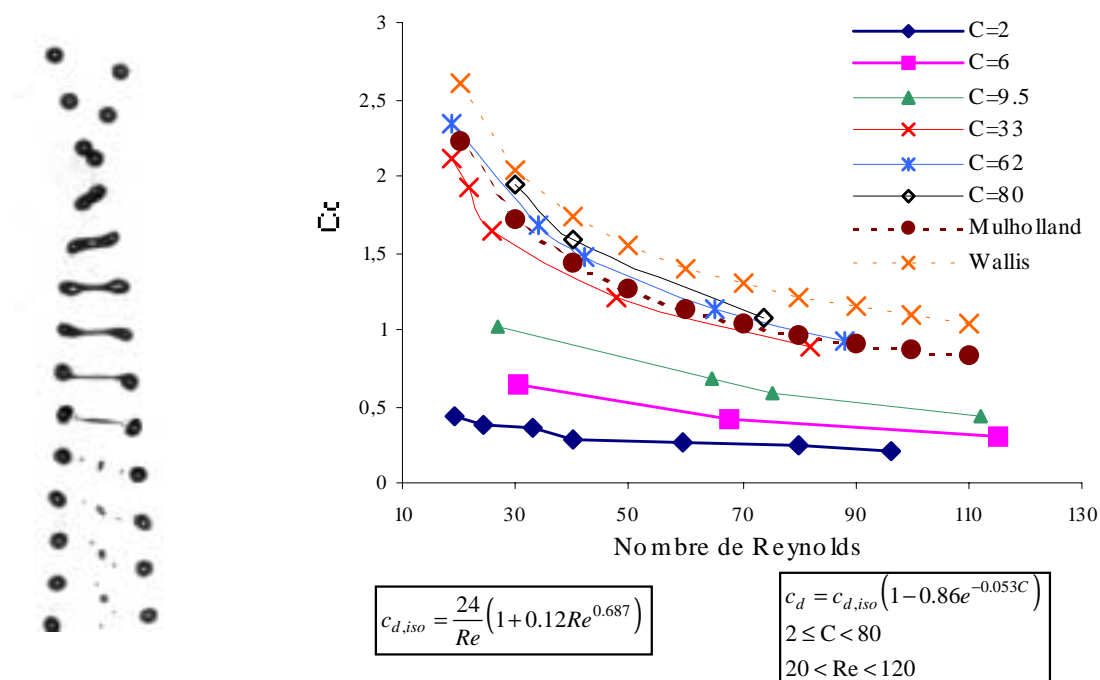


Fig. 7a : Collision de deux trains de gouttes monodisperses.

Fig. 7b : Evolution du coefficient de traînée avec le nombre de Reynolds et le paramètre de distance (C)

L'augmentation de la taille des gouttes induite par de nombreuses collisions entraîne une pulvérisation due aux déformations importantes de ces grosses gouttes [21]. L'influence de l'écoulement gazeux se manifeste par l'apparition de différents régimes de pulvérisation, suivant le mode d'instabilité de la sphère de liquide qui est excité. Un exemple de régime de pulvérisation est montré sur la figure 8. On peut noter ici que l'hypothèse de goutte sphérique indéformable n'est en général pas réaliste, de même que les hypothèses retenues pour modéliser la pulvérisation (symétrie axiale).

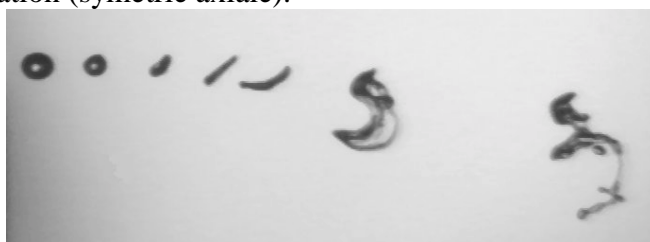


Fig. 8 : Déformation de gouttes induite par l'écoulement et pulvérisation secondaire.

Pour la modélisation d'un jet dense, un point plus fondamental est la prise en compte du volume occupé par la phase dispersée par rapport au volume total. Une méthode ne reposant plus uniquement sur l'approche lagrangienne permettrait de modéliser la zone proche de l'injecteur, en considérant la phase dispersée avec une approche de milieu continu (approche eulérienne)[22]. Une simulation mixte pourrait donc modéliser à la fois les zones denses et diluées d'un écoulement diphasique

## 2.6 Combustion de gouttes

Suivant la densité des gouttes présentes dans l'écoulement, différents régimes de combustion peuvent intervenir, depuis la combustion de goutte isolée (figure 9a) jusqu'à la combustion en paquets (figure 9c). La distance moyenne entre les gouttes sera un des paramètres prépondérants sur le taux de combustion et la forme de la flamme (figure 9b, 9c). La turbulence de l'écoulement gazeux aura aussi une influence notable sur la stabilité du front de flamme.

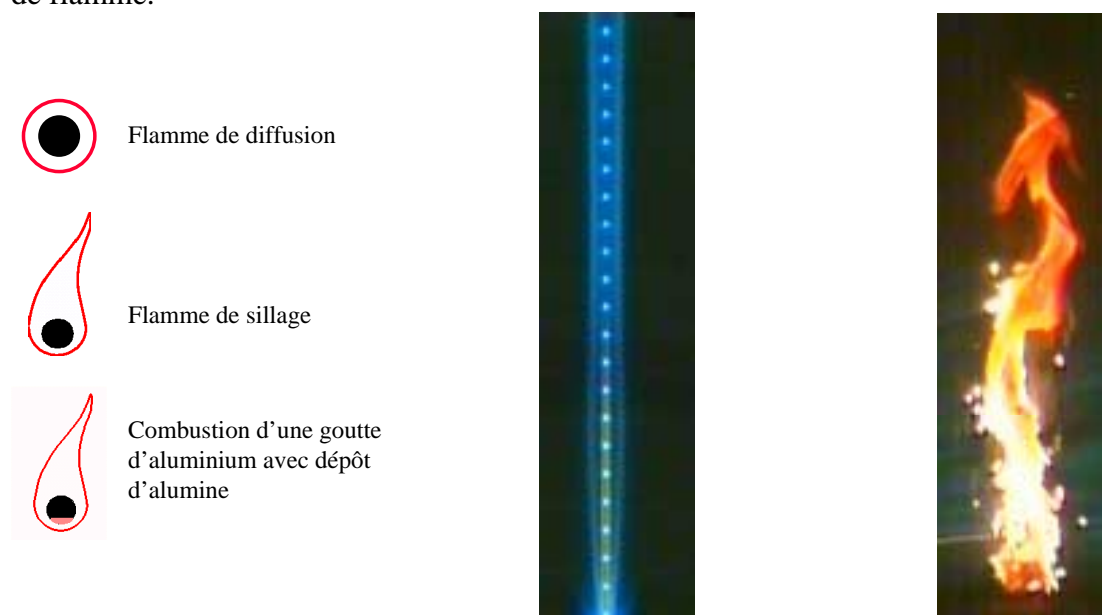


Fig. 9a : Combustion de gouttes isolées

Fig. 9b : Evaporation et combustion : flamme de diffusion autour d'un train de gouttes monodisperses

Fig. 9c : Combustion en régime turbulent

Les deux approches de modélisation qui sont actuellement retenues sont basées d'une part sur la combustion d'une goutte isolée, et d'autre part sur l'hypothèse d'une combustion en phase gazeuse. On peut mentionner que la combustion sera bien sûr très sensible aux conditions extérieures, et à l'état des gouttes. En particulier, comme on peut le constater sur la figure 9c, la combustion de gouttes en régime turbulent présente des caractéristiques totalement différentes d'une configuration laminaire (figure 9b). De nombreux efforts sont encore à réaliser sur ce point particulier.

## 3 INTERACTIONS ENTRE PHASES

La modélisation des interactions entre phases est basée sur la détermination des échanges de masse, quantité de mouvement et d'énergie entre les gouttes et l'écoulement porteur (figure 10). Ces échanges sont pris en compte par l'ajout de termes sources au second membre des équations de conservation de la phase gazeuse [23]. Les méthodes numériques de résolution de ces équations doivent donc être adaptées [24], afin d'assurer d'une part une convergence

rapide des simulations, et d'autre part d'éviter une divergence par l'apparition de termes sources (par exemple, la présence d'un taux d'évaporation élevé induit un terme source de masse très important).

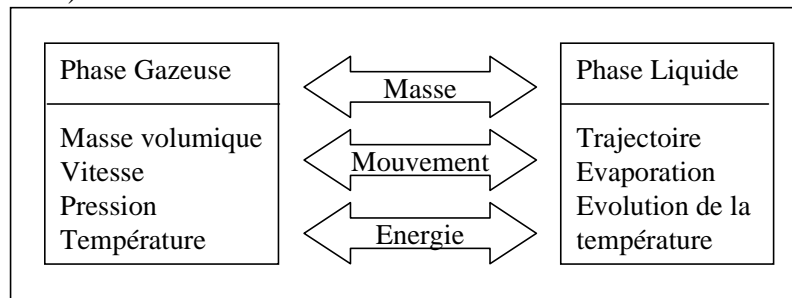


Fig. 10 : Bilan des échanges entre les phases

Une méthode basée sur une introduction progressive des termes sources (simulation simultanée des deux phases) peut être envisagée, et permet d'obtenir des résultats rapidement. Un point qui est encore controversé concerne les simulations turbulentes avec une approche de type  $k-\epsilon$ . L'ajout de termes sources pour les équations de conservation des grandeurs turbulentes pose des problèmes tant théoriques (comment modéliser l'influence des gouttes sur ces grandeurs) que numériques (divergence causée par la conservation de la grandeur  $\epsilon$ ). On peut noter différents travaux qui essaient d'améliorer ce point [25, 26].

#### 4 APPLICATIONS

Le premier exemple porte sur un module de prémélange pauvre destiné à des chambres de combustion de turbomachines à faible taux de polluants [27]. L'injection de carburant dans ce module doit permettre d'obtenir des conditions optimales dans la chambre, par évaporation du liquide et mélange du carburant. Le fort taux d'évaporation près des parois peut causer localement une réduction importante de la température (la chaleur nécessaire à la vaporisation du liquide est fournie par l'écoulement). La configuration axisymétrique étudiée est un module comportant deux entrées d'air en co-giration et une injection axiale de gouttes. Des distributions de taille et de vitesse de gouttes provenant de mesures réalisées par phase Doppler sont injectées en permanence au cours du calcul, en différents points en aval du système d'injection. La figure 11 présente le maillage utilisé et un exemple de répartition de fraction massique de carburant. La co-giration des deux flux d'air injectés provoque une accumulation de carburant sous forme de film sur la paroi du module qui se traduit par une fraction massique de carburant élevée dans cette zone.

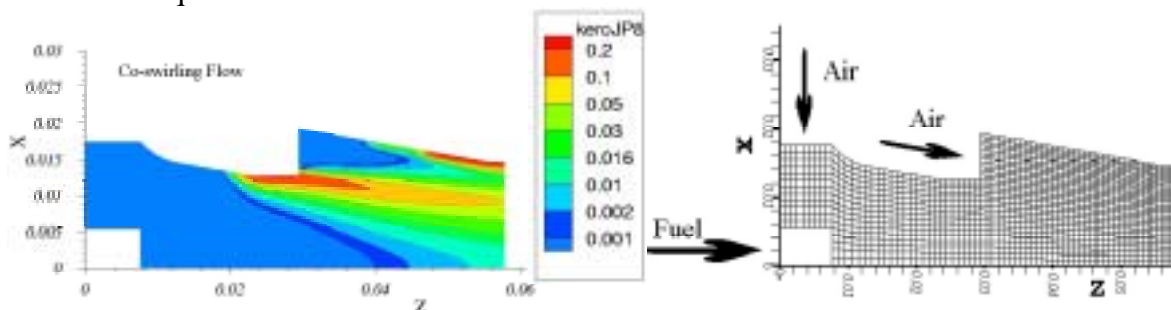


Fig. 11 : Répartition de la fraction massique de carburant dans un module de prémélange de turbomachine.

Un deuxième exemple d'applications en combustion aérobie, concerne la modélisation de l'écoulement diphasique à l'intérieur d'un foyer de statoréacteur [2]. La configuration étudiée est un élargissement brusque axisymétrique (dump). L'injection de carburant (kérosène) est réalisée, en amont du décrochement, près de la paroi. Il importe de bien modéliser la

dispersion et l'évaporation des gouttes, afin de savoir quelle est la répartition du carburant gazeux dans la chambre. La figure 12 montre l'inhomogénéité de la richesse locale, qui est liée à la dispersion des gouttes. La simulation de l'écoulement réactif pose encore des problèmes, du fait de cette forte inhomogénéité de richesse.

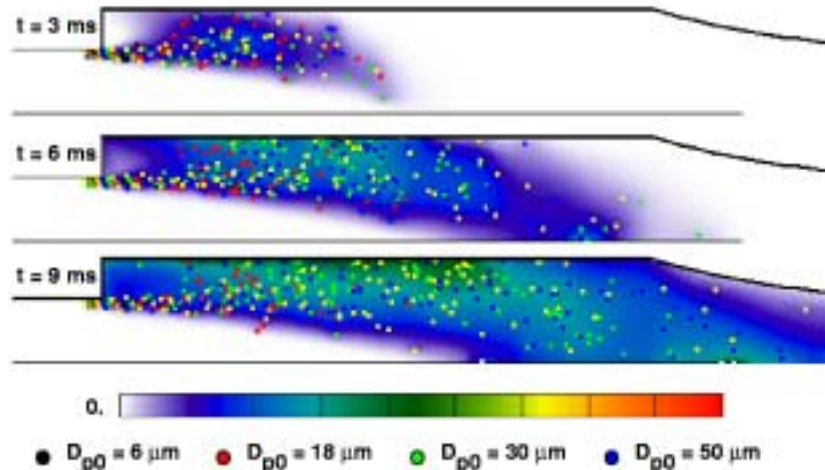


Fig. 12 : Répartition des gouttes et de la vapeur dans une chambre de statoréacteur de type dump avant l'allumage.

Cette approche a aussi été appliquée à un propulseur à propergol solide [18], dans ce cas, la phase liquide est composée d'aluminium, qui s'oxyde en alumine. Le transport des gouttes d'alumine dans le propulseur à propergol solide d'Ariane V a été simulé en prenant en compte l'effet de la collision des gouttes sur l'évolution de la granulométrie sur le moteur (figure 13).

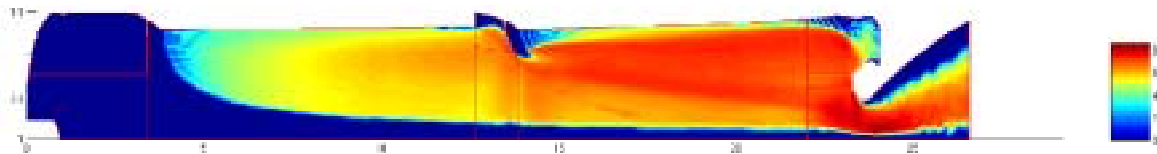


Fig. 13 : Répartition du taux de collision de particules d'alumine à l'intérieur d'un propulseur à propergol solide.

Enfin des travaux de simulation numérique du couplage aéroacoustique – phase dispersée sur un montage gaz froid (maquette Violette) ont aussi été réalisés et ont montré l'importance de la phase dispersée sur les niveaux de pression instationnaire de la chambre. La figure 14 montre l'influence des structures tourbillonnaires sur la dispersion des gouttes dans le cas d'un couplage aéroacoustique [28].

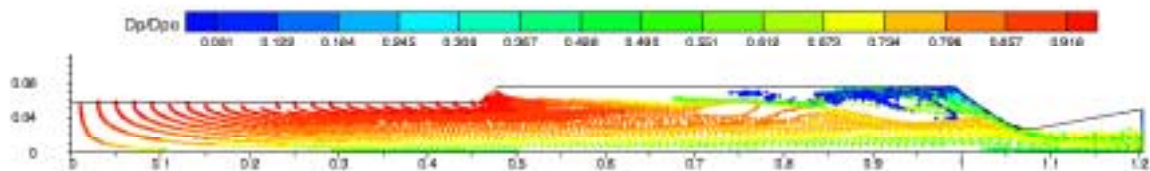


Fig. 14 : Simulation numérique de l'écoulement instationnaire diphasique à l'intérieur d'un propulseur à propergol solide

## CONCLUSION

L'intérêt de l'approche lagrangienne par rapport à l'approche eulérienne réside surtout dans la modélisation plus fine de la phase liquide dans un écoulement diphasique, en particulier au

voisinage des parois. La richesse de la modélisation repose sur différents modèles développés pour une goutte isolée. La pulvérisation et la partie à forte densité de gouttes proche de l'injecteur sont des domaines encore mal connus. Un effort de recherche soutenu doit être consacré à ce sujet, afin de permettre une modélisation plus réaliste. D'un point de vue plus général, toute zone dense dans un écoulement diphasique est très difficile à simuler. En effet, dans ce cas, on ne peut plus négliger les interactions entre particules et surtout le couplage fort entre les phases (modulation de la turbulence). Un travail spécifique doit être réalisé sur la combustion multiphasique. L'hypothèse de combustion en phase gazeuse est rarement vérifiée, et l'on doit donc prendre en compte les différents régimes de combustion et les carburants multi-espèces. Enfin des travaux sur les instabilités des écoulements diphasiques doivent être entrepris afin de développer des outils de compréhension des mécanismes physiques étant à l'origine des instabilités de combustion dans les foyers.

### Remerciements

Les auteurs remercient tout le personnel de l'unité multiphasique hétérogène de l'ONERA/DMAE ainsi que tous les doctorants pour leur contribution à l'ensemble de ces travaux.

### Références

- [1] P. BÉARD. Modélisation lagrangienne de la dispersion et de l'évaporation de gouttes dans un écoulement turbulent instationnaire. Thèse de Doctorat, ENSAE, 1994.
- [2] D. BISSIERES. Modélisation du comportement de la phase liquide dans les chambres de combustion de statoréacteurs. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale Paris, 1997.
- [3] N. CESCO Étude de l'écoulement diphasique à l'intérieur des propulseurs à poudre. Thèse de Doctorat, ENSAE, 1997.
- [4] P. BERTHOUMIEU, P. CARENTZ, et G. LAVERGNE Experimental Study of a Thin Planar Liquid Sheet Disintegration. ICLASS 2000.
- [5] R.W. SELLENS et T.A. BRZUSTOWSKI. A simplified prediction of droplet velocity distributions in a spray. *Combustion and Flame*, 65:273-279, 1986.
- [6] M. KUTZBACH, P. BERTHOUMIEU, J.L. ESTIVALEZES, G. LAVERGNE Numerical study of planar liquid sheet in a co-flowing air stream. ICLASS Europe 2001.
- [7] A.W. LEFEBVRE. Gas turbine combustion. Mae Graw Hill, 1993.
- [8] W.H. SNYDER et J.L. LUMLEY. Some measurements of particle velocity autocorrelation functions in a turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(Part 1):41-71, 1971.
- [9] D.E. STOCK. Particle dispersion in flowing gases. *Journal Fluids Engineering*, 118:4-17, 1996.
- [10] P. TRICHET, G. LAVERGNE, et Y. BISCOS Amplitude and temporal response of droplets in a turbulent flow field. Dans *Proceedings of the 30th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, numéro AIAA-943279, Indianapolis, Indiana, U.S.A., 1994.
- [11] G.M. FAETH Spray atomization and combustion. Dans *Proceedings of the 24th Aerospace Sciences Meeting*, numéro AIAA 86-0136, Reno, NV, 1986.
- [12] C.K. LAW. Some recent advances in droplet combustion. Technical report, American Institute of Physics, 1989.
- [13] W.A. SIRIGNANO. Fluid dynamics of sprays. *Journal Fluids Engineering*, 115:345-378, 1993.

- [14] L.H.J. WACHERS et N.A.J. WESTERLING. The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state. *Chemical Engineering Science*, 21:1047-1056, 1966.
- [15] S. DEB et S.C. YAO Analysis on film boiling heat transfer of impacting sprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(11):2099-2112, 1989.
- [16] C. MUNDO et M. SOMMERFELD. Droplet-wall collisions : experimental studies of the deformation and break-up processes. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(2), 1995.
- [17] G. LAVERGNE, B. PLATET. Droplet impingement on cold and wet wall. ICLASS 2000.
- [18] P. VILLEDIEU et Y. HYLKEMA. Une méthode particulière aléatoire reposant sur une équation cinétique pour la simulation numérique des sprays denses de gouttes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 325(1):323-328, 1997.
- [19] J.F. VIREPINTE Etude du comportement dynamique et thermique de gouttes en régime d'interaction dans le cas de jets rectilignes. Thèse de Doctorat, ENSAE, 1999.
- [20] J. F. VIREPINTE, Y. BISCOS, P. MAGRE, G. LAVERGNE, J.L ESTIVALEZES, J. WILMS Experimental and Numerical Investigation on the Drag Coefficient of Non-Evaporating and Burning Monodispersed Droplet Streams. ICLASS 2000
- [21] M. PICLH et C.A. ERDMAN. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration induced breakup of a liquid drop. *International Journal Multiphase Flow*, 13(6):741-757, 1987.
- [22] J. DUPAYS Contribution à l'étude du rôle de la phase condensée dans la stabilité d'un propulseur à propergol solide pour lanceur spatial. Thèse de Doctorat, I.N.P. Toulouse, 1996.
- [23] C.T. CROWE, M.P. SHARAMA, et D.E. STOCK. The Particle-Source-in Cell (PSI-Cell) - model for gas-droplet flows. *ASME Journal of Heat Transfer*, pages 325-332, 1975.
- [24] G. KOHNEN, M. RUGER, et M. SOMMERFELD. Convergence behaviour for numerical calculations by the Euler-Lagrange Method for strongly coupled phases. Dans *Proceedings of the 1994 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, volume 185, pages 191-202, Lake Tahoe, Nevada, U.S.A., 1994.
- [25] A. BERLEMONT, G. GOUESBET, et M.S. GRANCHER. On the lagrangian simulation of turbulence influence on droplet evaporation. *International Journal Heat Mass Transfer*, 34(11):2805-2812, 1991.
- [26] S. ELGHOBASHI et G.C. TRUESDELL. On the two-way interaction between homogeneous turbulence and dispersed solid particles. I : Turbulence modification. *Physics of Fluids A*, 5(7):1790-1801, 1993.
- [27] D. BISSIERES, G. LAVERGNE, ET P. TRICHET. A study of the two-way coupling modelling for the two-phase flow simulation in a lean premixer prevaporizer module. ICLASS Seoul, Corée 1997.
- [28] F. GONCALVES Etude numérique de l'écoulement instationnaire diphasique dans les propulseurs à propergol solide d'Ariane V. Thèse de Doctorat, ENSAE, 2000.