

INTERFACES ET MÉCANIQUE DES FLUIDES

Roger Prud'homme & Stéphane Zaleski

Laboratoire de Modélisation en Mécanique

1. Théorie des interfaces
2. Simulation numérique d'interfaces
 - 2.1 Méthodes tenant compte des discontinuités
 - 2.2 Méthodes tendant à émousser les discontinuités
3. Conclusions et perspectives



Mécanique des interfaces : frontière de phase entre deux liquides ou un liquide et un gaz.

Problème fondamental : formation de singularités en mécanique des fluides, frontière entre la mécanique et la physico-chimie

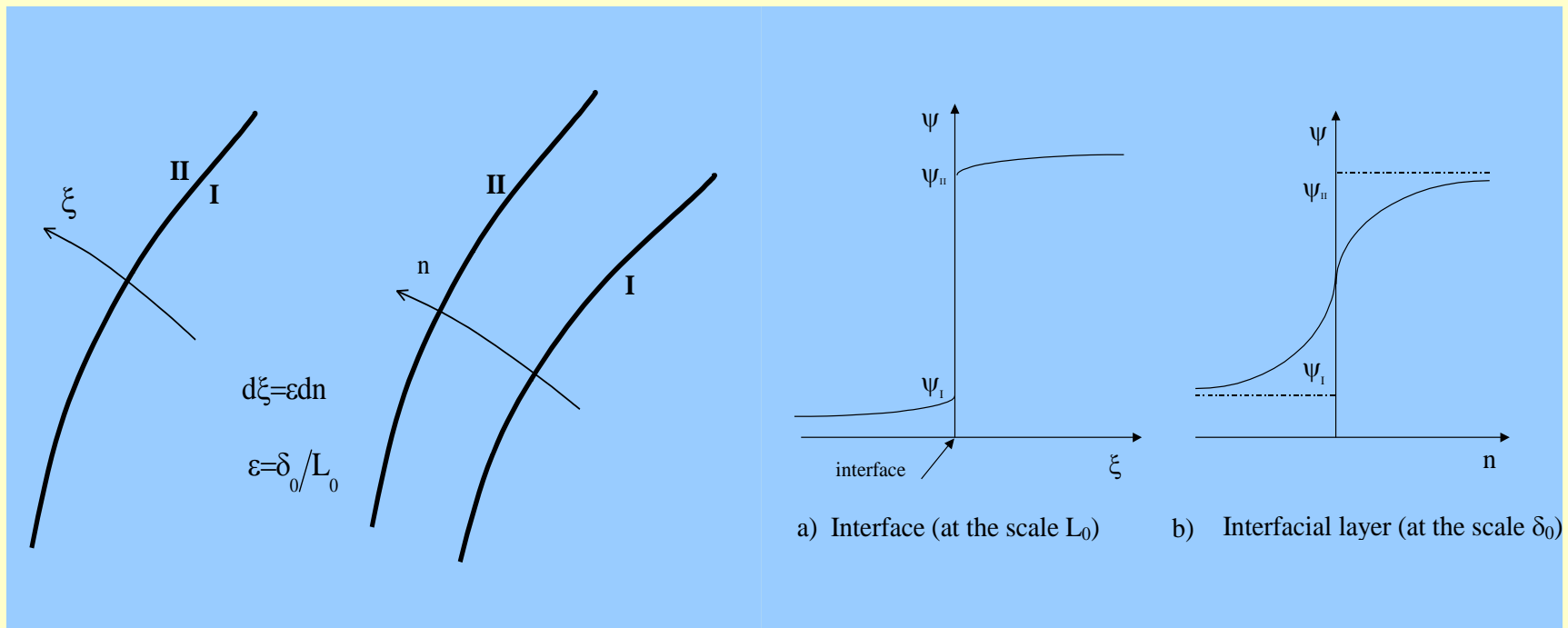
Intérêt pour l'industrie : combustion d'ergols liquides (spatial ou terrestre), atomisation , écoulements à bulles en génie des procédés, circuits de refroidissement, mécanique des réservoirs pétroliers, agro-alimentaire, environnement.



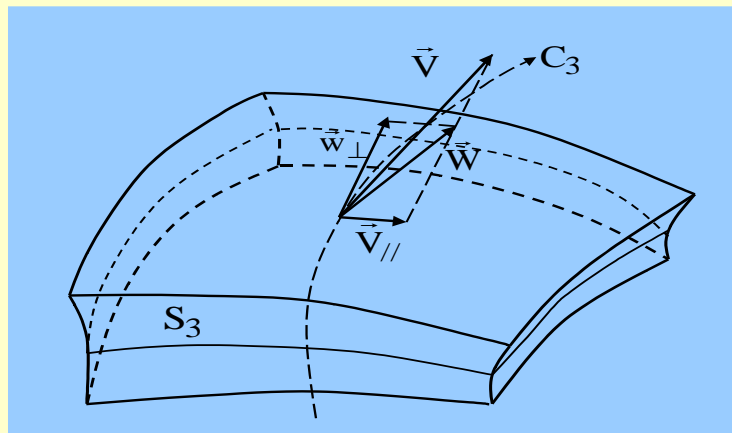
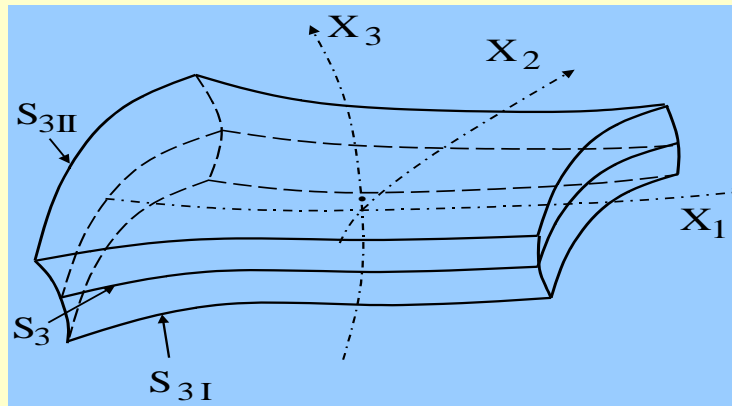
1. THÉORIE DES INTERFACES

(Mechanical and thermodynamical modeling of fluid interfaces, World Scientific, 2001)

Couche interfaciale et interface



Coordonnées curvilignes orthogonales dépendantes du temps



Courbure normale moyenne :

$$\frac{1}{\delta S_3} \frac{\partial(\delta S_3)}{\partial X_3} = \vec{\nabla} \cdot \vec{e}_3 = \frac{1}{h_3} \left(\frac{h_{1,3}}{h_1} + \frac{h_{2,3}}{h_2} \right)$$

Vitesse :

$$\vec{W} = \vec{V}_{//} + w \vec{e}_3$$

Taux d'étirement :

$$\frac{1}{\delta S_3} \frac{d_{\vec{W}}(\delta S_3)}{dt} = \vec{\nabla} \cdot \vec{W} - \vec{\nabla}_{\perp} \cdot \vec{W} = \vec{\nabla}_{//} \cdot \vec{W}$$

Etapas successives

- Relations thermodynamiques (Euler, Gibbs, Gibbs-Duhem)

Cas des fluides capillaires

- Equation générale de bilan :

$$\rho_a \frac{d_s \psi_s}{dt} + \llbracket J_{\perp} + \dot{m}(\psi - \psi_s) \rrbracket + \vec{\nabla}_s \cdot \vec{J}_{a//} = \rho_a \phi_s$$

- Relations de fermeture
- Applications : viscosité de surface, tension de surface variable, recul différentiel de la vapeur, interfaces diffuses

2. SIMULATION NUMÉRIQUE

2.1 Méthodes tenant compte des discontinuités

(<http://www.lmm.jussieu.fr/~zaleski/gouttes.html>)

Progrès rapides au cours des 10 dernières années

Amélioration des **méthodes**: calculs multigrille, méthodes Volume de Fluid (VOF) , ligne de niveau (“level set”), chaînes de marqueurs.

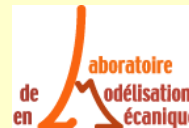
Parallèlement, accroissement considérable de la capacité de **calcul**.

1990 : maillages 64×3

2000: maillages 1000×3 sur supercalculateurs

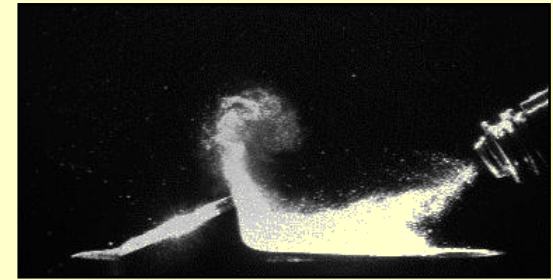
Dans dix ans: maillages $10\,000 \times 3$?

Résultats: par exemple atomisation

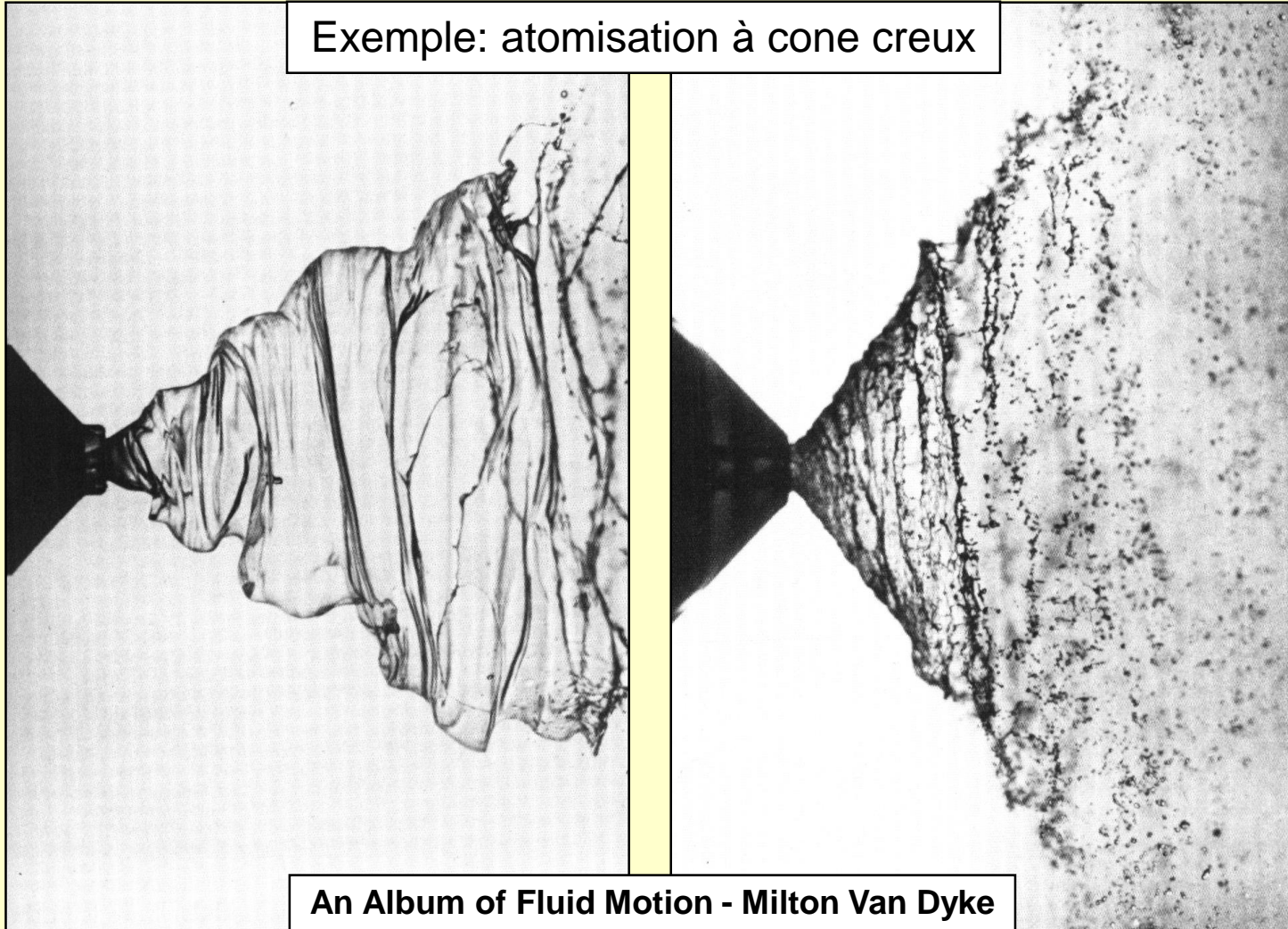


Intérêt de l'atomisation

- Moteurs à injection directe de carburant.
- Moteurs de lanceurs spatiaux
- Optimisation de centrales

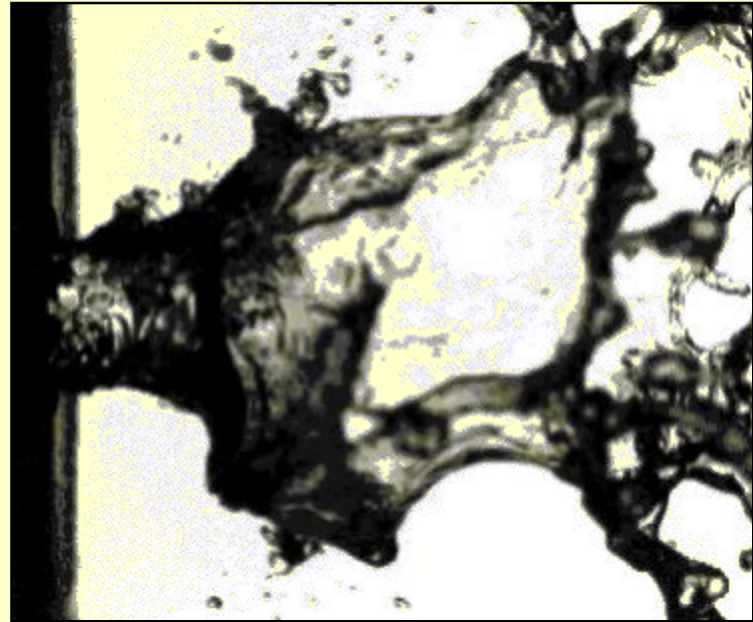
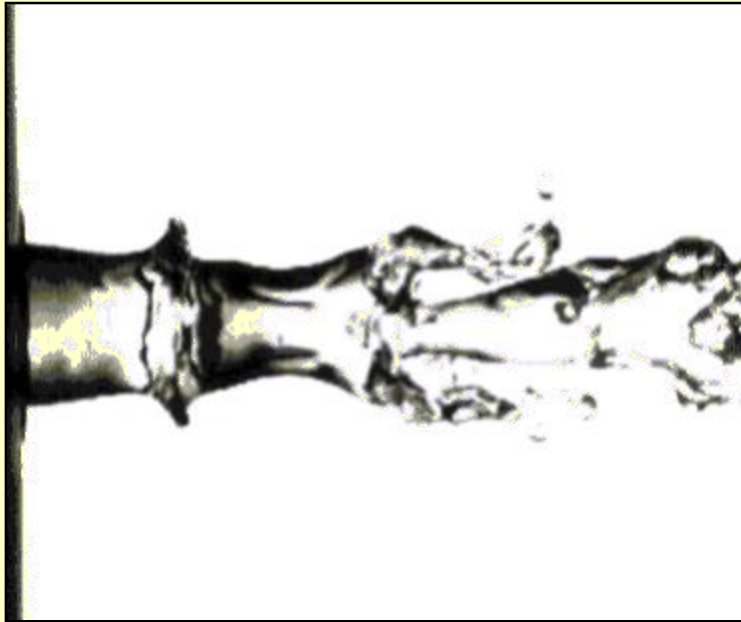


Exemple: atomisation à cône creux



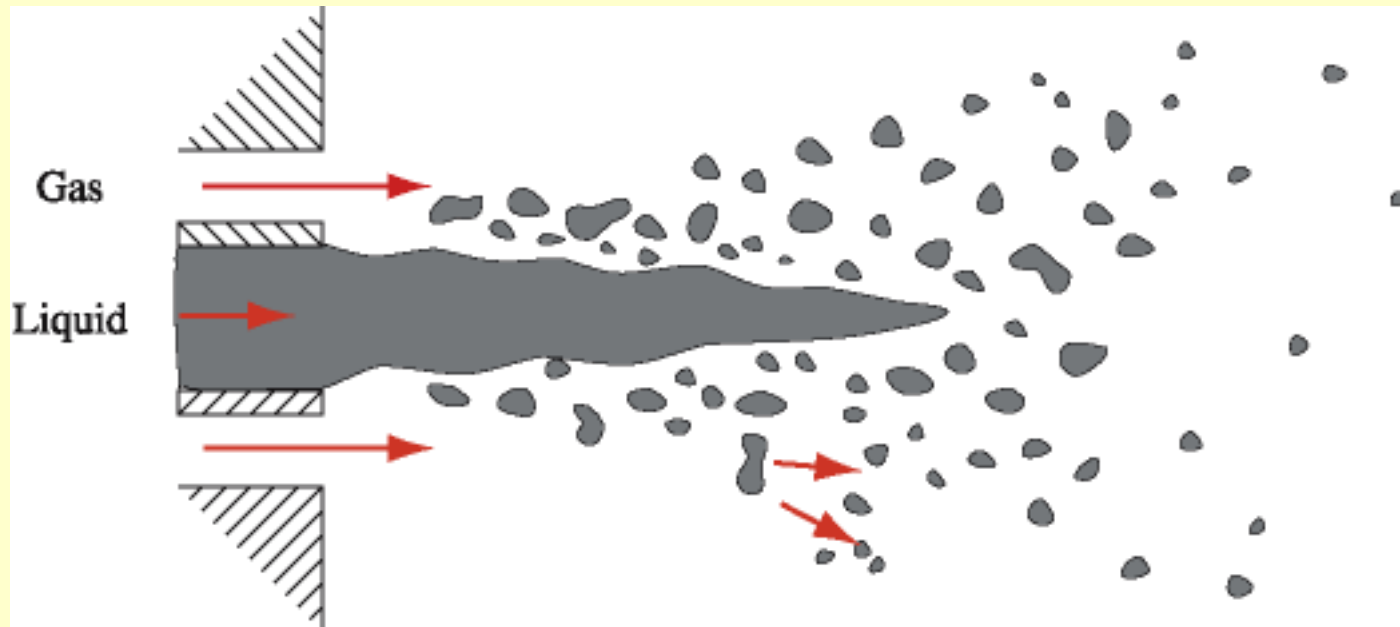
An Album of Fluid Motion - Milton Van Dyke

Exemple Jets coaxiaux



Lasheras, Hopfinger, Villermaux, Raynal,
Cartellier ..., (Grenoble et Marseille)

Schéma d'atomiseur coaxial

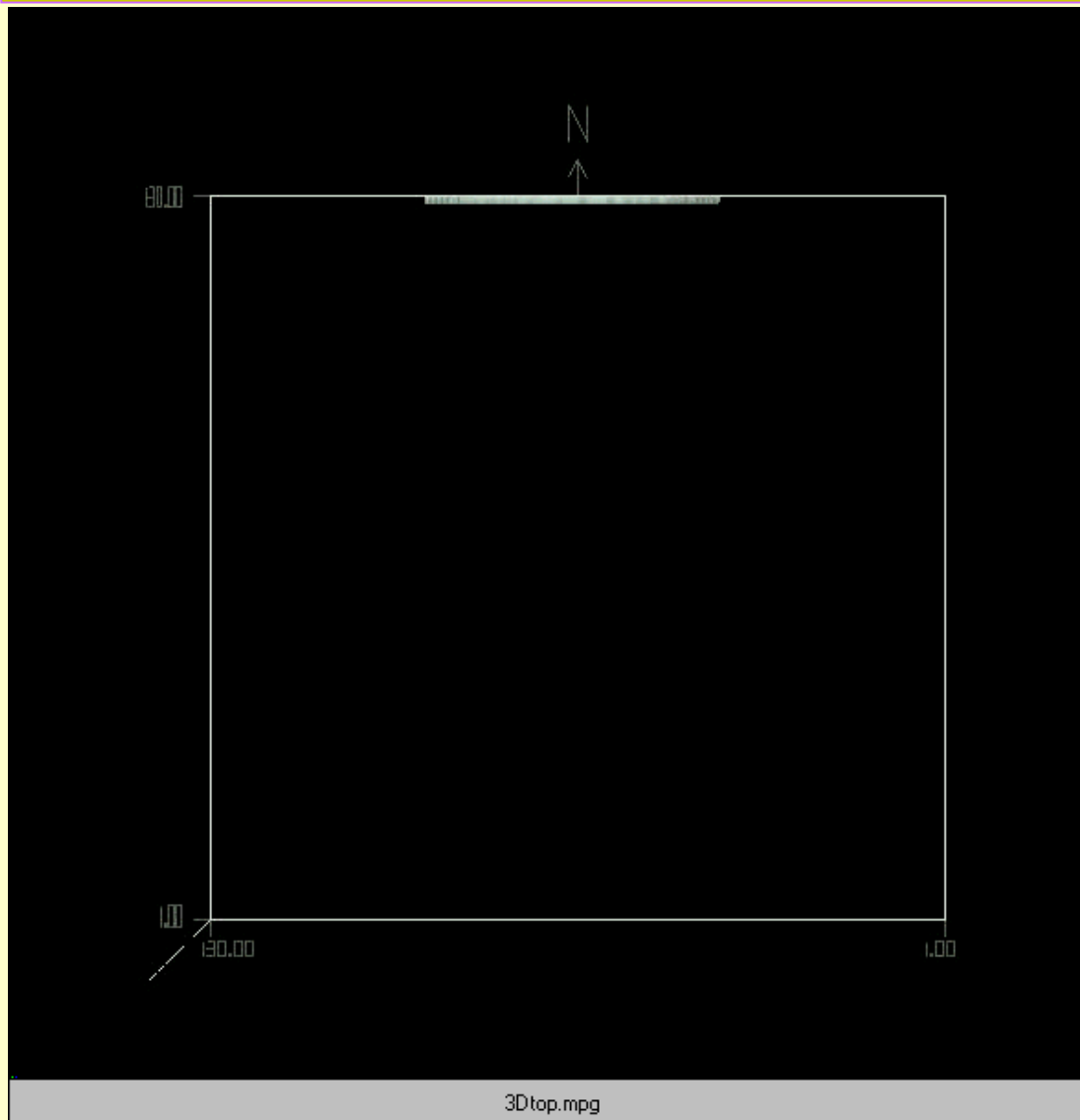




↑ Injection de liquide

Simulation de l'injection
de liquide diesel en
conditions réalistes.
Champ de vorticité en 2D
Simulation 1025 x 2048
Méthode VOF.

A. Leboissetier
(thèse CIFRE, Renault et
LMM)
Sous la direction de S.
Zaleski

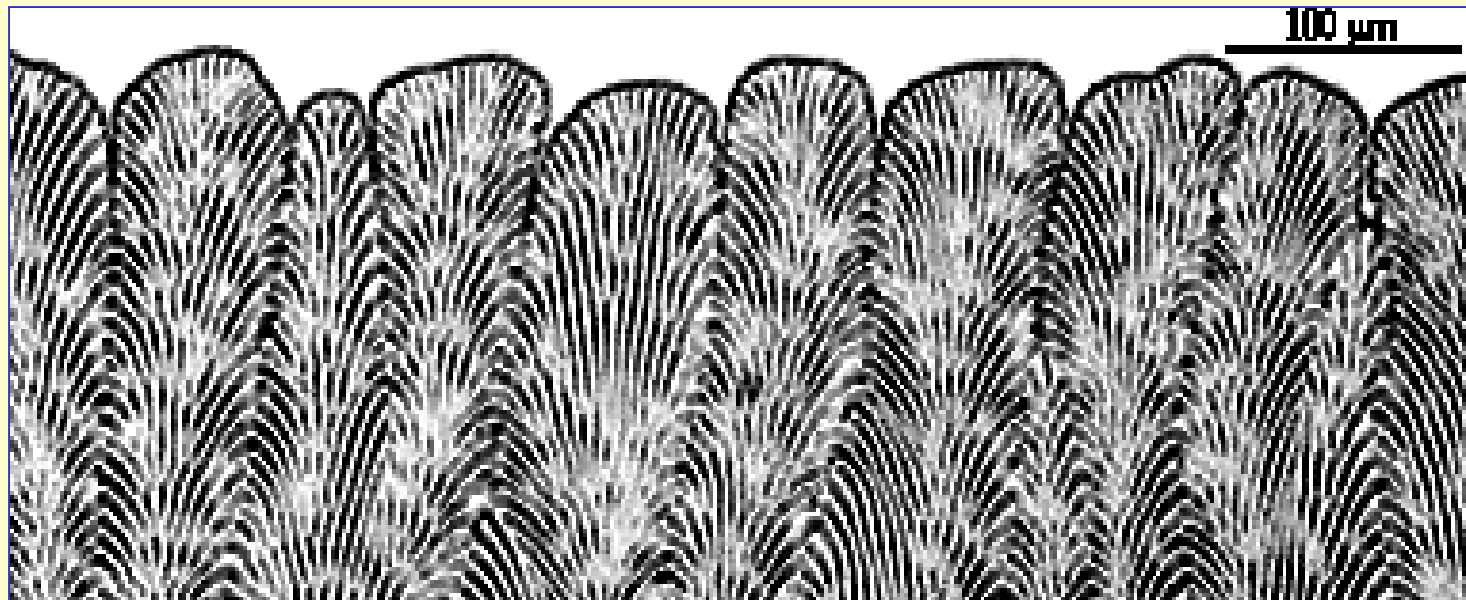


Simulation de
l'injection de
liquide diesel en
conditions
réalistes. Calcul
3D 128 ** 3

A. Leboissetier

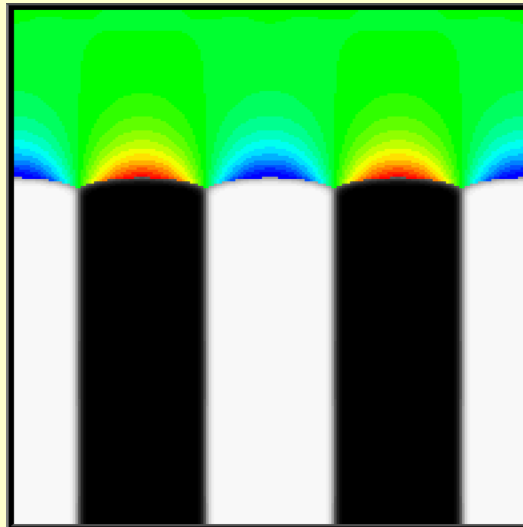
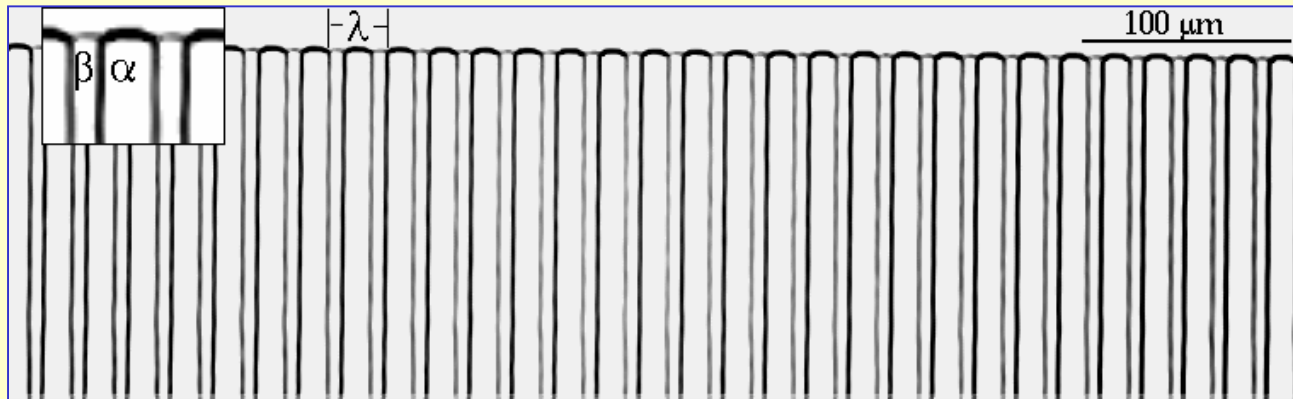
2.2 Méthodes tendant à émousser les discontinuités : méthodes du type « champs de phase » (utilisées notamment en solidification) <http://www.ccr.jussieu.fr/P2TPM>

L'interface est considérée comme une région de transition où sont introduites des **quantités locales moyennées sur les phases**. Sur le plan macroscopique, on trouve une « méthode enthalpique » (El Ganaoui, 1997), tandis qu'à plus petite échelle, le champ de phase est introduit dans la fonctionnelle d'énergie libre (Plapp et Karma, 2001). Jamet, Lebaigue, Coutris et Delhaye utilisent une méthode de second gradient avec une interface artificiellement épaissie, et Jamet et Petitjeans (2001) appliquent des modèles de champ de phase aux interfaces de diffusion.



Colonies eutectiques CBr₄-C₂Cl₆-Naphtalène,
 $V = 31 \mu\text{m s}^{-1}$ (Akamatsu, S.; Faivre, G. 2000 *Physical Review E* **61** , 3757-3769.)

Eutectiques lamellaires



Expérience
(S. Akamatsu *et al.*)

Simulation - "méthode
du champ de phase
(R. Folch, M. Plapp)

Description de la zone pâteuse (Goyeau et al. 1999)

Méthode macroscopique appliquée à des *structures poreuses de type "dendritique"*: Un terme source de Darcy apparaît au second membre de l'équation de la quantité de mouvement où K est la perméabilité isotrope et représente le lien direct entre la morphologie microscopique et les équations de bilan macroscopiques : $-\frac{\mu_1 \rho}{K \rho_1}(\vec{v} - \vec{v}_s)$

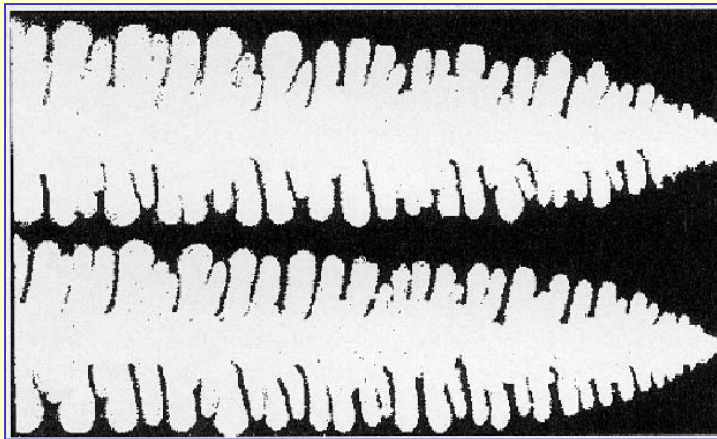
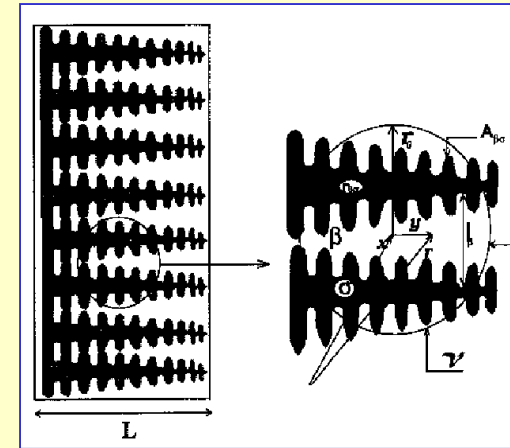
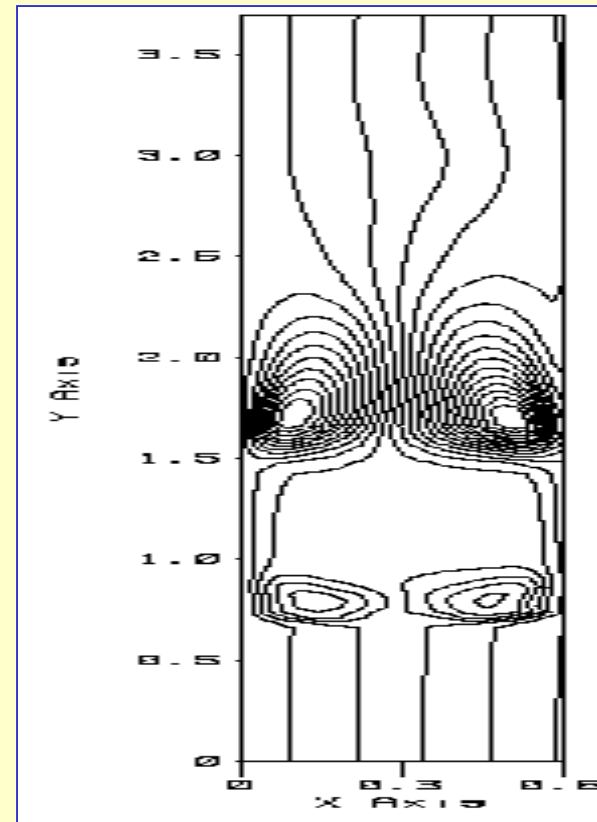
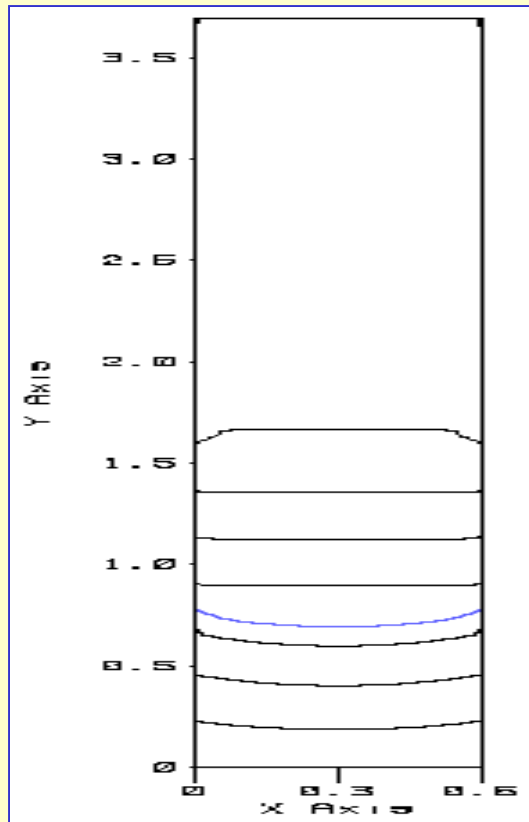


Image digitalisée d'une structure dendritique de Succinonitrile-acétone



Zone pâteuse dendritique macroscopique et un volume volume de moyenne



Isothermes et lignes de courant calculées pour SNC avec la vitesse de tirage $V_t = 10 \mu\text{ms}^{-1}$ et le gradient thermique $G \approx 30 \text{K/cm}$. La position de l'interface vers $y=0.75$, correspond à la ligne bleue [Benielli, D., El Ganaoui, M., Semma, E., Bergeon, N., Jamgotchian, H., Vogé, P., Billia, B. & Bontoux, P. (2001) *J. Phys. IV France*, **11**, Pr6-135-142.]

3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Théorie : Eclaircir les bilans d'aire volumique pour les fluides capillaires, les milieux polyphasiques, mais aussi en combustion

- Modélisation numérique :

Améliorer les prédictions pour les rendre directement utilisables. Intérêt de la méthode du maximum d'entropie pour atomisation.

Etendre le domaine d'application des méthodes du type « champs de phase »

- Expériences : nécessaires, la μg est un outil intéressant

Applications : multiples, comme cela a été souligné

- Diffusion des connaissances : Besoin d'un ou plusieurs ouvrages sur « Modélisations théoriques et numériques des interfaces »

Préparation d'une école sur les interfaces dans le cadre du CISM



perspectives futures pour la simulation numérique au LMM (S. Zaleski)

Collaboration INCA CNRS-SNECMA-ONERA Collaboration avec les motoristes (à concrétiser)

Problèmes connexes: collision entre gouttes, collisions gouttes/surface, etc ...

La simulation est le **moyen** d'acquérir une compréhension physique à petite échelle du processus de formation des gouttes.

Les mesures expérimentales à des échelles de temps de moins d'une microseconde et à des échelles d'espace du micron sont trop difficiles et/ou trop coûteuses.

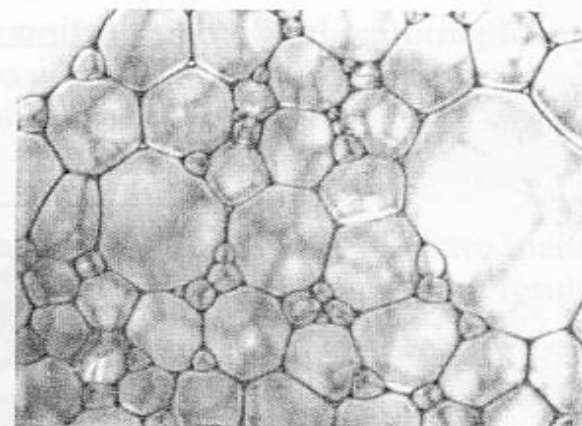
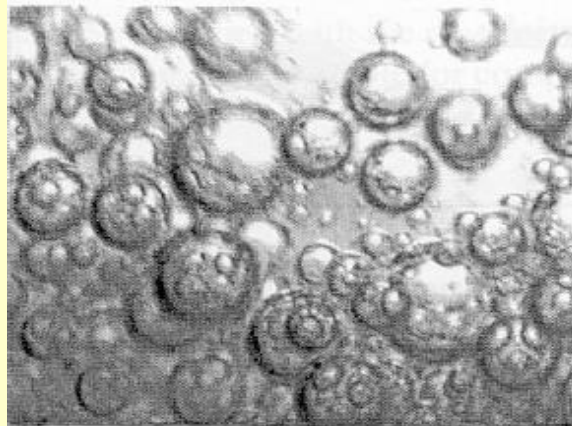
La collaboration avec les équipes (Em2c/ECP) travaillant sur des modèles moyennés (k-epsilon, LES etc...) devrait procurer des prédictions directement utilisables par les fabricants d'injecteurs.



interfaces liquides et micropesanteur (R. Prud'homme)

-« la dynamique interfaciale pour comprendre les mousses (D.Langevin, M. Adler), les émulsions et les capsules » et « les transfert interfaciaux de masse et de chaleur » sont les titres de deux propositions de **réseaux européens** où des équipes de GDR 2258 sont impliquées. Les premières expériences sur les mousses ont montré que les tests sont donc les fusées sondes la durée des vols paraboliques était insuffisante pour produire de la mousse. Les seuls moyens utiles de test sont procurés par les fusées sondes.

-L'ébullition de liquides près de surfaces solides est un problème réel pour les périodes de microgravité du **moteur VINCI** par exemple.



Suspensions, combustion turbulente

- Déformations d'interface, aire volumique :

$$\frac{1}{\Sigma} \frac{d \bar{w}}{dt} = \frac{1}{\delta S_3} \frac{d \bar{w}_3}{dt} - \frac{1}{\delta \mathcal{V}} \frac{d \bar{w}}{dt} = \vec{\nabla}_{//} \cdot \vec{W} - \vec{\nabla} \cdot \vec{W} = -\vec{\nabla}_{\perp} \cdot \vec{W}$$

- Lhuillier, Morel & Delhaye (2000) introduisent une distribution de l'**aire interfaciale par unité de volume du mélange diphasique**.
- Dans les écoulements en combustion turbulente, on introduit des **distributions de flammelettes** (Candel & Poinot, 1990).