

MÉTHODES NUMÉRIQUES ET OPTIMISATION DANS UN PROBLÈME DE COMBUSTION

Lucie Fréret, Stéphane De Chaisemartin, Frédérique Laurent, Marc Massot

Ecole Centrale Paris, Laboratoire EM2C - UPR CNRS 288

École d'automne d'informatique scientifique, Sète, 3 décembre 2008

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

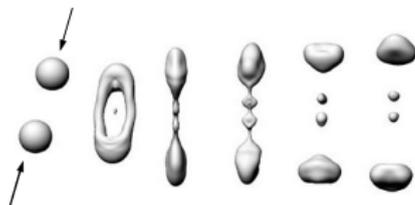
Contexte

Applications

- ▶ Injection de sprays pour les chambres de combustion
- ▶ Fours verriers, turboréacteurs, moteurs diesel

Contexte physique

- ▶ Injection de sprays polydispersés
- ▶ Champ gazeux fortement instationnaire
- ▶ Évaporation des gouttes
- ▶ Coalescence/rupture entre gouttes => polydispersion
- ▶ L'accélération des gouttes due à la traînée



Berlemont, (CORIA)



Edwards, (Stanford)



Dumouchel, (Coria)

Contexte

Applications

- ▶ Injection de sprays pour les chambres de combustion
- ▶ Fours verriers, turboréacteurs, moteurs diésel

Contexte physique

- ▶ Injection de sprays polydispersés
- ▶ Champ gazeux fortement instationnaire
- ▶ Évaporation des gouttes
- ▶ Coalescence/rupture entre gouttes => polydispersion
- ▶ L'accélération des gouttes due à la traînée

Objectifs

- ▶ Développement d'outils numériques prédictifs **Euleriens**
- ▶ Modélisation fine du phénomène de combustion



Edwards, (Stanford)



Dumouchel, (Coria)

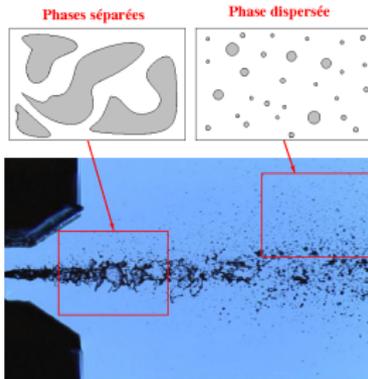
Niveau de modélisation

Phases séparées

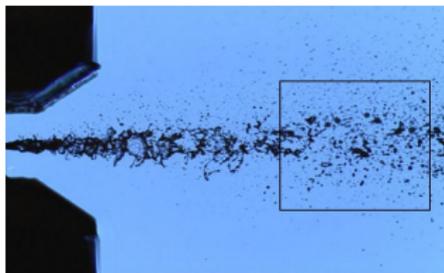
- ▶ DNS : Méthode de suivi d'interface
- ▶ méthodes bi-fluides

Phases dispersée

- ▶ particules discrètes considérées comme ponctuelles
- ▶ DPS (Discrete Particle Simulation) : suivi de chaque goutte
- ▶ approche statistique



Phénomènes physiques



Modélisation de la phase liquide polydispersée (large spectre de taille de gouttes)

- ▶ Interactions gouttes-gaz
évaporation, traînée, transfert de chaleur
- ▶ Interactions gouttes-gouttes
collisions, fragmentation

Paramètre clef : Taille des gouttes

Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

► Conclusions

Modèle cinétique

$f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, S, T; t)$: fonction densité du nombre de gouttes (NDF)

Equation de transport de type Boltzmann (Williams 1958), en adimensionné

$$\underbrace{\partial_t f + \partial_x \cdot (f u)}_{\text{transport libre}} - \underbrace{\partial_S (K f)}_{\text{évaporation}} + \underbrace{\partial_u (F f)}_{\text{forces}} + \underbrace{\partial_T (E f)}_{\text{transferts de chaleur}} = \underbrace{\Gamma(f, f)}_{\text{collisions}} + \underbrace{Q(f)}_{\text{fragmentation}}$$

Modélisation

▶ évaporation et chauffage : loi du d^2 ($K = \text{cste}$, $E = 0$), conductivité infinie, ...

▶ traînée et gravité : $F = \frac{U_g - u}{St(S)} \left(1 + \frac{Re^{2/3}}{6} \right) + g$

▶ coalescence

▶ rebonds

▶ fragmentation secondaire thèse G. Dufour 05

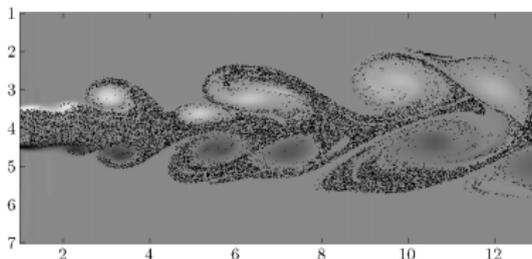
Méthode Lagrangienne

Avantages :

- ▶ polydispersion prise en compte de façon évidente
- ▶ prise en compte des croisements de jets
- ▶ pas de diffusion numérique

Inconvénients :

- ▶ simulation lourde en temps de calcul (convergence lente → coût pour des configurations polydispersées ou instationnaires)
- ▶ difficilement parallélisable
- ▶ couplage avec la phase gazeuse



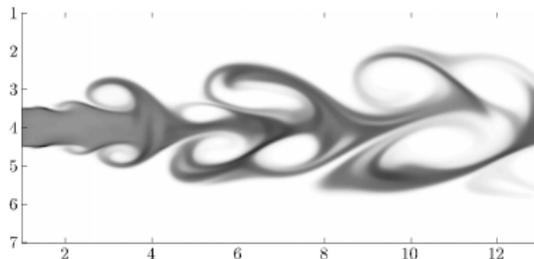
Méthodes Eulériennes

Avantages :

- ▶ Couplage aisé avec un solveur gazeux
- ▶ Parallélisation + facile : technique de décomposition de domaine

Inconvénients :

- ▶ difficulté à décrire la polydispersion
- ▶ difficulté à prendre en compte les croisements de jets



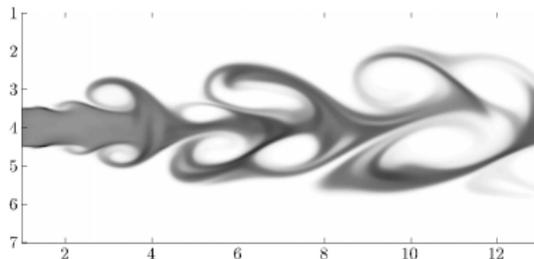
Méthodes Eulériennes

Avantages :

- ▶ Couplage aisé avec un solveur gazeux
- ▶ Parallélisation + facile : technique de décomposition de domaine

Inconvénients :

- ▶ difficulté à décrire la polydispersion
- ▶ difficulté à prendre en compte les croisements de jets



Méthodes Eulériennes

Avantages :

- ▶ Couplage aisé avec un solveur gazeux
- ▶ Parallélisation + facile : technique de décomposition de domaine
- ▶ prise en compte de la polydispersion

Inconvénients :

- ▶ difficulté à prendre en compte les croisements de jets

MÉTHODE MULTI-FLUIDE

Méthodes Eulériennes

Avantages :

- ▶ Couplage aisé avec un solveur gazeux
- ▶ Parallélisation + facile : technique de décomposition de domaine
- ▶ prise en compte de la polydispersion
- ▶ prise en compte des croisements de jets

Inconvénients :

MÉTHODE MULTI-FLUIDE MULTI-VITESSE

Modèles multi-fluides Eulériens

Modèle décrivant une phase dispersée constituée d'un **brouillard de gouttes de combustible polydispersé** avec 4 critères :

Caractéristiques :

- ▶ Modélisation **Eulérienne** de la phase dispersée en considérant un système de lois de conservation sur les **moments** en vitesse et température
- ▶ Description du caractère **polydispersé** du brouillard, description de la **dynamique de goutte conditionnée par sa taille** et de son **évaporation**
- ▶ Méthodes adaptées à la **parallélisation** et à l' **optimisation de code**
- ▶ Préservation du **lien avec le niveau cinétique de description** permettant :
 - Opérations de moyenne au niveau cinétique (LES/RANS)
 - Modélisation de la collision, de la fragmentation
 - Justification mathématique du modèle obtenu et validité

Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

► Conclusions

Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

► Conclusions

Modèle cinétique

$f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, S)$: fonction densité du nombre de gouttes (NDF)

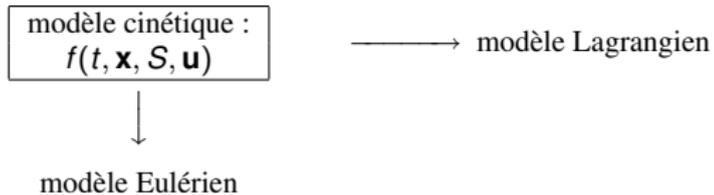
équation de Williams-Boltzmann adimensionnée, dans un cas simplifié

$$\underbrace{\partial_t f + \partial_x \cdot (f u)}_{\text{transport libre}} - \underbrace{\partial_S (Kf)}_{\substack{\text{évaporation} \\ \downarrow \\ \text{loi du } d^2 \\ K = \text{cste}}} + \underbrace{\partial_u (Ff)}_{\substack{\text{forces} \\ \downarrow \\ \text{traînée de Stokes} \\ F = \frac{U_g - u}{Si(S)}}} + \underbrace{\partial_T (E f)}_{=0} = \underbrace{\Gamma(f) + Q(f)}_{=0}$$

Remarque : le modèle multi-fluide Eulérien a été développé :

- ▶ pour des **modèles plus précis d'évaporation, avec échanges de chaleur** (Laurent et al CTM 2001, 2004)
- ▶ pour un **modèle plus précis de la traînée** (Laurent et al CTM 2001, 2004)
- ▶ pour la prise en compte de la **coalescence** de gouttes (Laurent et al JCP 2004) **de leur rebond** (CTR08) et de leur **fragmentation** (Dufour et al CRAS 2004)

Dérivation du modèle



Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

Moments en vitesse
d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, S, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

Moments en **vitesse**
 d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, S), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S)$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, S, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

$$\int_S f S^k dS$$

Intégration en taille

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, S), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S)$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

Moments en **vitesse**
 d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{S})$

Discrétisation en taille
 Moments en **taille** dans **une section**

$$\forall \mathbf{S} \in [S_{i-1}, S_i] \quad \downarrow \quad \int_{S_{i-1}}^{S_i} (n n\mathbf{v})^t \mathbf{S}^{3/2} d\mathbf{S}$$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

Moments en **vitesse**
 d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{S})$

Discrétisation en taille
 Moments en **taille** dans **une section**

$$\forall S \in [S_{i-1}, S_i] \quad \downarrow \quad \int_{S_{i-1}}^{S_i} (n n\mathbf{v})^t S^{3/2} dS$$

Modèle Eulérien multi-fluide
 $m_i(t, \mathbf{x}), m_i \mathbf{v}_i(t, \mathbf{x})$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$

→ modèle Lagrangien

Moments en **vitesse**
 d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{S})$

Discrétisation en taille
 Moments en **taille** dans **une section**

$$\forall \mathbf{S} \in [S_{i-1}, S_i] \quad \downarrow \quad \int_{S_{i-1}}^{S_i} (n n\mathbf{v})^t \mathbf{S}^{3/2} d\mathbf{S}$$

Modèle Eulérien multi-fluide
 $m_i(t, \mathbf{x}), m_i \mathbf{v}_i(t, \mathbf{x})$

Discrétisation en
 volumes finis \mathbf{x}

$$\forall \mathbf{x} \in [x_{k-\frac{1}{2}}, x_{k+\frac{1}{2}}] \quad \downarrow \quad \frac{1}{\Delta \mathbf{x}} \int_{x_{k-\frac{1}{2}}}^{x_{k+\frac{1}{2}}} (m_i m_i \mathbf{v}_i)^t d\mathbf{x}$$

Dérivation du modèle

modèle cinétique :
 $f(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}, \mathbf{u})$

—————> modèle Lagrangien

Moments en **vitesse**
 d'ordre 0 & 1

$$\int_{\mathbf{u}} f d\mathbf{u} \quad \downarrow \quad \int_{\mathbf{u}} f \mathbf{u} d\mathbf{u}$$

Modèle Semi-cinétique :
 $n(t, \mathbf{x}, \mathbf{S}), n\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, \mathbf{S})$

Discrétisation en taille
 Moments en **taille** dans **une section**

$$\forall \mathbf{S} \in [S_{i-1}, S_i] \quad \downarrow \quad \int_{S_{i-1}}^{S_i} (n n\mathbf{v})^t \mathbf{S}^{3/2} d\mathbf{S}$$

Modèle Eulérien multi-fluide
 $m_i(t, \mathbf{x}), m_i \mathbf{v}_i(t, \mathbf{x})$

Discrétisation en
 volumes finis \mathbf{x}

$$\forall \mathbf{x} \in [x_{k-\frac{1}{2}}, x_{k+\frac{1}{2}}] \quad \downarrow \quad \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{k-\frac{1}{2}}}^{x_{k+\frac{1}{2}}} (m_i m_i \mathbf{v}_i)^t d\mathbf{x}$$

Modèle Eulerien discrétisé
 $m_{ik}(t), m_{ik} \mathbf{v}_{ik}(t)$

Modèle semi-cinétique

Moments considérés :

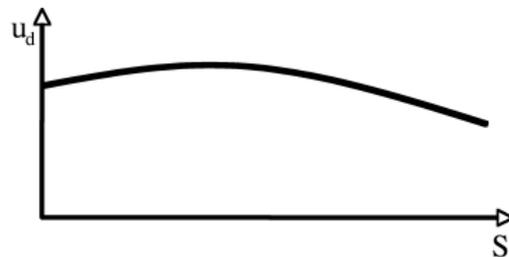
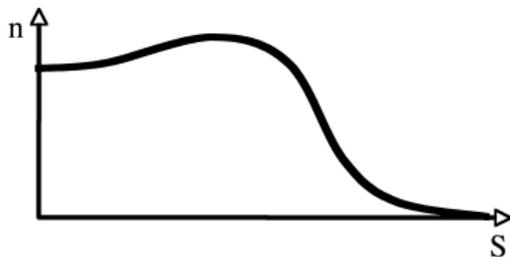
$$n(t, \mathbf{x}, S) = \int f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, S) d\mathbf{u} \quad n(t, \mathbf{x}, S)\mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S) = \int \mathbf{u} f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, S) d\mathbf{u}$$

Hypothèse (distribution monocinétique) :

$$f(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}, S) = n(t, \mathbf{x}, S)\delta(\mathbf{u} - \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S))$$

Equations de conservation :

$$\begin{cases} \partial_t n + \partial_x \cdot (n\mathbf{v}) - \partial_S(nK) = 0 \\ \partial_t(n\mathbf{v}) + \partial_x \cdot (n\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) - \partial_S(nK\mathbf{v}) = n \frac{\mathbf{U}_g - \mathbf{v}}{St(S)} \end{cases}$$

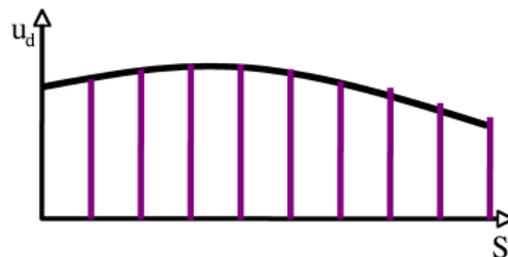
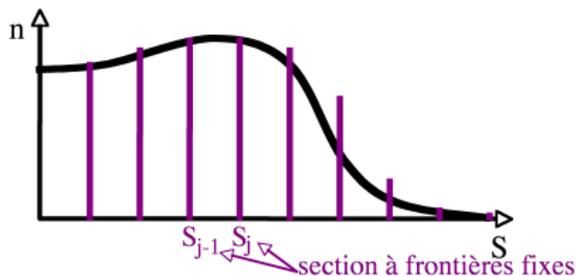


Modèle multi-fluide Eulérien

Moments considérés :

$$m^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) dS$$

$$m^{(j)} v^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S) dS$$



Modèle multi-fluide Eulérien

Moments considérés :

$$m^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) dS \quad m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S) dS$$

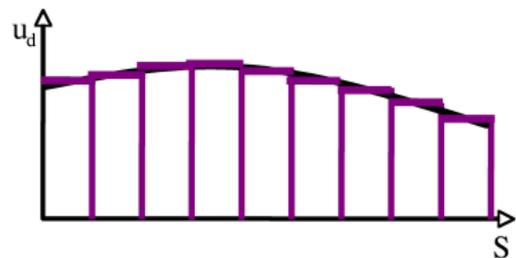
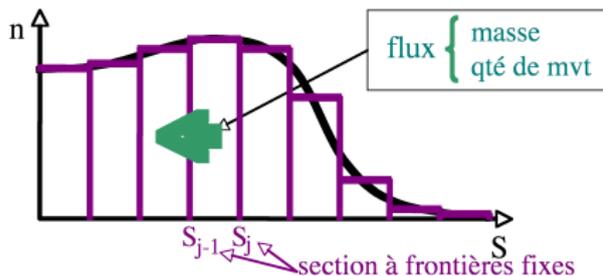
Hypothèse :

On présume le profil de n dans chaque section : $n(t, \mathbf{x}, S) = m^{(k)}(t, \mathbf{x}) \kappa^{(k)}(S)$

Systèmes d'équations :

$$\partial_t(m^{(j)}) + \partial_x \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) = -(E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)}$$

$$\partial_t(m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) + \partial_x \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} \otimes \mathbf{v}^{(j)}) = -(E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)} \mathbf{v}^{(j+1)} + m^{(j)} F^{(j)}$$



Modèle multi-fluide Eulérien

Moments considérés :

$$m^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) dS \quad m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}(t, \mathbf{x}) = \int_{S_{j-1}}^{S_j} S^{3/2} n(t, \mathbf{x}, S) \mathbf{v}(t, \mathbf{x}, S) dS$$

Hypothèse :

On présume le profil de n dans chaque section : $n(t, \mathbf{x}, S) = m^{(k)}(t, \mathbf{x}) \kappa^{(k)}(S)$

Systemes d'équations :

$$\begin{aligned} \partial_t(m^{(j)}) + \partial_x \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) &= -(E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) + \partial_x \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} \otimes \mathbf{v}^{(j)}) &= -(E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)} \mathbf{v}^{(j+1)} + m^{(j)} F^{(j)} \end{aligned}$$

Remarque :

On a autant de systèmes d'équations que de sections

⇒ la taille est une dimension supplémentaire du problème

Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

► Conclusions

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée
- ▶ Δt Transport
- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée

$$\partial_t(m^{(j)}) + \partial_{\mathbf{x}} \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) = - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)}$$

$$\partial_t(m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) + \partial_{\mathbf{x}} \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} \otimes \mathbf{v}^{(j)}) = - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)}) m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} + E_1^{(j+1)} m^{(j+1)} \mathbf{v}^{(j+1)} + m^{(j)} F^{(j)}$$

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée
- ▶ Δt Transport
- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée

$$\partial_t(m^{(j)}) + \partial_{\mathbf{x}} \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) = 0$$

$$\partial_t(m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) + \partial_{\mathbf{x}} \cdot (m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)} \otimes \mathbf{v}^{(j)}) = 0$$

SYSTÈME DES GAZ SANS PRESSION

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée
- ▶ Δt Transport $\left\{ \begin{array}{l} \text{dans la direction } x \text{ pendant } \Delta t/2 \\ \text{dans la direction } y \text{ pendant } \Delta t \\ \text{dans la direction } x \text{ pendant } \Delta t/2 \end{array} \right.$
- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée

$$\partial_t(m^{(j)}) + \partial_x(m^{(j)} v_x^{(j)}) = 0$$

$$\partial_t(m^{(j)} v_x^{(j)}) + \partial_x(m^{(j)} v_x^{(j)} \otimes v_x^{(j)}) = 0$$

$$\partial_t(m^{(j)}) + \partial_y(m^{(j)} v_y^{(j)}) = 0$$

$$\partial_t(m^{(j)} v_y^{(j)}) + \partial_y(m^{(j)} v_y^{(j)} \otimes v_y^{(j)}) = 0$$

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée
- ▶ Δt Transport $\left\{ \begin{array}{l} \text{dans la direction } x \text{ pendant } \Delta t/2 \\ \text{dans la direction } y \text{ pendant } \Delta t \\ \text{dans la direction } x \text{ pendant } \Delta t/2 \end{array} \right.$
- ▶ $\Delta t/2$ Evaporation/Traînée

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}\mathbf{v}^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}\mathbf{v}^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}\mathbf{v}^{(j+1)} + m^{(j)}F^{(j)}\end{aligned}$$

SYSTÈME D'EDO RAIDES

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation
- ▶ Δt Transport {
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
dans la direction y pendant Δt
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}\mathbf{v}^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}\mathbf{v}^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}\mathbf{v}^{(j+1)}\end{aligned}$$

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation
- ▶ Δt Transport {
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
dans la direction y pendant Δt
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation

$$\partial_t(m^{(j)}) = 0$$

$$\partial_t(m^{(j)} \mathbf{v}^{(j)}) =$$

$$m^{(j)} F^{(j)}$$

Méthode numérique générale

Splitting (Strang, ordre 2 en temps) entre les parties transport et évaporation/traînée

- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation
- ▶ Δt Transport {
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
dans la direction y pendant Δt
dans la direction x pendant $\Delta t/2$
- ▶ $\Delta t/2$ {
Évaporation
Traînée
Évaporation

- Simplification du problème général par séparation d'opérateur :
on découple en plusieurs "petits" problèmes

- Schéma de transport 1D

Schéma de transport

Système des gaz sans pression

$$\begin{cases} \partial_t(\rho) + \partial_x(\rho v) & = & 0 \\ \partial_t(\rho v) + \partial_x(\rho v^2) & = & 0 \end{cases}$$

Système faiblement Hyperbolique

- ▶ équation de Burgers pour la vitesse \Rightarrow création de **chocs**

$$\partial_t(v) + \partial_x(v^2) = 0$$

- ▶ Transport à la vitesse u pour la densité : Accumulation de densité au niveau du choc \Rightarrow **dirac** en densité

$$\partial_t(\rho) + \partial_x(\rho v) = 0$$

Schéma de transport

Système des gaz sans pression

$$\begin{cases} \partial_t(\rho) + \partial_x(\rho v) & = & 0 \\ \partial_t(\rho v) + \partial_x(\rho v^2) & = & 0 \end{cases}$$

Système faiblement Hyperbolique

- ▶ équation de Burgers pour la vitesse \Rightarrow création de **chocs**

$$\partial_t(v) + \partial_x(v^2) = 0$$

- ▶ Transport à la vitesse u pour la densité : Accumulation de densité au niveau du choc \Rightarrow **dirac** en densité

$$\partial_t(\rho) + \partial_x(\rho v) = 0$$

\implies **Développement de delta-chocs**
 \implies **Emergence du vide**

Schéma de transport

Approximation numérique des gaz sans pression

- ▶ Equivalence macro-micro (Bouchut, 1994)

$$\partial_t f + v \partial_x f = 0 \iff \begin{cases} \partial_t(\rho) + \partial_x(\rho u) & = & 0 \\ \partial_t(\rho u) + \partial_x(\rho u^2) & = & 0 \end{cases}$$

avec :

$$f(t, x, v) = \rho(t, x) \delta(v - u(t, x))$$

- ▶ Schéma cinétique volumes finis (Bouchut, Jin & Li, 2003)
 - Possibilité de capter les delta chocs et le vide
 - ⇒ concentration de densité dans une cellule de la grille
 - ⇒ formation du vide due à la structure du champs de vitesse
 - Conservation des propriétés du système :
 - ⇒ Préservation de la positivité de la **densité**
 - ⇒ Principe du maximum sur la **vitesse**

Schéma cinétique volumes finis

méthode de volumes finis utilisant l'équation cinétique : $\partial_t f + v \cdot \partial_x f = 0$

- ▶ Intégration des équations de conservation sur une cellule du domaine de calcul :

$$\text{Cas 1D : } \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \int_{t^n}^{t^{n+1}} (\partial_t \rho + \partial_x(\rho u)) dx dt = 0$$

- ▶ Obtention de l'évolution des équations pour les quantités moyennées ρ_i and $q_i = (\rho u)_i$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^1 - F_{i-1/2}^1)$$

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^2 - F_{i-1/2}^2)$$

où $F_{i\pm 1/2}^1$ et $F_{i\pm 1/2}^2$ sont les flux aux frontières de la cellule pour ρ_i et q_i .

Méthode numérique pour l'évaporation/traînée

Evaporation/Traînée :

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}u^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}u^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}u^{(j+1)} + m^{(j)}F^{(j)}\end{aligned}$$

Système d'EDO raides

⇒ Solveur de type Radau5 (Runge-Kutta implicite), possibilité de Jacobien analytique pour le modèle simplifié

OU

Splitting (Strang)

- Traînée : pas de modification de la densité, solution analytique pour la vitesse
- Evaporation : pas de modification de la vitesse, schéma pour l'évaporation

Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

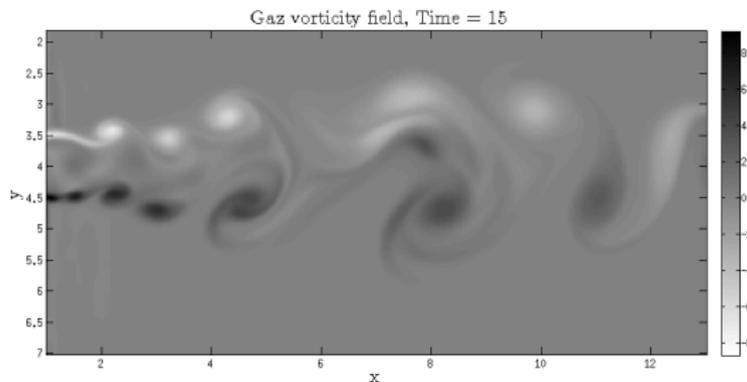
Premiers résultats 3D

► Conclusions

Configuration de Jets libres

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé qui s'évapore

- ▶ injection d'un brouillard de goutte polydispersé au centre du jet
- ▶ $Re=1000$ avec un faible niveau de turbulence à l'injection pour déstabiliser le jet
- ▶ distribution de gouttes avec des nombres de Stokes compris entre 0.03 et 1.34
- ▶ discrétisation $400*200$ avec 10 sections



Configuration de Jets libres

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé qui s'évapore

- ▶ injection d'un brouillard de goutte polydispersé au centre du jet
- ▶ $Re=1000$ avec un faible niveau de turbulence à l'injection pour déstabiliser le jet
- ▶ distribution de gouttes avec des nombres de Stokes compris entre 0.03 et 1.34
- ▶ discrétisation $400*200$ avec 10 sections

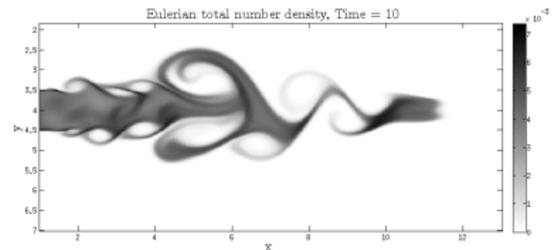
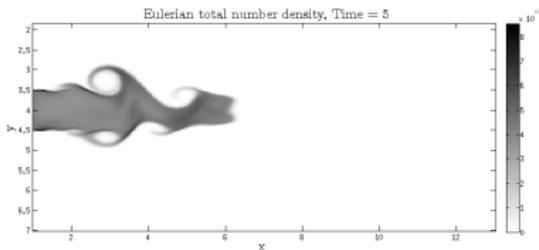
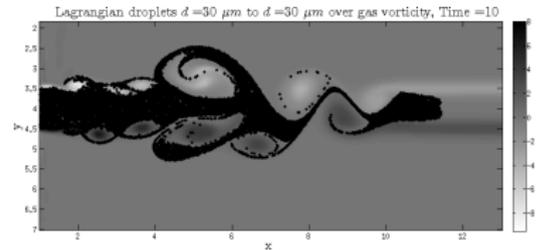
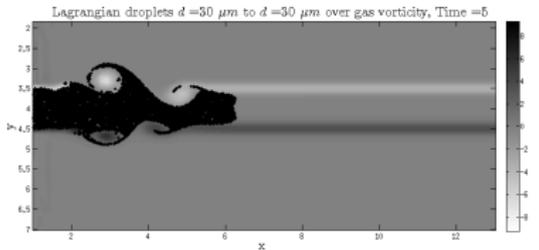
Code Eulérien 2D - 2D axisymétrique - 3D

- ▶ solveur générique permettant l'implémentation de nouvelles méthodes
- ▶ implémentation en vue de parallélisation
- ▶ couplage avec le solveur gazeux (Low Mach) + Lagrangien ASPHODELE de J. Réveillon, CORIA, Rouen
⇒ possibilité de faire les calculs Eulériens et lagrangiens sur un même champs de gaz

Comparaisons faibles Stokes

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé

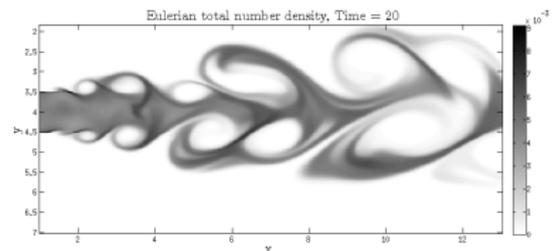
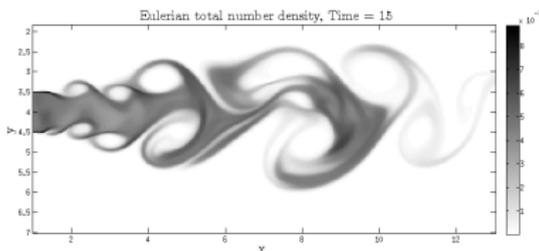
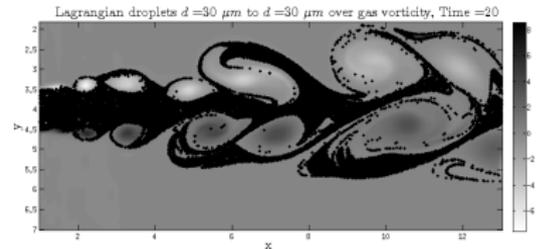
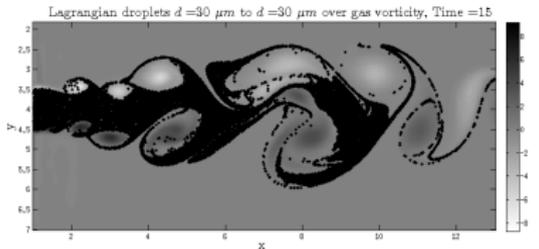
► $St = 0.12$



Comparaisons faibles Stokes

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé

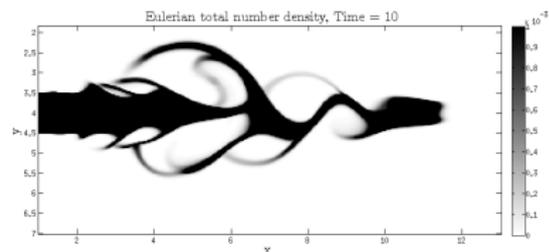
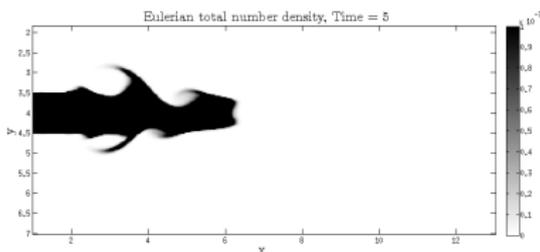
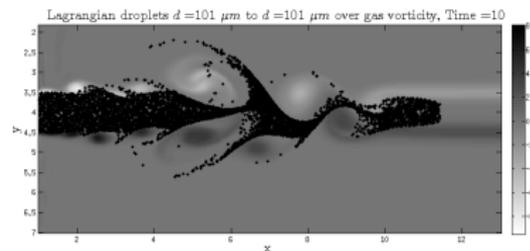
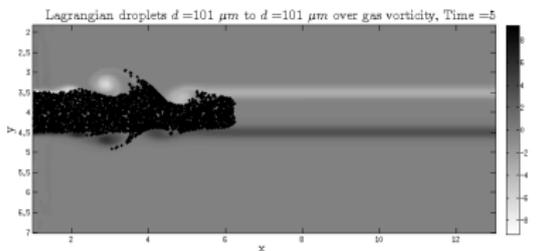
► $St = 0.12$



Comparaisons Stokes fins

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé

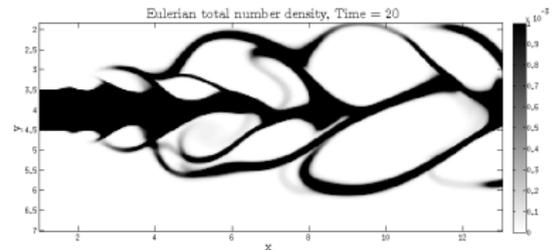
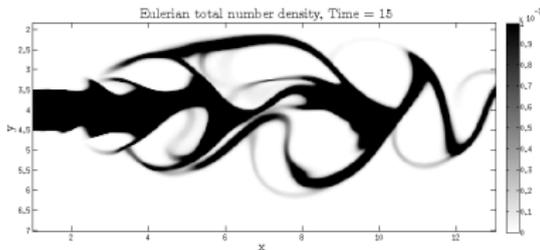
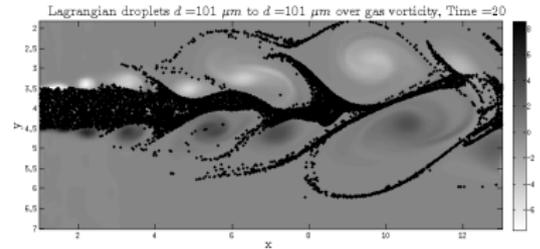
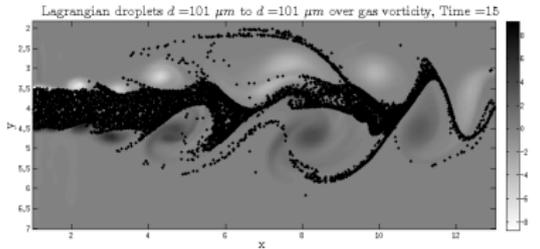
► $St = 1.34$



Comparaisons Stokes fins

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé

► $St = 1.34$



Coût

raffinement Lagrangien	niveau DPS 40 000 particules	1 millions particules	4 millions particules
coût CPU ($\times 1000s$)	1	20	80

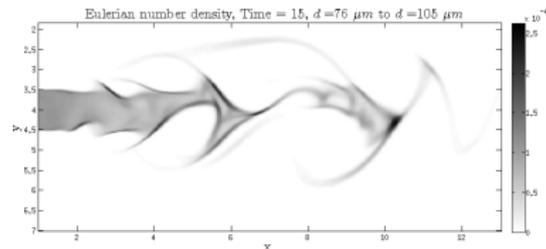
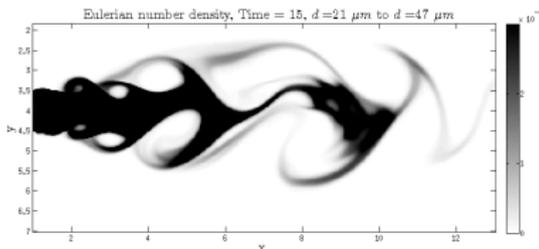
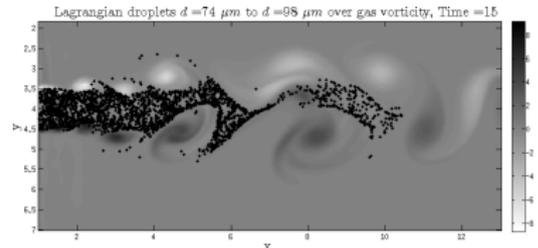
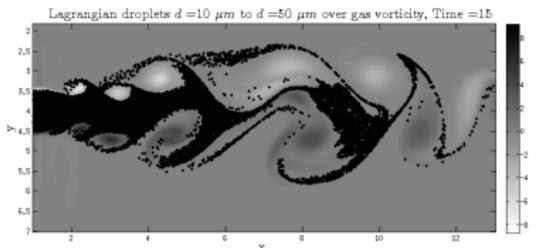
raffinement en espace raffinement en taille	300 \times 75 10 sections	400 \times 100 10 sections	800 \times 200 20 sections
coût CPU ($\times 1000s$)	5	20	150

- niveau DPS : 1 réalisation
- calcul raffiné : bruit limité sur une projection Eulérienne
- le calcul Eulérien va 5 fois moins vite qu'un calcul DPS ; mais haute capacité de parallélisation

Cas évaporant

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé qui s'évapore

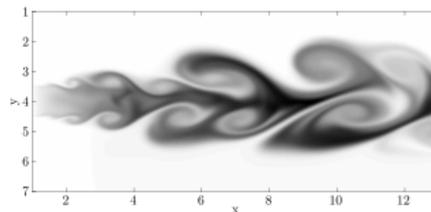
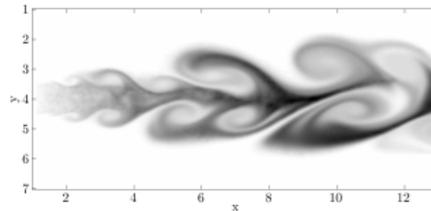
► distribution log-normale à l'injection



Cas évaporant

Jets libres entraînant un brouillard de gouttes polydispersé qui s'évapore

- ▶ possibilité d'avoir la fraction massique de combustible évaporé.



Plan

► Introduction

Problématique

Type de modèles

► Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

► Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

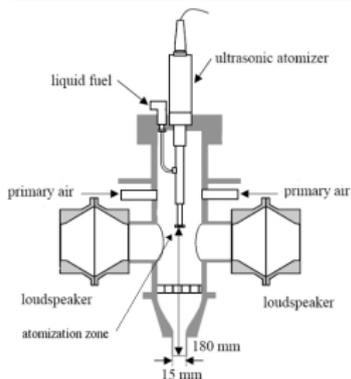
Premiers résultats 3D

► Conclusions

Configuration expérimentale : jet libre pulsé

Expériences (ANR JéDyS)

- ▶ Réalisée par C. Lacour (IFP), D. Durox, S. Ducruix (EM2C)
- ▶ En situation contrôlée : jet laminaire pulsé acoustiquement
- ▶ Génération d'ondes acoustiques longitudinales grâce à des hauts-parleurs
- ▶ Spray généré par un atomiseur ultrasonique



expérience



Simulations

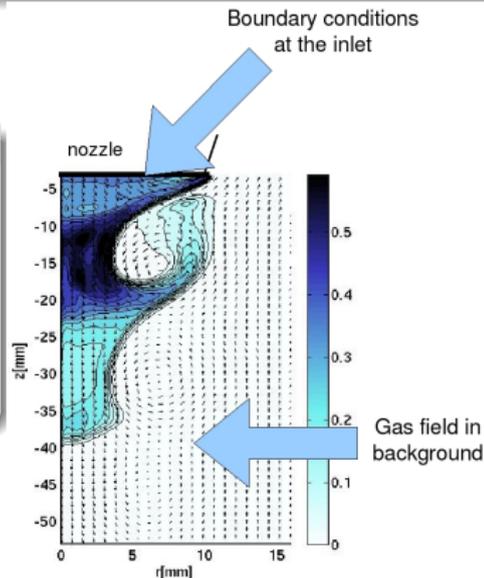
Mesures expérimentales

- ▶ Une période est divisée en 20 phases
- ▶ **Gaz** : Champ de vitesse
- ▶ **Gouttes** : densité et vitesses conditionnées par la taille

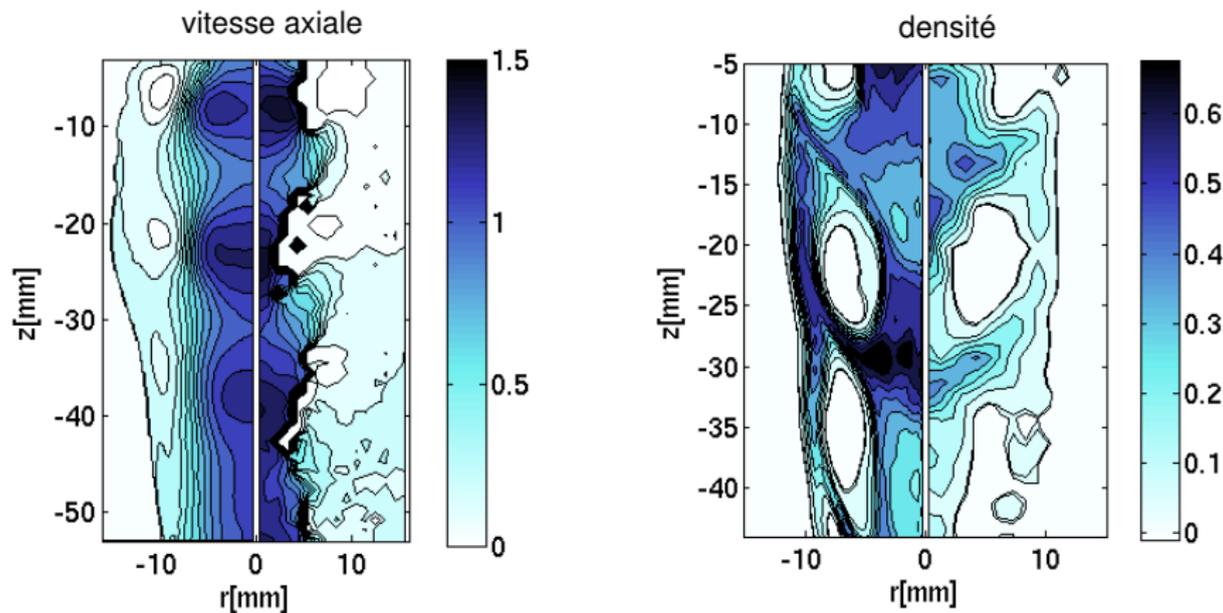
Mise en place numérique de la simulation

- ▶ Utilisation des données expérimentales
champs gazeux expérimentaux
⇒ interpolations spatiales et temporelles
conditions aux limites
- ▶ grille numérique : 200×200 ; 20 sections
- ▶ ≥ 4 h de calculs

Concentration préférentielle des gouttes



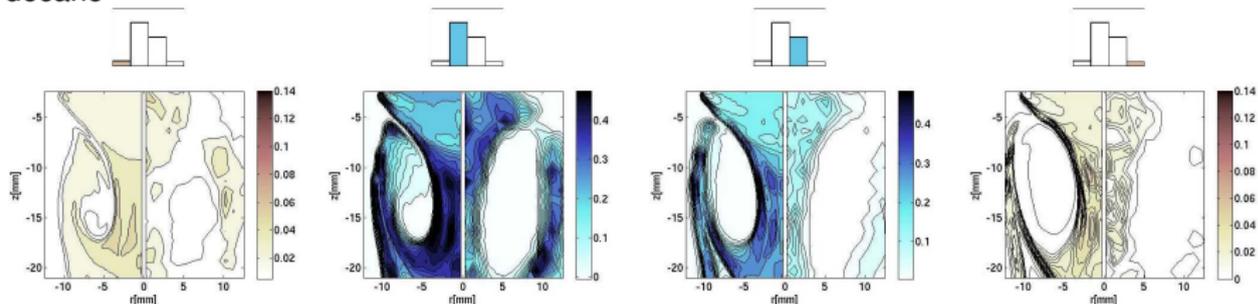
Comparaisons : vitesse axiale et densité



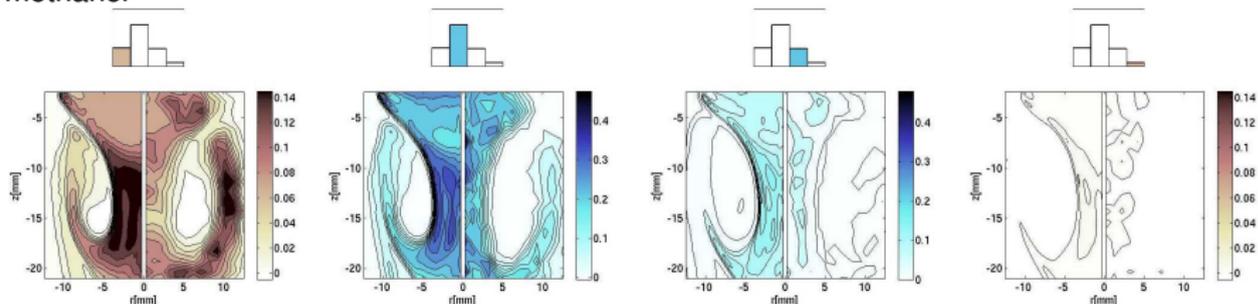
les gouttes sont accélérées et décélérées

Comparaisons des densités conditionnées par la taille

décane



methanol



0-15 μm

15-30 μm

30-45 μm

45-60 μm

⇒ Niveau de comparaison semi-quantitatif

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié et méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié et méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

Quelle technique de décomposition ?

Méthode de moments	→	tableau de dimension Nmom
Discretisation des tailles de gouttes en section	→	Nmom · Nsec
Discretisation du domaine	→	Nx · Ny · Nz · Nmom · Nsec

Quelle technique de décomposition ?

Méthode de moments	→	tableau de dimension Nmom
Discrétisation des tailles de gouttes en section	→	Nmom · Nsec
Discrétisation du domaine	→	Nx · Ny · Nz · Nmom · Nsec

Tableaux de données : $N_{mom} \times N_{sec} \times N_x \times N_y \times N_z$
 $N_{sec} \times N_x \times N_y \times N_z \times N_{mom}$
 $N_x \times N_y \times N_z \times N_{mom} \times N_{sec}$

Quelle technique de décomposition ?

Méthode de moments	→	tableau de dimension Nmom
Discrétisation des tailles de gouttes en section	→	Nmom · Nsec
Discrétisation du domaine	→	Nx · Ny · Nz · Nmom · Nsec

Tableaux de données : Nmom × Nsec × Nx × Ny × Nz
Nsec × Nx × Ny × Nz × Nmom
Nx × Ny × Nz × Nmom × Nsec

Quelle(s) décomposition(s) de domaine choisir ?
(Nmom = Ndim+1, Nsec = 10 à 20, Nx=Ny=Nz=128)

Quelle technique de décomposition ?

Méthode de moments	→	tableau de dimension Nmom
Discrétisation des tailles de gouttes en section	→	Nmom · Nsec
Discrétisation du domaine	→	Nx · Ny · Nz · Nmom · Nsec

Tableaux de données : Nmom × Nsec × Nx × Ny × Nz
Nsec × Nx × Ny × Nz × Nmom
Nx × Ny × Nz × Nmom × Nsec

Quelle(s) décomposition(s) de domaine choisir ?
(Nmom = Ndim+1, Nsec = 10 à 20, Nx=Ny=Nz=128)

Pas de solution générale, ca dépend du problème !

Décomposition de domaine (1)

On veut trouver la meilleure décomposition de domaine = MD.

- Splitting** → meilleure décomposition de domaine pour le transport dans l'espace physique = MD1
- meilleure décomposition de domaine pour le transport dans l'espace des phases = MD2

Décomposition de domaine (1)

On veut trouver la meilleure décomposition de domaine = MD.

- Splitting** → meilleure décomposition de domaine pour le transport dans l'espace physique = MD1
- meilleure décomposition de domaine pour le transport dans l'espace des phases = MD2

$$\mathbf{MD} = \mathbf{MD1} \cap \mathbf{MD2}$$

Décomposition de domaine (2) - Espace des phases

Transport dans l'espace des phases

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}u^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}u^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}u^{(j+1)} + m^{(j)}F^{(j)}\end{aligned}$$

Décomposition de domaine (2) - Espace des phases

Transport dans l'espace des phases

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}u^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}u^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}u^{(j+1)} + m^{(j)}F^{(j)}\end{aligned}$$

→ Problème local qui ne dépend pas des points voisins

→ dépend de la section voisine

Décomposition de domaine (2) - Espace des phases

Transport dans l'espace des phases

$$\begin{aligned}\partial_t(m^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)} \\ \partial_t(m^{(j)}u^{(j)}) &= - (E_1^{(j)} + E_2^{(j)})m^{(j)}u^{(j)} + E_1^{(j+1)}m^{(j+1)}u^{(j+1)} + m^{(j)}F^{(j)}\end{aligned}$$

→ Problème local qui ne dépend pas des points voisins

Décomposition du domaine spatiale très avantageuse

→ dépend de la section voisine

Pas intérêt à découper les sections

Décomposition de domaine (3) - Espace physique

Transport dans l'espace physique

Les systèmes d'équations sont écrits **pour chaque section j**.

Obtention de l'évolution des équations pour les quantités moyennées ρ_i and $q_i = (\rho u)_i$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^1 - F_{i-1/2}^1)$$

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^2 - F_{i-1/2}^2)$$

où $F_{i\pm 1/2}^1$ et $F_{i\pm 1/2}^2$ sont les flux aux frontières de la cellule pour ρ_i et q_i .

Décomposition de domaine (3) - Espace physique

Transport dans l'espace physique

Les systèmes d'équations sont écrits **pour chaque section j**.

Obtention de l'évolution des équations pour les quantités moyennées ρ_i and $q_i = (\rho u)_i$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^1 - F_{i-1/2}^1)$$

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^2 - F_{i-1/2}^2)$$

où $F_{i\pm 1/2}^1$ et $F_{i\pm 1/2}^2$ sont les flux aux frontières de la cellule pour ρ_i et q_i .

→ Problème **non** local qui dépend des points voisins

→ Résolution indépendante pour chaque section

Décomposition de domaine (3) - Espace physique

Transport dans l'espace physique

Les systèmes d'équations sont écrits **pour chaque section j**.

Obtention de l'évolution des équations pour les quantités moyennées ρ_i and $q_i = (\rho u)_i$

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^1 - F_{i-1/2}^1)$$

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^2 - F_{i-1/2}^2)$$

où $F_{i\pm 1/2}^1$ et $F_{i\pm 1/2}^2$ sont les flux aux frontières de la cellule pour ρ_i et q_i .

→ Problème **non** local qui dépend des points voisins

Décomposition du domaine spatiale ⇒ communications entre proc

→ Résolution indépendante pour chaque section

On peut paralléliser en section

Décomposition de domaine (4)

Transport dans l'espace des phases

→ Problème local qui ne dépend pas des points voisins

Décomposition du domaine spatiale très avantageuse

→ dépend de la section voisine

Pas intérêt à découper les sections

Transport dans l'espace physique

→ Problème **non** local qui dépend des points voisins

Décomposition du domaine spatiale ⇒ communications entre proc

→ Résolution indépendante pour chaque section

On peut paralléliser en section

$$MD1 \cap MD2 = \emptyset$$

Structure de données (Fortran)

Transport dans l'espace des phases : local en (x,y,z)

⇒ On a une dépendance en section

⇒ section suivant la première dimension : $\text{Tab}(N_s, N_x, N_y, N_z)$

```
DO z=1,...  
    DO y=1,...  
        DO x=1,...  
            DO s=1,...
```

Transport dans l'espace physique : local en S

⇒ On a une dépendance en espace

⇒ espace dans les premières dimensions : $\text{Tab}(N_x, N_y, N_z, N_s)$

```
DO s=1,...  
    DO z=1,...  
        DO y=1,...  
            DO x=1,...
```

Stratégies de parallélisation

Espace physique privilégié : $\text{Tab}(N_x, N_y, N_z, N_s)$

- ⇒ Découpage en suivant une direction s : trop restrictif
- ⇒ Découpage en suivant deux directions s et z : **test1**

Espace des phases privilégié : $\text{Tab}(N_s, N_x, N_y, N_z)$

- ⇒ Découpage en suivant une direction z : **test2a**
- ⇒ Découpage en suivant deux direction z et y : **test2b**

Pas de privilégié, méthode mixte

- ⇒ Découpage suivant s et z puis suivant z : **test3**

Choix de la stratégie

Domaine	procs	test2a Z	test2b Z-Y(2)	test2b Z-Y(4)	test1 S-Z	test3 S-Z/Z
Cas Infinyband						
10×250^3	60	148	107	93	154	934
10×125^3	60	21	15	12	22	287
10×125.250^2	60	74	65	47	80	573
Cas Gigabit						
10×125^3	12	66	83	79	0	0
$10 \times 125^2 \times 250$	12	136	125	149	0	0
$10 \times 125 \times 250^2$	12	260	162	242	0	0
$10 \times 125^2 \times 500$	12	175	231	249	0	0
$10. \times 250^2 \times 500$	12	942	915	635	0	0
10×250^3	10	375	607	0	0	0

Choix de la stratégie

Domaine	procs	test2a Z	test2b Z-Y(2)	test2b Z-Y(4)	test1 S-Z	test3 S-Z/Z
Cas Infinyband						
10×250^3	60	148	107	93	154	934
10×125^3	60	21	15	12	22	287
10×125.250^2	60	74	65	47	80	573
Cas Gigabit						
10×125^3	12	66	83	79	0	0
$10 \times 125^2 \times 250$	12	136	125	149	0	0
$10 \times 125 \times 250^2$	12	260	162	242	0	0
$10 \times 125^2 \times 500$	12	175	231	249	0	0
$10. \times 250^2 \times 500$	12	942	915	635	0	0
10×250^3	10	375	607	0	0	0

Étude des transferts

Cas test : 10×125^3

⇒ en Z :

Quantité de données : 10×125^2

Nombre de transfert : $(Np - 1) \times 2 = 59 \times 2 = 118$

⇒ en Z-Y(2) :

Quantité de données(1) : $10 \times 125 \times 62$

Quantité de données(2) : $(10 \times 125) \times 4$

Nombre de transfert(1) : $(Np/2 - 1) \times 2 \times 2 = 29 \times 4 = 116$

Nombre de transfert(2) : $(Np/2) \times 2 = 30 \times 2 = 60$

⇒ en Z-Y(4) :

Quantité de données(1) : $10 \times 125 \times 31$

Quantité de données(2) : $(10 \times 125) \times 8$

Nombre de transfert(1) : $(Np/4 - 1) \times 2 \times 4 = 112$

Nombre de transfert(2) : $(Np/2) \times 2 \times 3 = 30 \times 3 = 90$

Étude des transferts

Cas test : 10×125^3

⇒ en Z :

Nb données transférées : 18437500

Nb total de transferts : 118

⇒ en Z-Y(2) :

Quantité de données(1) : $10 \times 125 \times 62$

Quantité de données(2) : $(10 \times 125) \times 4$

Nombre de transfert(1) : $(Np/2 - 1) \times 2 \times 2 = 29 \times 4 = 116$

Nombre de transfert(2) : $(Np/2) \times 2 = 30 \times 2 = 60$

⇒ en Z-Y(4) :

Quantité de données(1) : $10 \times 125 \times 31$

Quantité de données(2) : $(10 \times 125) \times 8$

Nombre de transfert(1) : $(Np/4 - 1) \times 2 \times 4 = 112$

Nombre de transfert(2) : $(Np/2) \times 2 \times 3 = 30 \times 3 = 90$

Étude des transferts

Cas test : 10×125^3

⇒ en Z :

Nb données transférées : 18437500

Nb total de transferts : 118

⇒ en Z-Y(2) :

Nb données transférées : 9290000

Nb total de transferts : 176

⇒ en Z-Y(4) :

Quantité de données(1) : $10 \times 125 \times 31$

Quantité de données(2) : $(10 \times 125) \times 8$

Nombre de transfert(1) : $(Np/4 - 1) \times 2 \times 4 = 112$

Nombre de transfert(2) : $(Np/2) \times 2 \times 3 = 30 \times 3 = 90$

Étude des transferts

Cas test : 10×125^3

⇒ en Z :

Nb données transférées : 18437500

Nb total de transferts : 118

⇒ en Z-Y(2) :

Nb données transférées : 9290000

Nb total de transferts : 176

⇒ en Z-Y(4) :

Nb données transférées : 4430000

Nb total de transferts : 202

Étude des transferts

Cas test : 10×125^3

⇒ en Z :

Nb données transférées : 18437500

Nb total de transferts : 118

⇒ en Z-Y(2) :

Nb données transférées : 9290000

Nb total de transferts : 176

⇒ en Z-Y(4) :

Nb données transférées : 4430000

Nb total de transferts : 202

**Peu de données à transférer
beaucoup d'appel de transfert**

Résumé

Meilleure stratégie pour le calcul parallèle

- ▶ Décomposition spatiale du domaine
- ▶ Sur Infinyband, peu de données à transférer, mais beaucoup de transferts

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié et méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

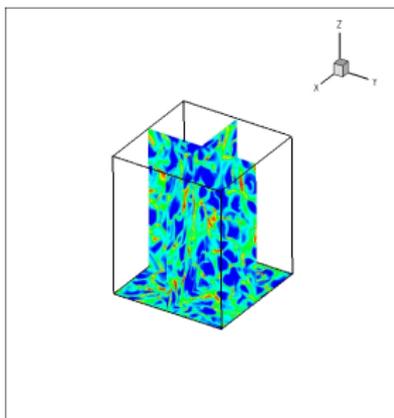
Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

Premiers résultats tridimensionnels

Configuration

- ▶ Champ gazeux de turbulence homogène isotrope gelé
- ▶ répartition uniforme des gouttes dans le domaine
- ▶ 27 processeurs
- ▶ 9h de calcul



Premiers résultats tridimensionnels

- ▶ petites gouttes, faible nombre de Stokes

faible Stokes de gouttes

- ▶ grosses gouttes, nombre de Stokes élevé

Stokes de gouttes élevé

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

▶ Conclusions

Plan

▶ Introduction

Problématique

Type de modèles

▶ Modèles Multi-fluides Eulériens

Dérivation du modèle multi-fluides dans un cas simplifié

Méthodes numériques

Jets diphasiques - Comparaisons avec le Lagrangien

Jets diphasiques - Comparaisons expérimentales

▶ Parallélisation

Technique de décomposition de domaine et MPI

Premiers résultats 3D

Conclusions

Conclusions

- ▶ Développement d'un **modèle Eulérien** capable de capturer la **polydispersion et la dynamique des gouttes conditionnée par leur taille** ;
- ▶ modèle alternatif à la méthode lagrangienne habituellement utilisée
- ▶ Validation des méthodes par comparaisons avec des méthodes Lagrangiennes et des mesures expérimentales
- ▶ Utilisation de **méthodes numériques** adaptées et appropriées au calcul parallèle
- ▶ Le type de décomposition de domaine dépend du problème **et des machines**

Collaborations et projets

Collaborations

- ▶ **EM2C-Math** Marc Massot, Stéphane de Chaisemartin, Lucie Fréret, Damien Kah
- ▶ **EM2C-Expérimental** Corine Lacour (IFP), Daniel Durox, Sébastien Ducruix
- ▶ **CORIA, Rouen** Julien Reveillon, Olivier Thomine, Bruno Delhom
- ▶ **Iowa State University** Rodney O. Fox

Projets

- ▶ **ACI Nouvelles Interfaces de Mathématiques** 2003-2006 (Resp. M. Massot, EM2C ; S. Descombes, J. A. Dieudonné Nice)
- ▶ Projet **ANR jéDYS** 2005-2008 (Resp. M. Massot, EM2C)
- ▶ Projet **PEPS** Dpt MPPU et ST2I 2007-2008 (Resp. A. Bourdon, F. Laurent, EM2C)
- ▶ Tâche (Resp. M. Massot, J. Reveillon) du **projet Européen TIMECOP-AE** (Toward Innovative Methods for Combustion Prediction in Aeronautic Engines, 2006-2010), coordonné par SNECMA/Turbomeca
- ▶ Projet (Coord. M. Massot) au CTR08 : **twelfth biennial summer research program, Center for Turbulence Research**, Stanford University, July 6-August 1, 2008

Références



L. Freret, C. Lacour, S. de Chaisemartin, F. Laurent, S. Ducruix, D. Durox, M. Massot.

Pulsated free jets with polydisperse spray injection : Experiments and Numerical simulations, accepted to International Symposium on Combustion, 2008.



S. de Chaisemartin, L. Freret, F. Laurent, M. Massot, C. Lacour, A-L. Birbaud, S. Ducruix, D. Durox.

Pulsated free jets with spray injection : Eulerian Multi-Fluid modelling and simulation versus experimental measurements, Proceedings of the International Conference on Multiphase Flows, Leipzig, 2007.



S. de Chaisemartin, F. Laurent, M. Massot and J. Reveillon.

Evaluation of Eulerian Multi-Fluid versus Lagrangian methods for the ejection of polydisperse evaporating sprays by vortices submitted to J. Comp. Phys. Preprint available



S. Jin F. Bouchut and X.li.

Numerical approximations of pressureless and isothermal gas dynamics.
Siam J. Numer. Anal., (41) :135–158, 2003.



M. Massot

*Eulerian multi-fluid modelling for polydisperse evaporating sprays
CISM Courses and Lectures. Udine 2006*