



ONERA



Région Centre



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Modélisation et simulation de l'atomisation secondaire et de la vaporisation turbulente. Application à la combustion cryotechnique.

Emmanuel BODÈLE

*Centre National de la Recherche Scientifique
Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs*

26 mai 2004

Plan de la présentation

- ▣ Contexte de l'étude

Plan de la présentation

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude

Plan de la présentation

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▶ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▶ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▶ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▶ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*

Plan de la présentation

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*

Plan de la présentation

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

Contexte de l'étude

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

Contexte de l'étude

- ❑ Échecs des lanceurs ARIANE 3 (V15 en 1985) et ARIANE 2 (V18 en 1986)

Contexte de l'étude

- ❑ Échecs des lanceurs ARIANE 3 (V15 en 1985) et ARIANE 2 (V18 en 1986)
- ❑ Nécessité de comprendre les processus élémentaires se déroulant dans la chambre de combustion d'un moteur-fusée à ergols liquides

Contexte de l'étude

- ❑ Échecs des lanceurs ARIANE 3 (V15 en 1985) et ARIANE 2 (V18 en 1986)
- ❑ Nécessité de comprendre les processus élémentaires se déroulant dans la chambre de combustion d'un moteur-fusée à ergols liquides
- ❑ Réduire les coûts et les délais de développement

Contexte de l'étude

- ❑ Échecs des lanceurs ARIANE 3 (V15 en 1985) et ARIANE 2 (V18 en 1986)
- ❑ Nécessité de comprendre les processus élémentaires se déroulant dans la chambre de combustion d'un moteur-fusée à ergols liquides
- ❑ Réduire les coûts et les délais de développement
- ❑ Développement du lanceur ARIANE 5 (moteur cryotechnique VULCAIN)

Contexte de l'étude



- ❑ Échecs des lanceurs ARIANE 3 (V15 en 1985) et ARIANE 2 (V18 en 1986)
- ❑ Nécessité de comprendre les processus élémentaires se déroulant dans la chambre de combustion d'un moteur-fusée à ergols liquides
- ❑ Réduire les coûts et les délais de développement
- ❑ Développement du lanceur ARIANE 5 (moteur cryotechnique VULCAIN)

Création du Groupe de Recherche
« *Combustion dans les Moteurs-
Fusées* » (1993), unissant le CNES,
la SNECMA, l'ONERA et le CNRS

Contexte de l'étude

Études entreprises au cours du GdR

- ❑ Combustion à forte variation de densité
- ❑ Techniques de mesures en combustion
- ❑ Cinétique chimique H_2-O_2
- ❑ Dispersion de brouillards denses
- ❑ Évaporation de gouttes en milieu turbulent
- ❑ Combustion de gouttes isolées
- ❑ Combustion de gouttes en interaction
- ❑ Rupture aérodynamique de gouttes et jets
- ❑ Développement des outils de simulation numérique
- ❑ Développement du banc d'essai MASCOTTE

Contexte de l'étude

Études entreprises au cours du GdR

- ❑ Combustion à forte variation de densité
- ❑ Techniques de mesures en combustion
- ❑ Cinétique chimique H_2-O_2
- ❑ Dispersion de brouillards denses
- ❑ Évaporation de gouttes en milieu turbulent
- ❑ Combustion de gouttes isolées
- ❑ Combustion de gouttes en interaction
- ❑ Rupture aérodynamique de gouttes et jets
- ❑ Développement des outils de simulation numérique
- ❑ Développement du banc d'essai MASCOTTE

Travaux en partie effectués au LCSR

Contexte de l'étude

Études entreprises au cours du GdR

- ❑ Évaporation de gouttes en milieu turbulent
- ❑ Rupture aérodynamique de gouttes et jets

Travaux en partie effectués au LCSR

- ➔ ❑ Caractérisation complète du processus de vaporisation d'une goutte isolée dans un environnement turbulent (Birouk, LCSR, 1996)

Contexte de l'étude

Études entreprises au cours du GdR

- ❑ Évaporation de gouttes en milieu turbulent
- ❑ Rupture aérodynamique de gouttes et jets

Travaux en partie effectués au LCSR

- ➔ ❑ Caractérisation complète du processus de vaporisation d'une goutte isolée dans un environnement turbulent (Birouk, LCSR, 1996)
- ➔ ❑ Caractérisation complète du processus de cassure d'une goutte cryogénique soumise à un écoulement sous haute pression et à haute vitesse (Vieille, LCSR, 1998)

Contexte de l'étude

Études entreprises au cours du GdR

- ❑ Évaporation de gouttes en milieu turbulent
- ❑ Rupture aérodynamique de gouttes et jets

Travaux en partie effectués au LCSR

- ❑ Caractérisation complète du processus de vaporisation d'une goutte isolée dans un environnement turbulent (Birouk, LCSR, 1996)
- ❑ Caractérisation complète du processus de cassure d'une goutte cryogénique soumise à un écoulement sous haute pression et à haute vitesse (Vieille, LCSR, 1998)

Deux bases de données précises

Objectifs de l'étude

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

Objectifs de l'étude

- ❑ Élaborer à partir de ces bases de données des modèles d'atomisation secondaire et de vaporisation turbulente

Objectifs de l'étude

- ❑ Élaborer à partir de ces bases de données des modèles d'atomisation secondaire et de vaporisation turbulente
- ❑ Les implanter dans des codes de calcul issus des recherches menées au cours du GdR
 - ▶ THÉSÉE (code SNECMA) pour le modèle de cassure secondaire
 - ▶ MSD (code ONERA) pour le modèle de vaporisation turbulente

Objectifs de l'étude

- ❑ Élaborer à partir de ces bases de données des modèles d'atomisation secondaire et de vaporisation turbulente
- ❑ Les implanter dans des codes de calcul issus des recherches menées au cours du GdR
 - ▶ THÉSÉE (code SNECMA) pour le modèle de cassure secondaire
 - ▶ MSD (code ONERA) pour le modèle de vaporisation turbulente
- ❑ Les utiliser sur des configurations simples (pour contrôler le comportement des modèles dans les codes)

Objectifs de l'étude

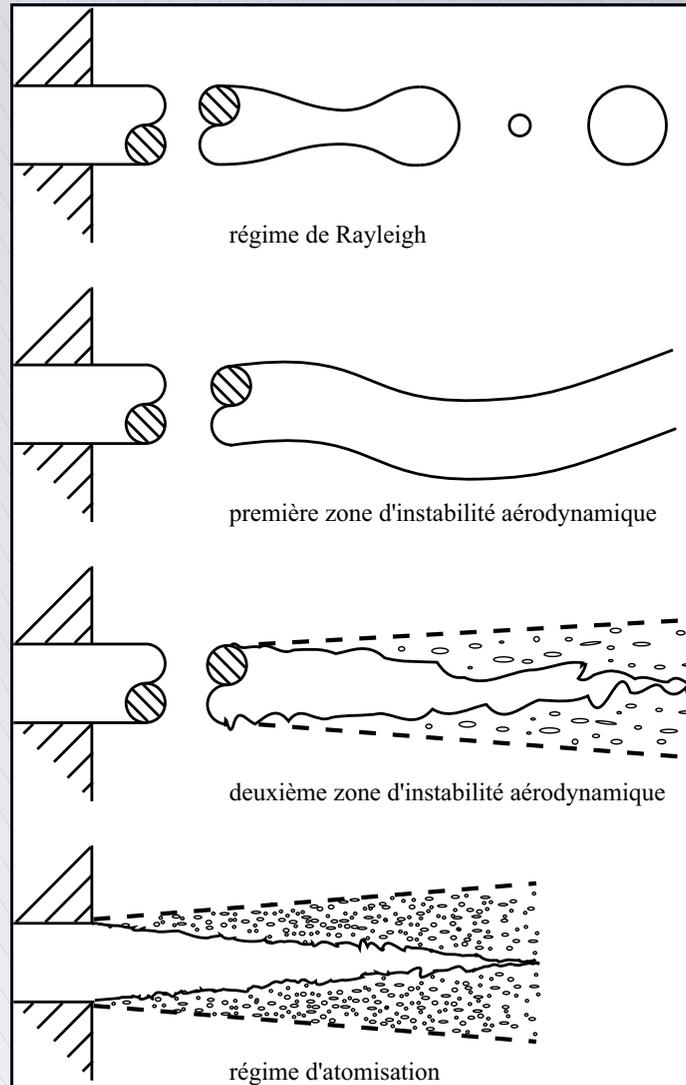
- ❑ Élaborer à partir de ces bases de données des modèles d'atomisation secondaire et de vaporisation turbulente
- ❑ Les implanter dans des codes de calcul issus des recherches menées au cours du GdR
 - ▶ THÉSÉE (code SNECMA) pour le modèle de cassure secondaire
 - ▶ MSD (code ONERA) pour le modèle de vaporisation turbulente
- ❑ Les utiliser sur des configurations simples (pour contrôler le comportement des modèles dans les codes)
- ❑ Les utiliser sur la configuration MASCOTTE et comparer les résultats aux bases de données expérimentales de combustion diphasique cryotechnique issues du GdR

L'atomisation secondaire

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▶ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▶ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▶ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▶ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▶ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▶ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▶ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

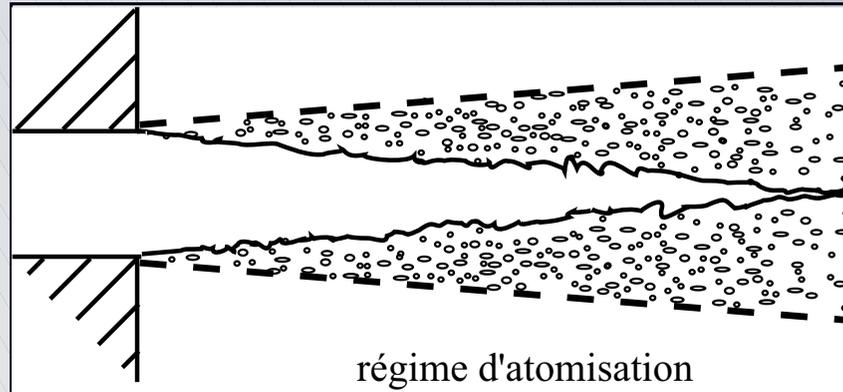
Processus d'atomisation

Le régime d'atomisation



Processus d'atomisation

Le régime d'atomisation

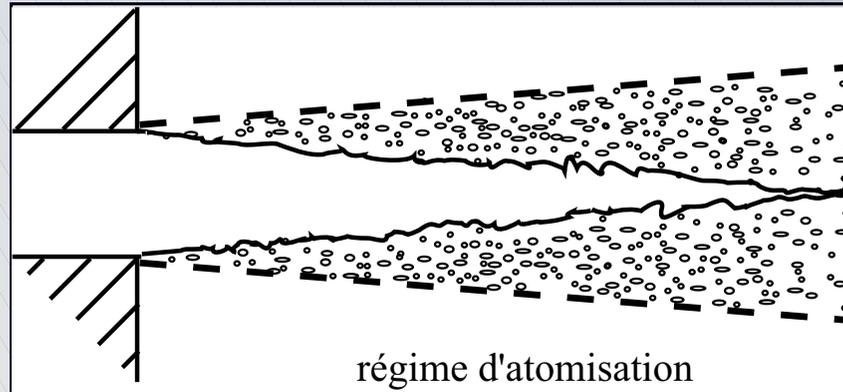


Régime d'atomisation d'un jet liquide décomposé en deux processus élémentaires :

- Atomisation primaire : déstabilisation de l'interface liquide-gaz, générant des fragments de « grandes dimensions » et de formes variées (ligaments, gouttes déformées...)

Processus d'atomisation

Le régime d'atomisation



Régime d'atomisation d'un jet liquide décomposé en deux processus élémentaires :

- ❑ Atomisation primaire : déstabilisation de l'interface liquide-gaz, générant des fragments de « grandes dimensions » et de formes variées (ligaments, gouttes déformées...)
- ❑ Atomisation secondaire : cassure des parcelles liquides issues de l'atomisation primaire pour former un brouillard de fines gouttelettes

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\textit{force aérodynamique}}{\textit{force de tension superficielle}}$$

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho_g D (U_g - U_l)^2}{\sigma}$$

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho_g D (U_g - U_l)^2}{\sigma}$$

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\text{force aérodynamique}}{\text{force de viscosité du gaz}}$$

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho_g D (U_g - U_l)^2}{\sigma}$$

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_g D |U_g - U_l|}{\mu_g}$$

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho_g D (U_g - U_l)^2}{\sigma}$$

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_g D |U_g - U_l|}{\mu_g}$$

Nombre d'Ohnesorge

$$Oh = \frac{\text{force de viscosité du liquide}}{(\text{force aérodynamique} \cdot \text{force de tension superficielle})^{1/2}}$$

Processus d'atomisation

Principaux paramètres caractéristiques

Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho_g D (U_g - U_l)^2}{\sigma}$$

Nombre de Reynolds

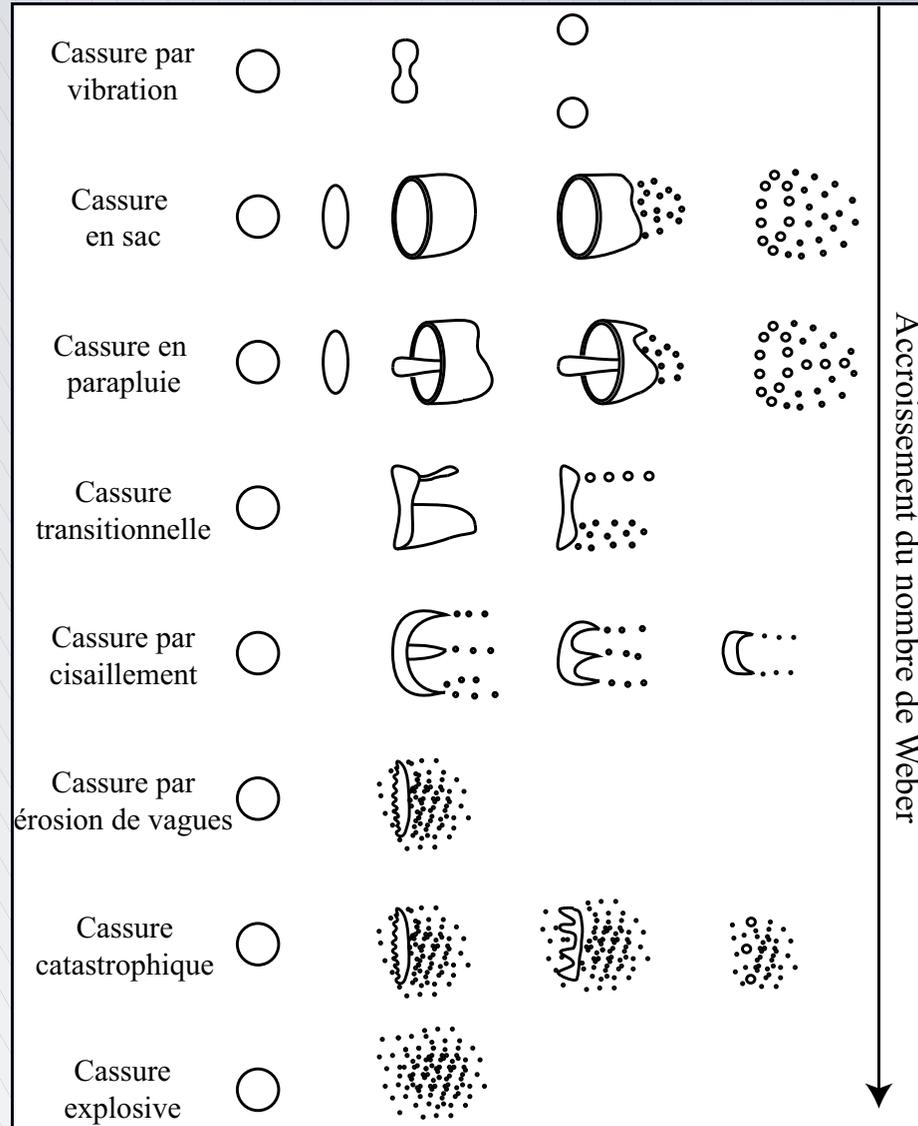
$$Re = \frac{\rho_g D |U_g - U_l|}{\mu_g}$$

Nombre d'Ohnesorge

$$Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l D \sigma}}$$

Processus d'atomisation

L'atomisation secondaire (Shraiber *et al.*, 1996)



Processus d'atomisation

Transitions entre les régimes de fragmentation

- Existence d'un nombre de Weber critique de cassure

- ▶ Pilch et Erdman (1987), Brodkey (1969)

$$We_c = 12 (1 + 1,077 Oh^{1,6})$$

Processus d'atomisation

Transitions entre les régimes de fragmentation

- Existence d'un nombre de Weber critique de cassure

- ▶ Pilch et Erdman (1987), Brodkey (1969)

$$We_c = 12 (1 + 1,077 Oh^{1,6})$$

- Transitions entre les régimes de cassure

- ▶ Taylor (1934)

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} = 0,503$$

- ▶ Gelfand (1996) pour $0,1 \text{ MPa} < P < 5 \text{ MPa}$:

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} = A(P) = 1,5 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{-0,5}$$

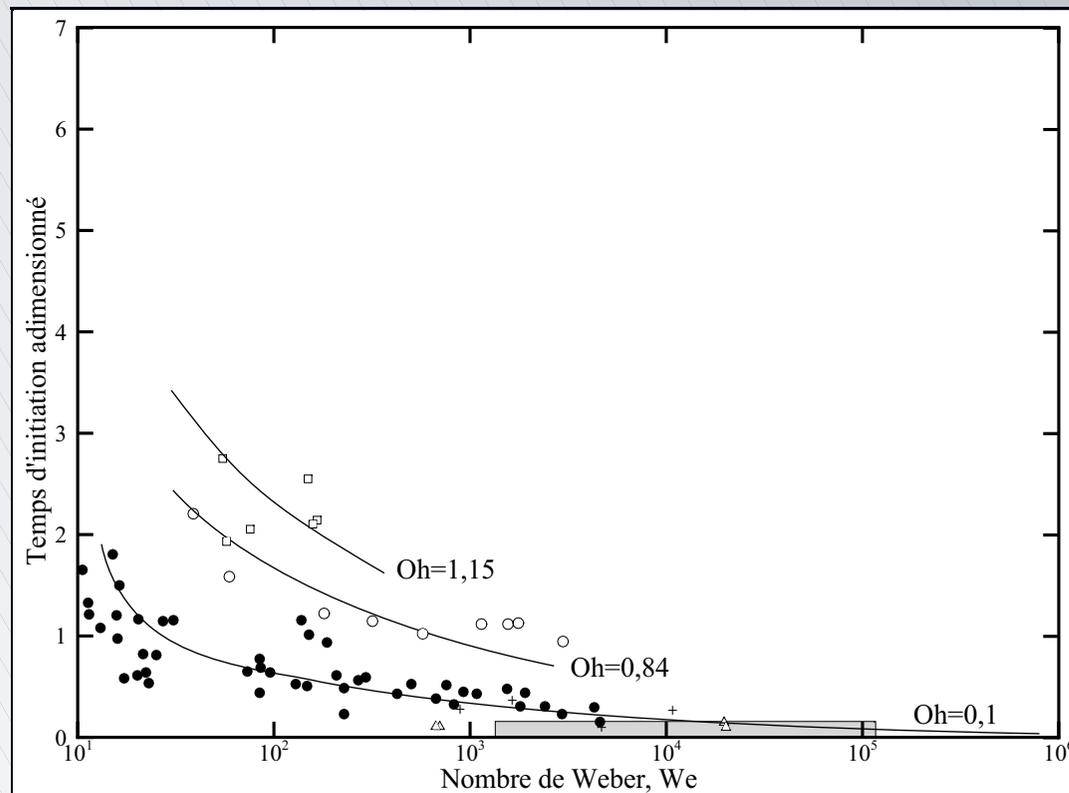
Processus d'atomisation

Les temps caractéristiques

Pilch et Erdman (1987)

- Temps d'initiation de la cassure ($Oh > 0,1$)

$$T_{ini} = 1,9 (We - 12)^{-0,25} (1 + 0,22 Oh^{1,6})$$



Processus d'atomisation

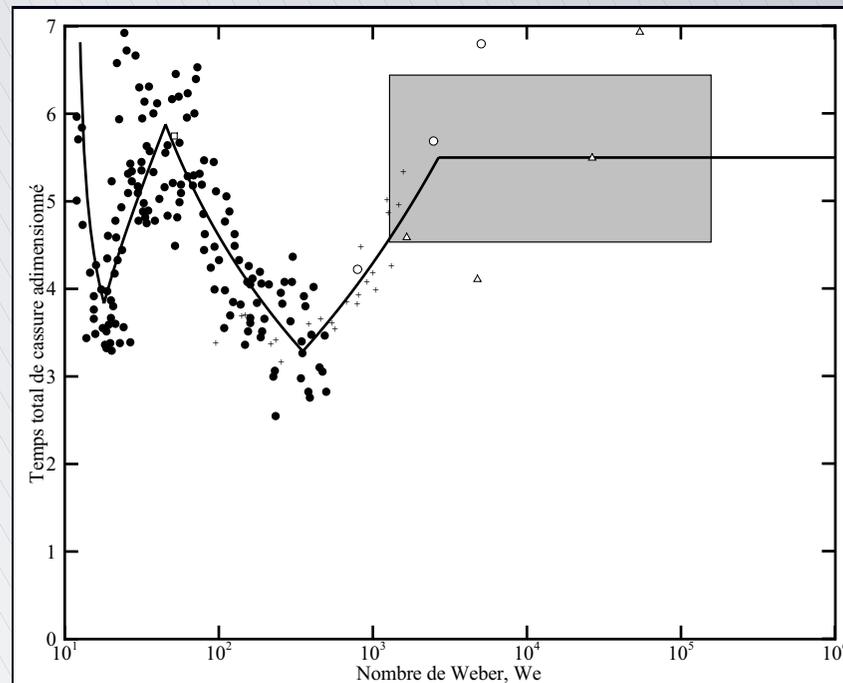
Les temps caractéristiques

Pilch et Erdman (1987)

- Temps d'initiation de la cassure ($Oh > 0,1$)

$$T_{ini} = 1,9 (We - 12)^{-0,25} (1 + 0,22 Oh^{1,6})$$

- Temps total de cassure



Processus d'atomisation

Les temps caractéristiques

Pilch et Erdman (1987)

- Temps d'initiation de la cassure ($Oh > 0,1$)

$$T_{ini} = 1,9 (We - 12)^{-0,25} (1 + 0,22 Oh^{1,6})$$

- Temps total de cassure

$$\left\{ \begin{array}{ll} T_{total} = 6 (We - 12)^{-0,25} & \text{pour } 12 \leq We \leq 18 \\ T_{total} = 2,45 (We - 12)^{0,25} & \text{pour } 18 \leq We \leq 45 \\ T_{total} = 14,1 (We - 12)^{-0,25} & \text{pour } 45 \leq We \leq 351 \\ T_{total} = 0,766 (We - 12)^{0,25} & \text{pour } 351 \leq We \leq 2670 \\ T_{total} = 5,5 & \text{pour } We \geq 2670 \end{array} \right.$$

Processus d'atomisation

Les temps caractéristiques

Pilch et Erdman (1987)

- Temps d'initiation de la cassure ($Oh > 0,1$)

$$T_{ini} = 1,9 (We - 12)^{-0,25} (1 + 0,22 Oh^{1,6})$$

- Temps total de cassure

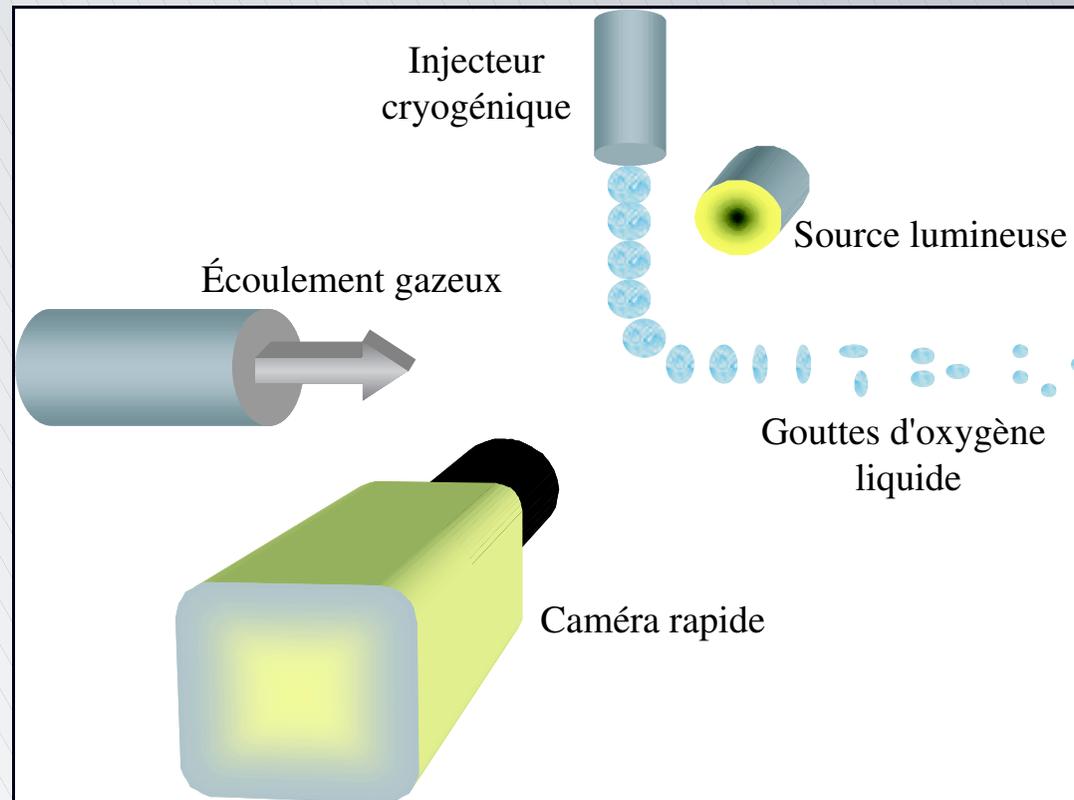
$$\left\{ \begin{array}{ll} T_{total} = 6 (We - 12)^{-0,25} & \text{pour } 12 \leq We \leq 18 \\ T_{total} = 2,45 (We - 12)^{0,25} & \text{pour } 18 \leq We \leq 45 \\ T_{total} = 14,1 (We - 12)^{-0,25} & \text{pour } 45 \leq We \leq 351 \\ T_{total} = 0,766 (We - 12)^{0,25} & \text{pour } 351 \leq We \leq 2670 \\ T_{total} = 5,5 & \text{pour } We \geq 2670 \end{array} \right.$$


$$T_{total} = 4,5 (1 + 1,2 Oh^{1,64}) \text{ pour } We < 228 \text{ et } Oh > 0,1$$

Modélisation de l'atomisation secondaire

Conditions expérimentales explorées

- Modélisation basée sur les expériences de Vieille (1998)



Modélisation de l'atomisation secondaire

Conditions expérimentales explorées

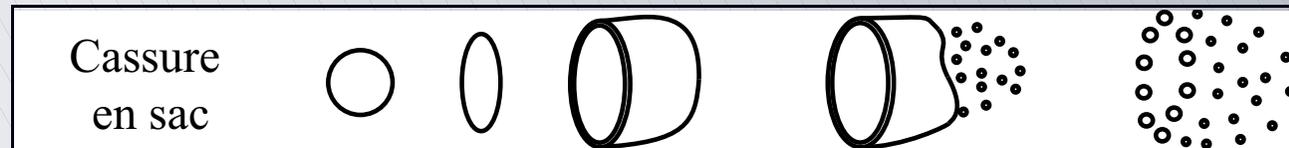
- Modélisation basée sur les expériences de Vieille (1998)
 - ▶ Goutte d'oxygène liquide en chute libre dans un écoulement d'hélium à grande vitesse ($V_{\max} = 37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et sous haute pression ($P_{\max} = 8 \text{ MPa} > P_{\text{crO}_2} = 5,09 \text{ MPa}$)
 - ▶ Rapport de densité DR de 63 à 6300
 - ▶ $We_{\max} = 180$, $Re_{\max} = 3300$, $Oh_{\max} = 1,4 \times 10^{-2}$
 - ▶ Caractérisation complète du processus de cassure
 - ▶ Obtention de données qualitatives (modes de cassure) et quantitatives (temps caractéristique de la cassure, distributions des gouttes secondaires)

Modélisation de l'atomisation secondaire

Modes de fragmentation

- ❑ Régimes observés par Vieille (1998), selon la classification de Shraiber (1996)

- ▶ Cassure en sac

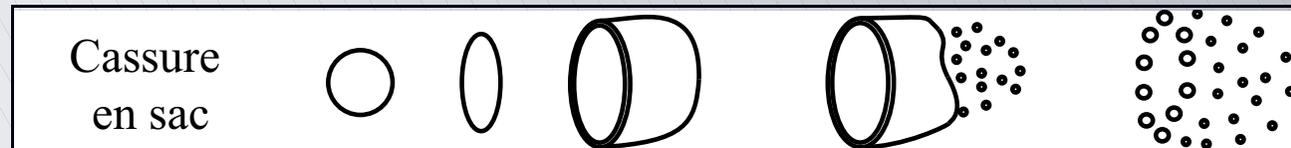


Modélisation de l'atomisation secondaire

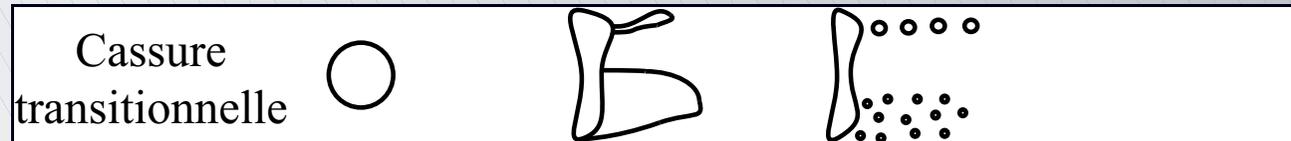
Modes de fragmentation

- ❑ Régimes observés par Vieille (1998), selon la classification de Shraiber (1996)

- ▶ Cassure en sac



- ▶ Cassure transitionnelle

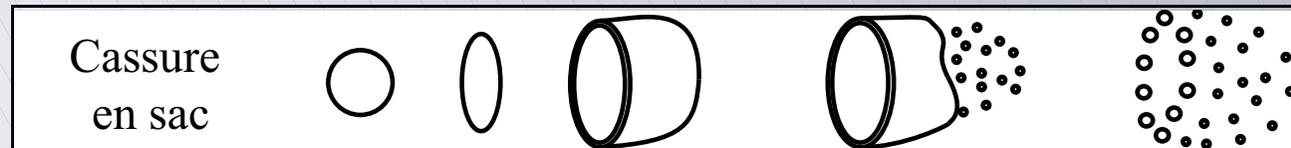


Modélisation de l'atomisation secondaire

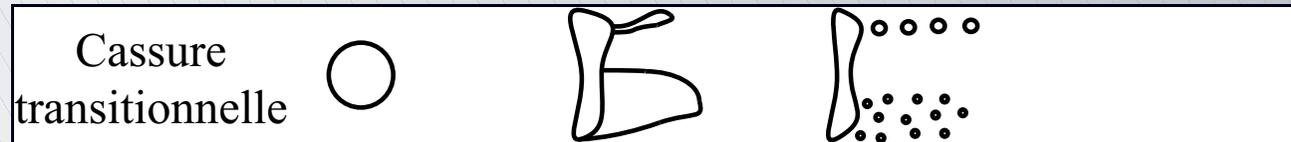
Modes de fragmentation

- ❑ Régimes observés par Vieille (1998), selon la classification de Shraiber (1996)

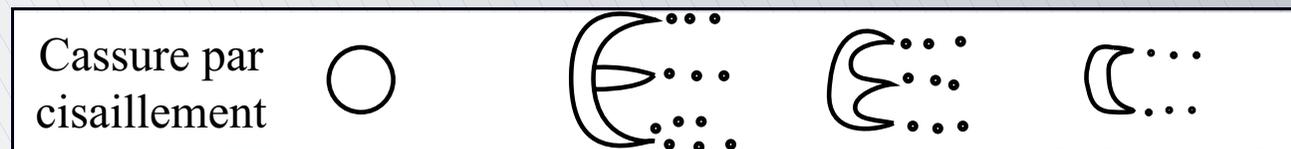
- ▶ Cassure en sac



- ▶ Cassure transitionnelle



- ▶ Cassure par cisaillement



Modélisation de l'atomisation secondaire

Transitions entre les régimes de cassure

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} = C \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{-0,5}$$

Modélisation de l'atomisation secondaire

Transitions entre les régimes de cassure

$$\frac{We}{\sqrt{Re}} = C \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{-0,5}$$

Régime de cassure	C
pas de cassure	$< 0,25$
cassure en sac	$0,25 - 0,7$
cassure transitionnelle	$0,7 - 0,9$
cassure par cisaillement	$> 0,9$

Modélisation de l'atomisation secondaire

Temps d'initiation de la cassure

$$T_{ini} = 0,75 \frac{D_0}{U} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} W e^{-0,06}$$

Modélisation de l'atomisation secondaire

Temps d'initiation de la cassure

$$T_{ini} = 0,75 \frac{D_0}{U} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} W e^{-0,06}$$

- ❑ Faible influence du nombre de Weber

Modélisation de l'atomisation secondaire

Temps d'initiation de la cassure

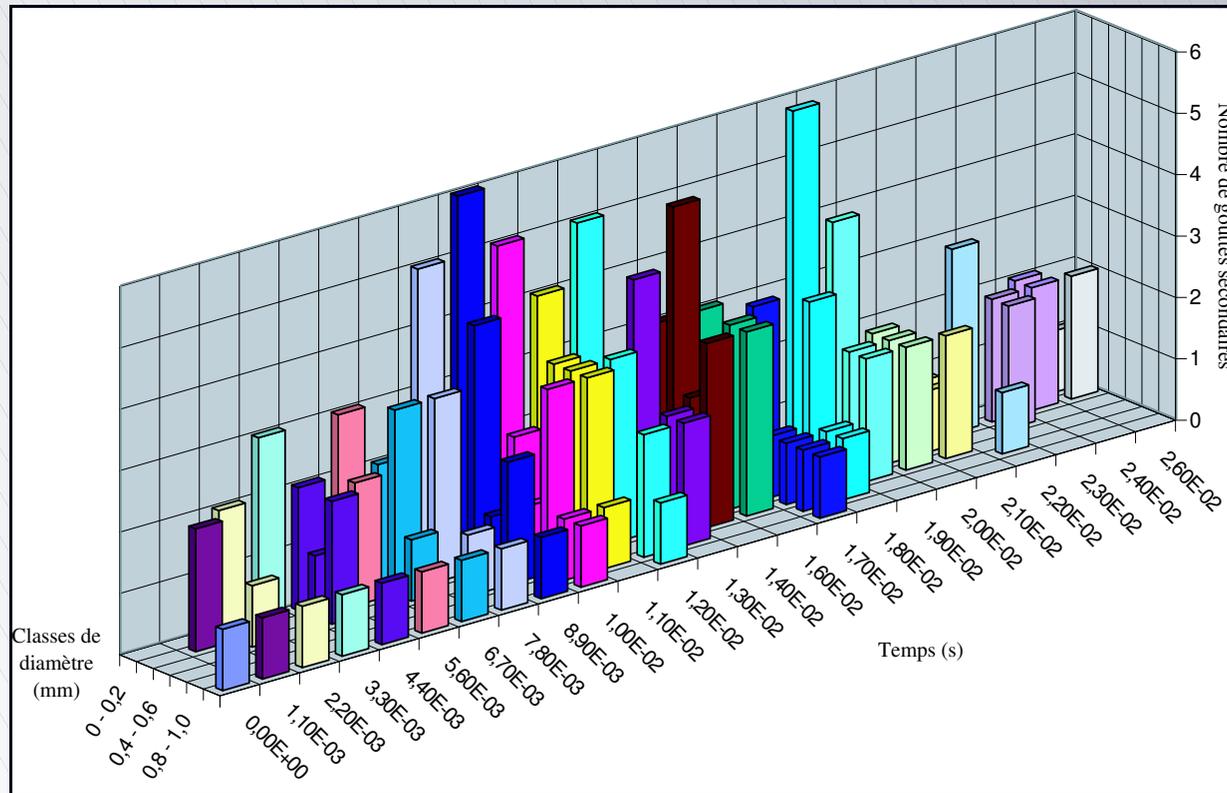
$$T_{ini} = 0,75 \frac{D_0}{U} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} W e^{-0,06}$$

- ▣ Faible influence du nombre de Weber
- ▣ Temps de normalisation (conservation de la quantité de mouvement à l'interface)

Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

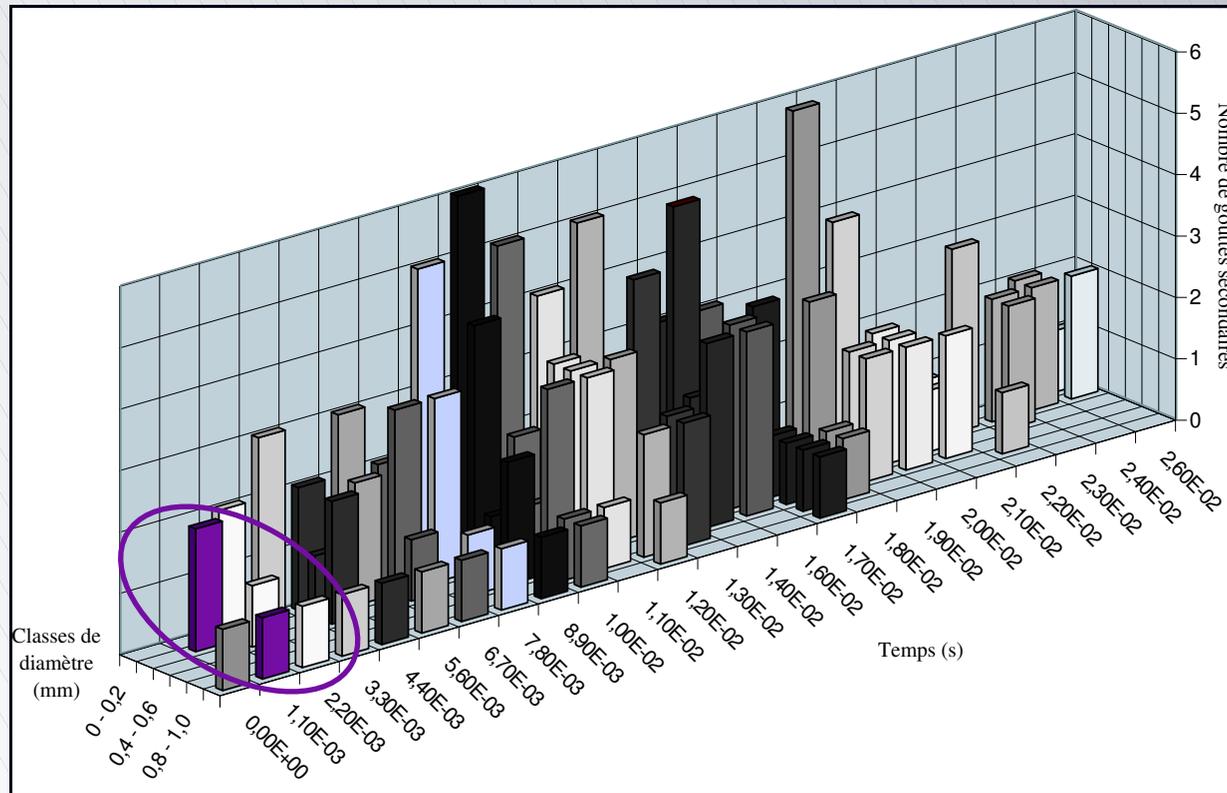
❑ Résultats expérimentaux



Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

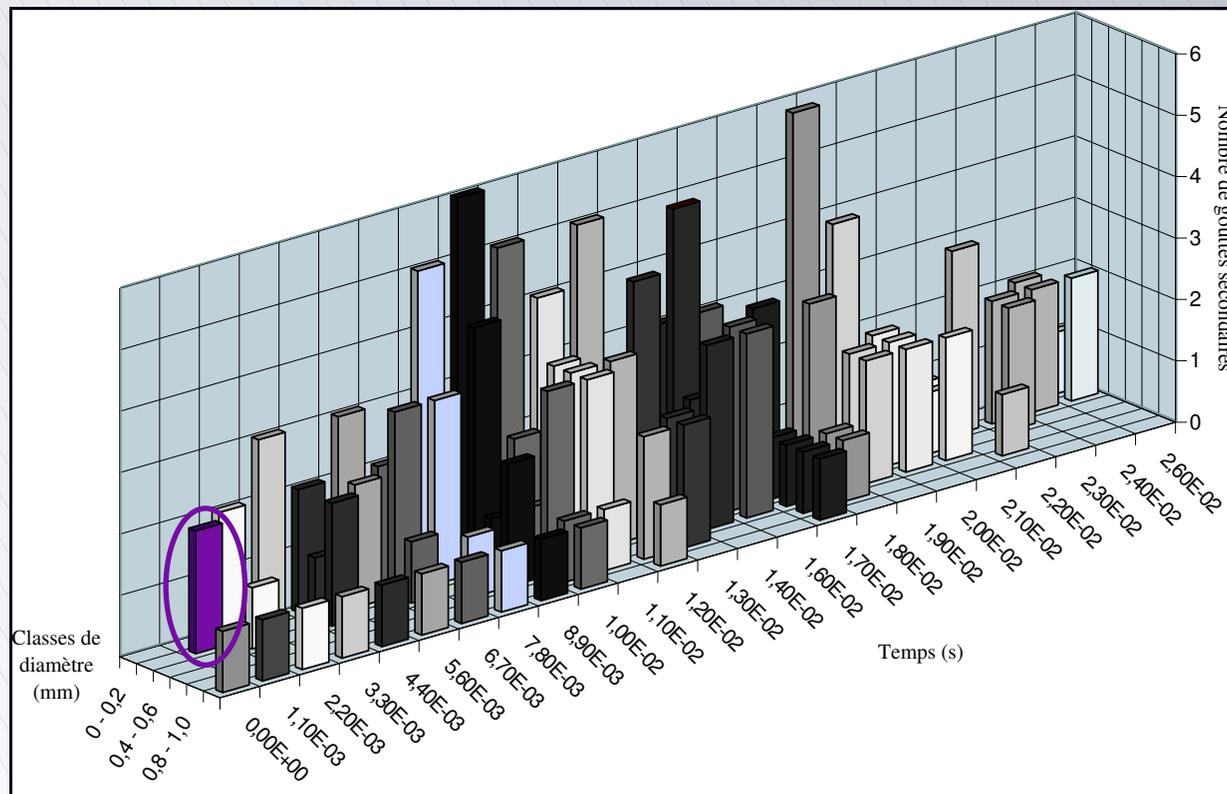
- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
 - ▶ Gouttes dans les classes inférieures \Rightarrow cassure



Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
 - ▶ Gouttes dans les classes inférieures \Rightarrow cassure
 - ▶ Détermination du nombre et du diamètre des gouttes



Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
 - ▶ Gouttes dans les classes inférieures \Rightarrow cassure
 - ▶ Détermination du nombre et du diamètre des gouttes
 - ▶ Répartition en classes simplifiées (10, 30 et 50 % du diamètre de la goutte initiale)

Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
 - ▶ Gouttes dans les classes inférieures \Rightarrow cassure
 - ▶ Détermination du nombre et du diamètre des gouttes
 - ▶ Répartition en classes simplifiées (10, 30 et 50 % du diamètre de la goutte initiale)
 - ▶ Moyenne du nombre de gouttes par classe simplifiée

Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
- ❑ Distributions simplifiées des gouttes secondaires :

Régime	Pourcentage du diamètre de la goutte initiale		
	10 %	30 %	50 %
Cassure en sac	2	2	1
Cassure transitionnelle	3	1	1
Cassure par cisaillement	4	2	2

Modélisation de l'atomisation secondaire

Distributions des gouttes secondaires

- ❑ Résultats expérimentaux
- ❑ Utilisation des histogrammes
- ❑ Distributions simplifiées des gouttes secondaires :

Régime	Pourcentage du diamètre de la goutte initiale		
	10 %	30 %	50 %
Cassure en sac	2	2	1
Cassure transitionnelle	3	1	1
Cassure par cisaillement	4	2	2

- ❑ Masse conservée \Rightarrow ajustement du diamètre initial

Régime	Résidus de la goutte initiale
Cassure en sac	93,60 %
Cassure transitionnelle	94,50 %
Cassure par cisaillement	86,20 %

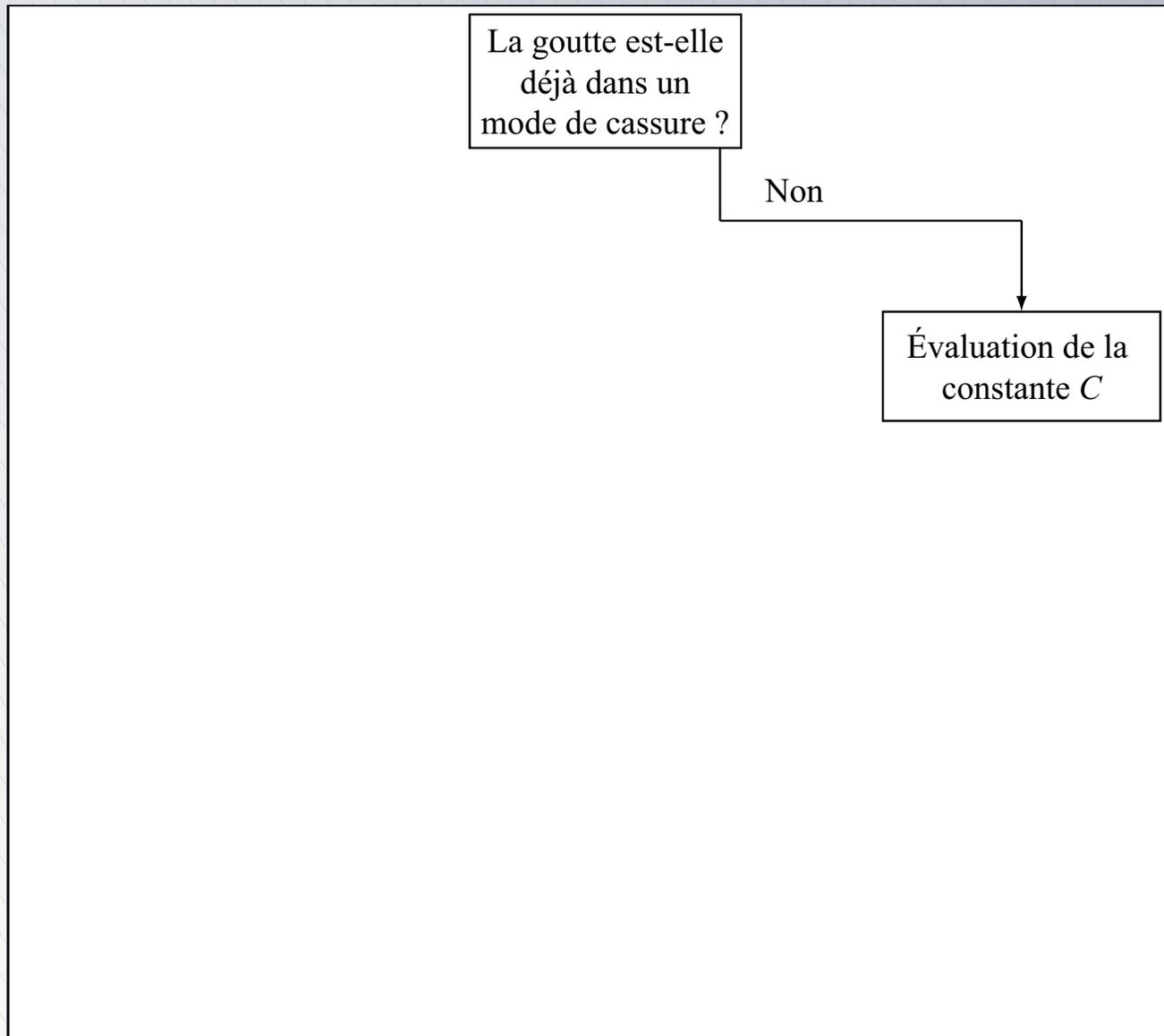
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire

La goutte est-elle
déjà dans un
mode de cassure ?

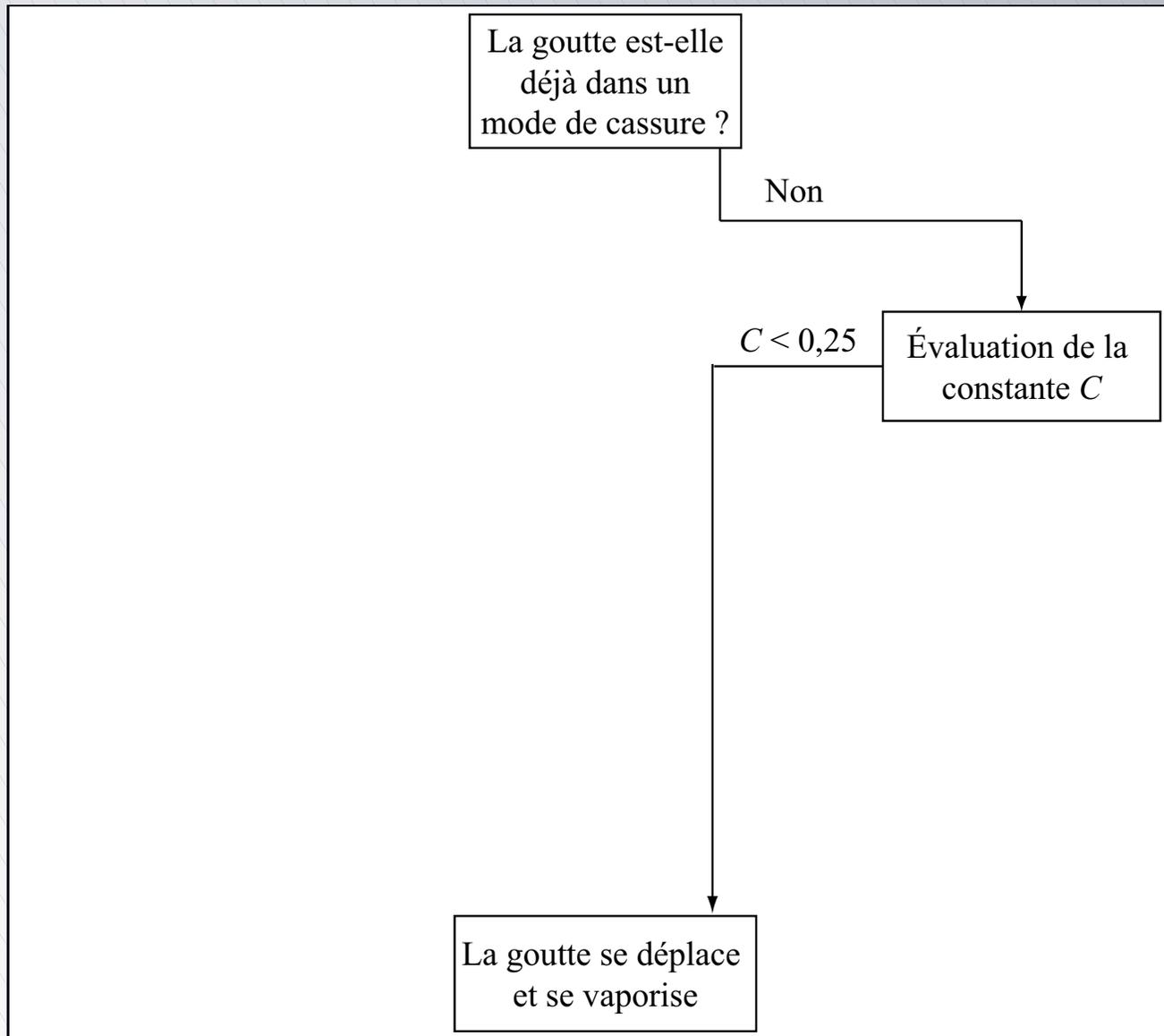
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



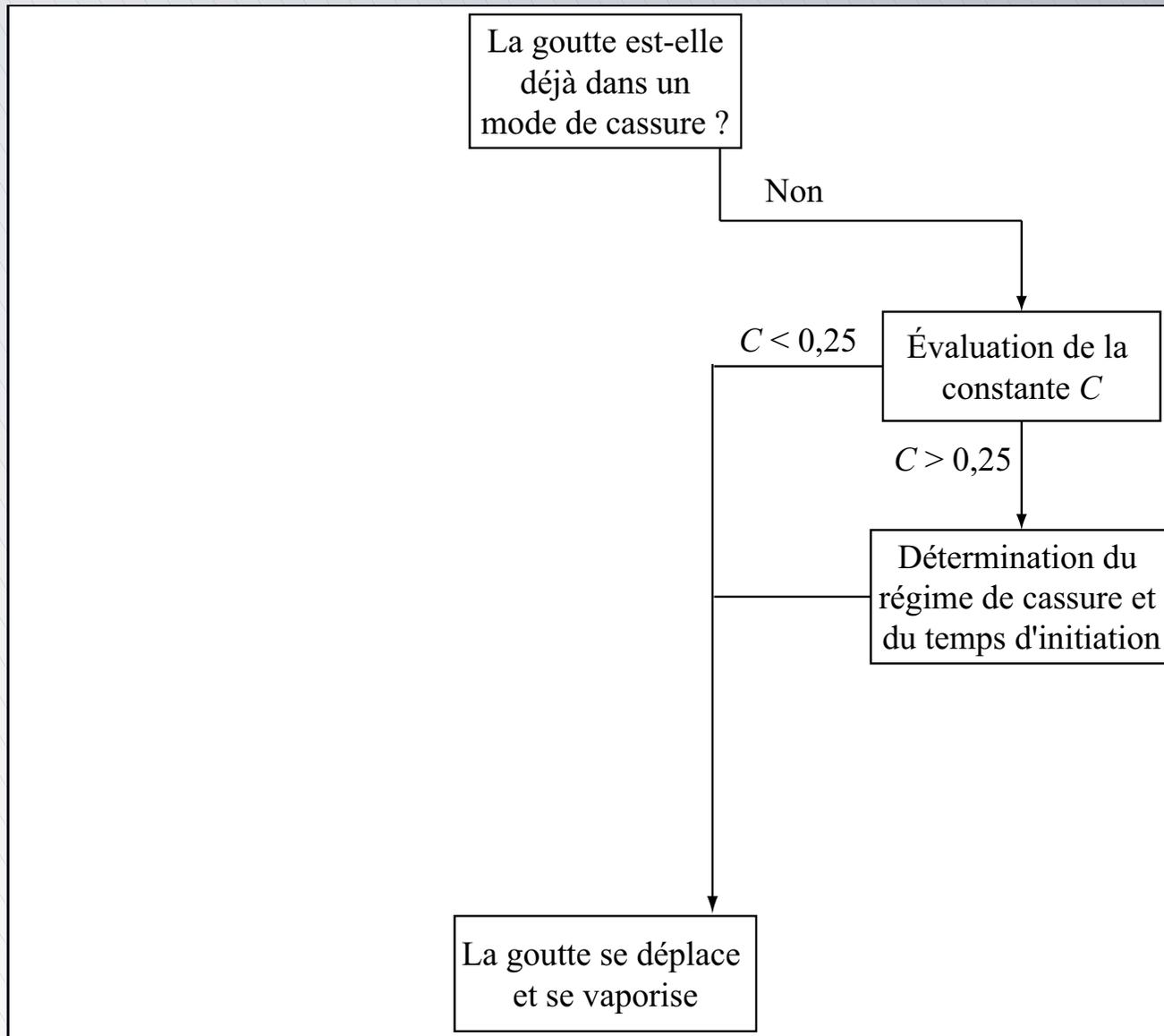
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



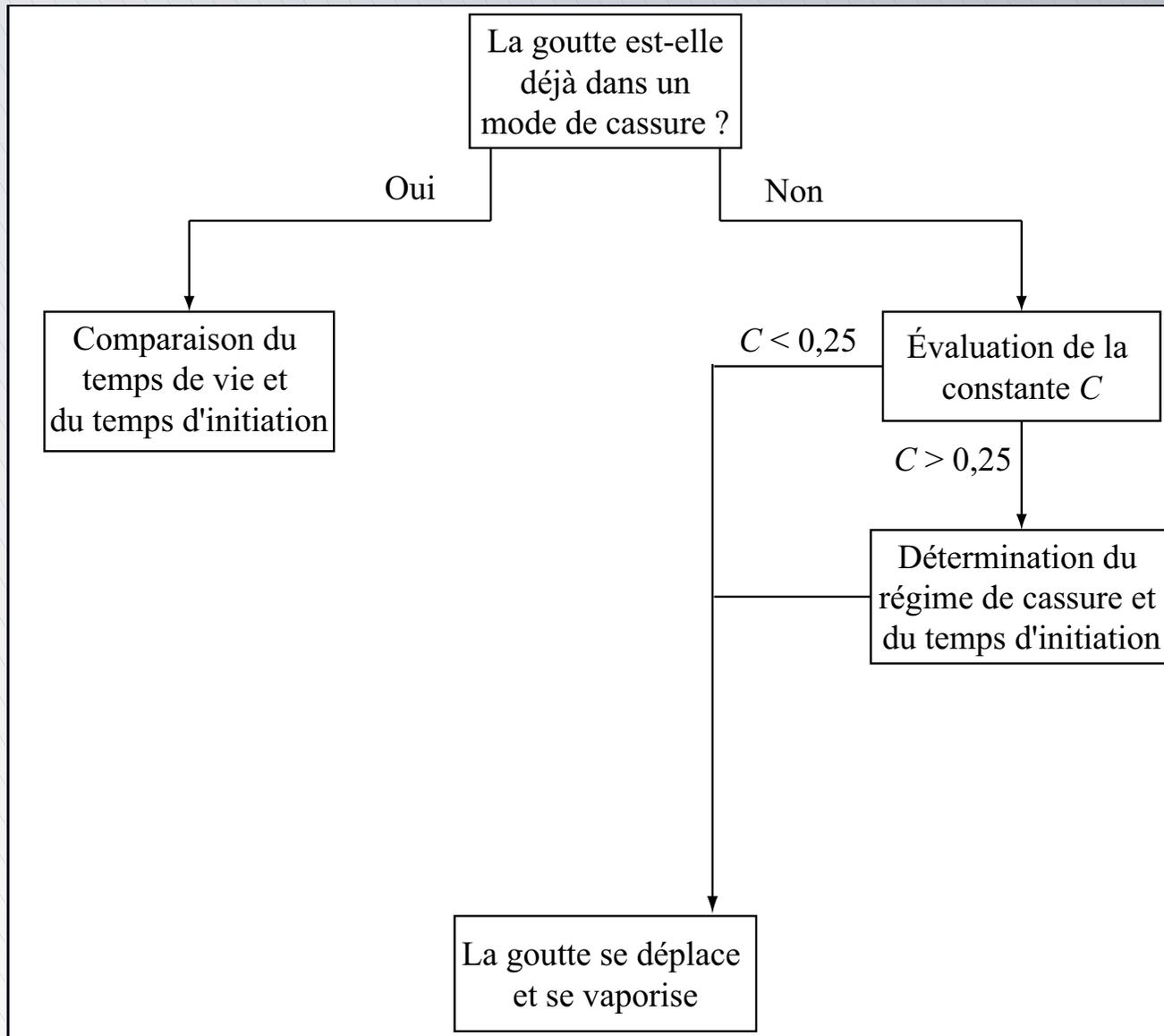
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



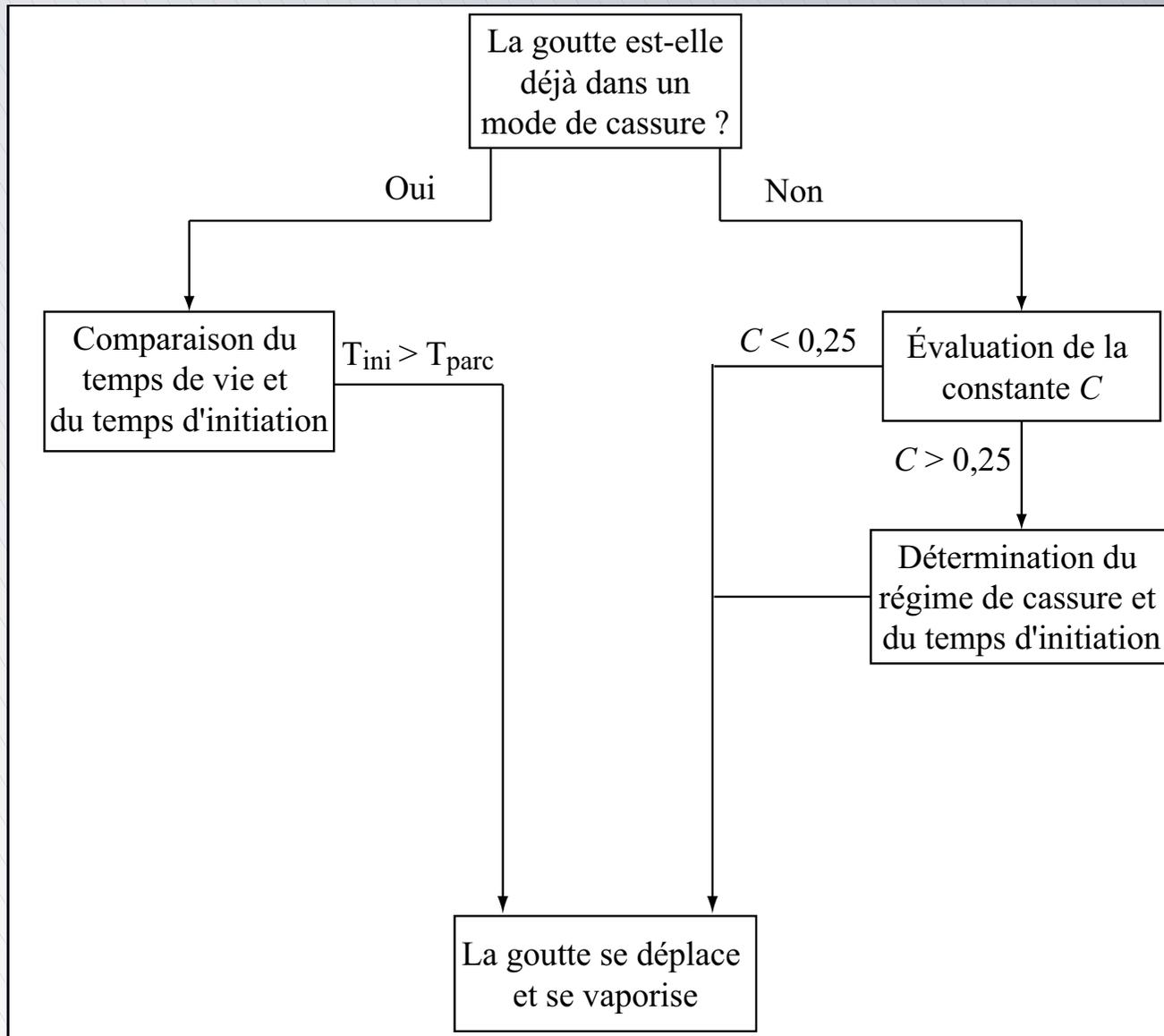
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



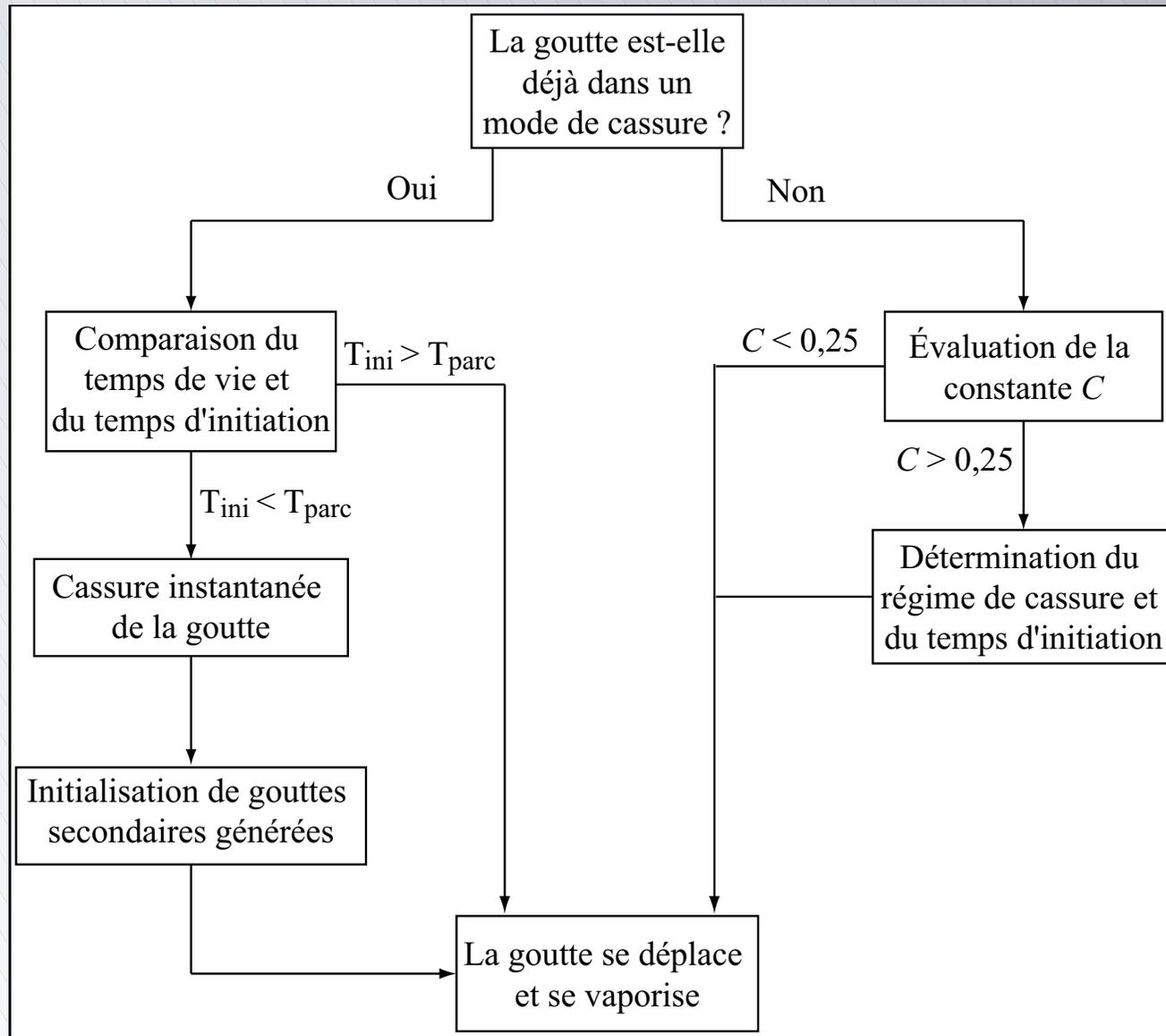
Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



Modélisation de l'atomisation secondaire

Organigramme du modèle d'atomisation secondaire



Le code de calcul THÉSÉE

Présentation du code THÉSÉE (code SNECMA)

- ❑ Code basé sur la méthode des volumes finis
- ❑ Méthodes temporelles d'ordre 2
- ❑ Méthodes spatiales d'ordre 2 avec différents limiteurs
- ❑ Aérodynamique figée ou calculée, compressible ou incompressible
- ❑ Calculs mono ou multi-espèces
- ❑ Thermodynamique constante ou variable
- ❑ Loi des gaz parfaits ou réels
- ❑ Combustion : EBU, Arrhenius, PEUL, utilisateur...
- ❑ Domaines de calcul 3D non structurés
- ❑ Turbulence : modèle $k-\varepsilon$ de Jones-Launder, Smagorinsky...

Le code de calcul THÉSÉE

Présentation du code THÉSÉE (code SNECMA)

Phase dispersée

- ❑ Calculs multiphasiques avec une approche Eulérienne ou Lagrangienne
- ❑ Introduction surfacique ou ponctuelle des particules (routine utilisateur dédiée)
- ❑ Particules à thermodynamique constante ou variable, inertes ou évaporantes (modèle de Sirignano avec ou sans arrachement de micro-gouttelettes ; modèle de goutte sphérique en régime saturé ou non...)
- ❑ Dispersion turbulente des particules
- ❑ Couplage avec la phase gazeuse
- ❑ ...

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

- Modèle de cassure intégré dans THÉSÉE par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

- ❑ Modèle de cassure intégré dans THÉSÉE par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)
- ❑ Modèle de cassure : génération de nouvelles trajectoires « numériques » en cours de calcul

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

- ❑ Modèle de cassure intégré dans THÉSÉE par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)
- ❑ Modèle de cassure : génération de nouvelles trajectoires « numériques » en cours de calcul
- ❑ Nombre de trajectoires « numériques » limité

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

- ❑ Modèle de cassure intégré dans THÉSÉE par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)
- ❑ Modèle de cassure : génération de nouvelles trajectoires « numériques » en cours de calcul
- ❑ Nombre de trajectoires « numériques » limité
- ❑ Disparition de gouttes par vaporisation et sortie du domaine : trajectoires « numériques » laissées vacantes

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

■ Modèle de cassure intégré dans THÉSÉE par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)

■ Modèle de cassure : génération de nouvelles trajectoires « numériques » en cours de calcul

■ Nombre de trajectoires « numériques » limité

■ Disparition de gouttes par vaporisation et sortie du domaine : trajectoires « numériques » laissées vacantes

Optimisation du calcul par ré-utilisation des trajectoires « numériques » laissées vacantes

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

Début de l'étape Lagrangienne

Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

Début de l'étape Lagrangienne

Ré-actualisation des propriétés des gouttes (tension superficielle, viscosité, densité...)

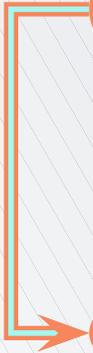
Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

Début de l'étape Lagrangienne

Ré-actualisation des propriétés des gouttes (tension superficielle, viscosité, densité...)

Activation du modèle de cassure
Gestion des trajectoires



Le code de calcul THÉSÉE

Intégration du modèle de cassure dans THÉSÉE

Début de l'étape Lagrangienne

Ré-actualisation des propriétés des gouttes (tension superficielle, viscosité, densité...)

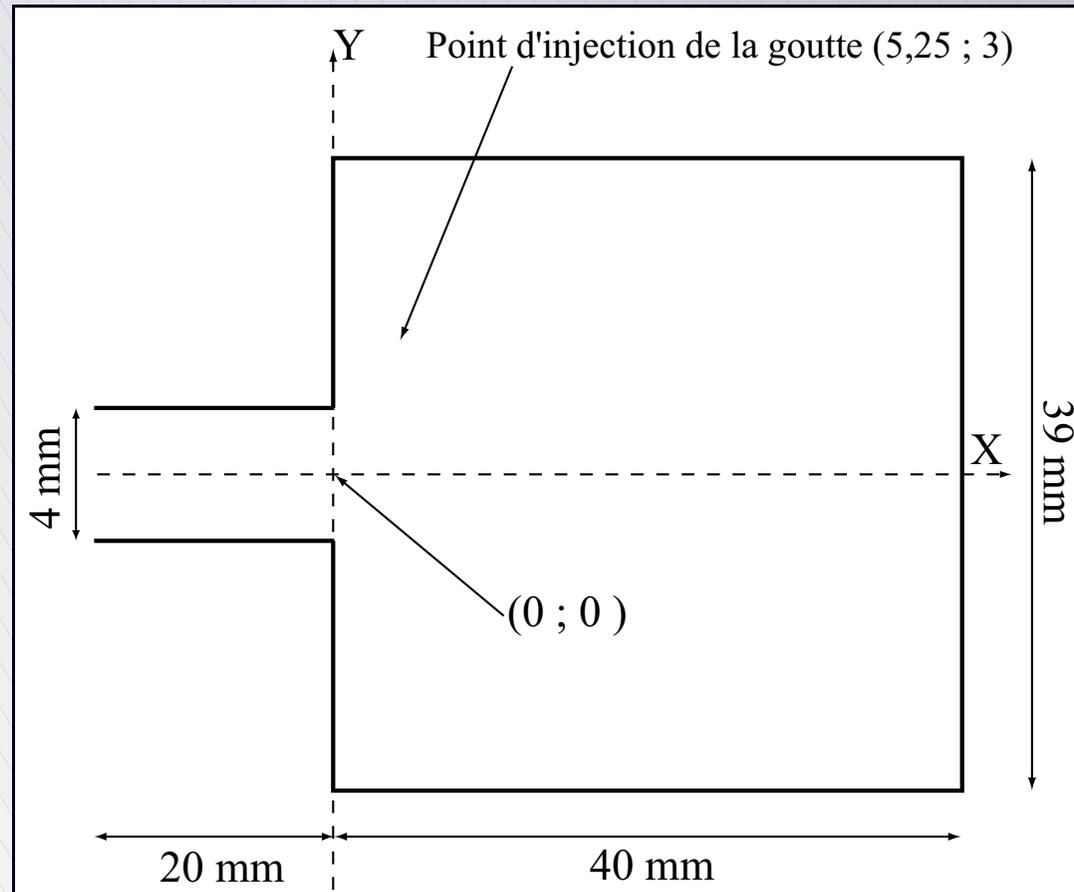
Activation du modèle de cassure
Gestion des trajectoires

Suite de l'étape Lagrangienne
(vaporisation, déplacement, dispersion turbulente...)

Validation du modèle

Domaine de calcul

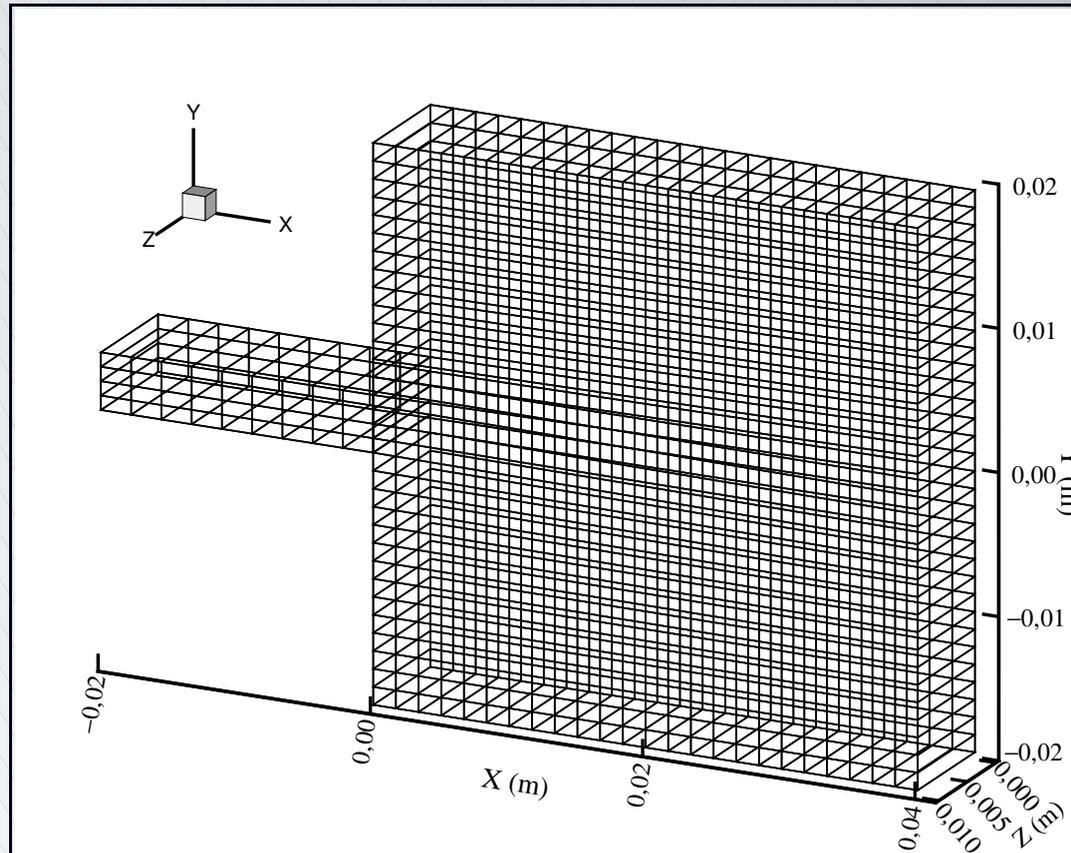
- Reprise de l'expérience de Vieille (1998)



Validation du modèle

Domaine de calcul

- Reprise de l'expérience de Vieille (1998)



⇒ 1 740 nœuds et 804 éléments hexaédriques

Validation du modèle

Conditions de simulation

Validation du modèle

Conditions de simulation

- Goutte isolée d'oxygène liquide (LOX ou LO_2)

Validation du modèle

Conditions de simulation

- ❑ Goutte isolée d'oxygène liquide (LOX ou LO_2)
- ❑ Écoulement d'hélium à grande vitesse et sous haute pression
- ❑ Simulations : l'hydrogène (GH_2) remplace l'hélium

Validation du modèle

Conditions de simulation

- ❑ Goutte isolée d'oxygène liquide (LOX ou LO₂)
- ❑ Écoulement d'hélium à grande vitesse et sous haute pression
- ❑ Simulations : l'hydrogène (GH₂) remplace l'hélium
- ❑ Conditions d'injection

	<i>Hydrogène (GH₂)</i>	<i>Oxygène (LOX)</i>
<i>Température (K)</i>	300	80
<i>Densité (kg·m⁻³)</i>	5,33	1 192,4
<i>Viscosité (kg·m⁻¹·s⁻¹)</i>	$7,961 \times 10^{-6}$	$2,15 \times 10^{-5}$
<i>Vitesse (m·s⁻¹)</i>	11	0,5 ; 1,0 ; 1,5
<i>Pression (MPa)</i>	6,6	–
<i>Tension de surface (N·m⁻¹)</i>	–	$14,78 \times 10^{-2}$

Validation du modèle

Introduction de la goutte d'oxygène

- ❑ Diamètre initial de la goutte : $D_{ini} = 0,47 \times 10^{-3}$ m
- ❑ Injection de la goutte avec une vitesse perpendiculaire à la direction de l'écoulement
- ❑ Trois simulations en ne faisant varier que la vitesse initiale d'injection de la goutte dans le domaine de calcul, permettant d'encadrer les vitesses observées par Vieille (1998) et comprises entre 0,8 et 1,2 m·s⁻¹
 - ▶ $V_{g01} = 0,5$ m·s⁻¹
 - ▶ $V_{g02} = 1,0$ m·s⁻¹
 - ▶ $V_{g03} = 1,5$ m·s⁻¹
- ❑ Simulations réalisées sur 40 000 itérations, représentant un temps physique de l'ordre de 18,2 ms

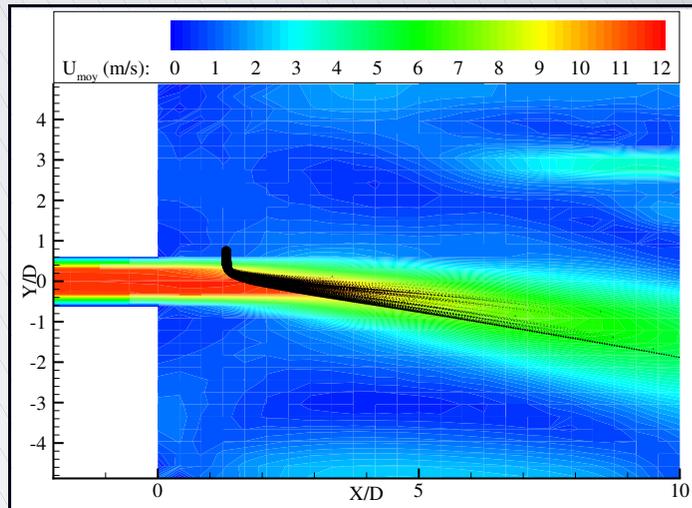
Validation du modèle

Modèles utilisés

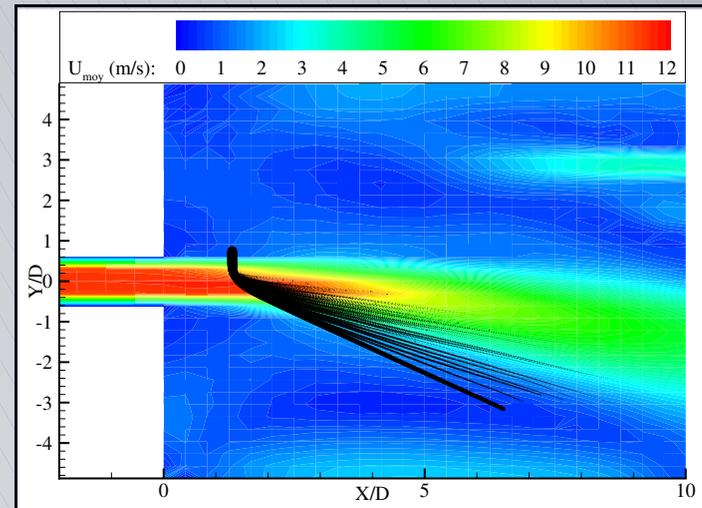
- ❑ Propriétés thermodynamiques variables pour les phases gazeuse et liquide
 - ▶ Loi des gaz réels pour la phase gazeuse
 - ▶ Polynômes de degré 3 en température pour les C_p
 - ▶ Viscosités, densités fonctions de P et T
 - ▶ Tension superficielle fonction de la température de surface de la goutte T_s
 - ▶ Conductivité thermique de l'hydrogène fonction de la température
- ❑ Modèle de turbulence $k-\varepsilon$
- ❑ Dispersion turbulente des particules
- ❑ Vaporisation du liquide selon la loi en D^2 classique

Validation du modèle

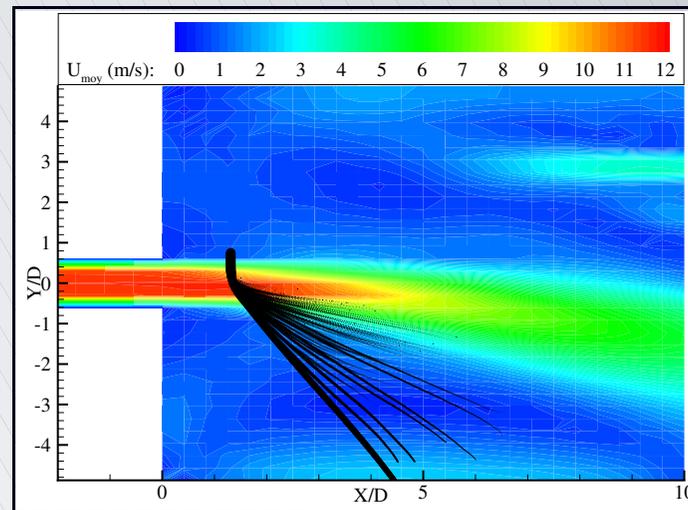
Résultats des calculs (visualisation du processus de cassure)



$$V_{g01} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



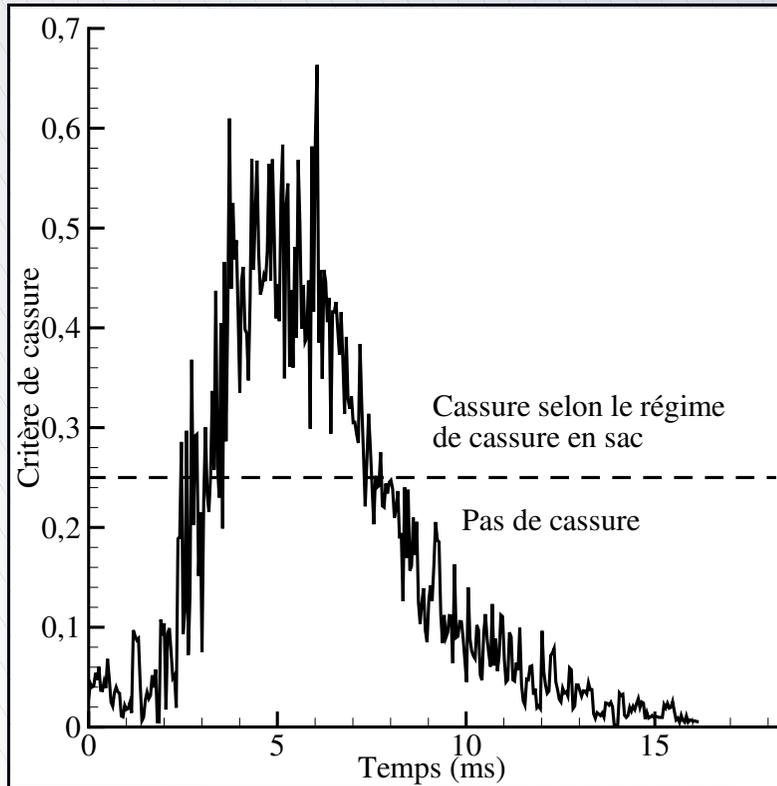
$$V_{g02} = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



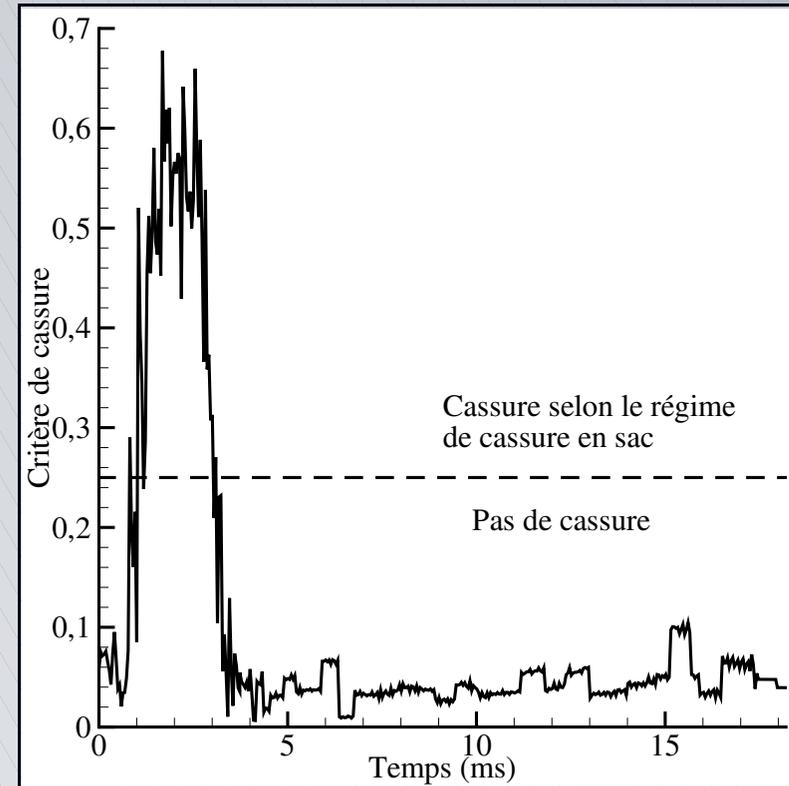
$$V_{g03} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Validation du modèle

Résultats des calculs (critère de cassure C)



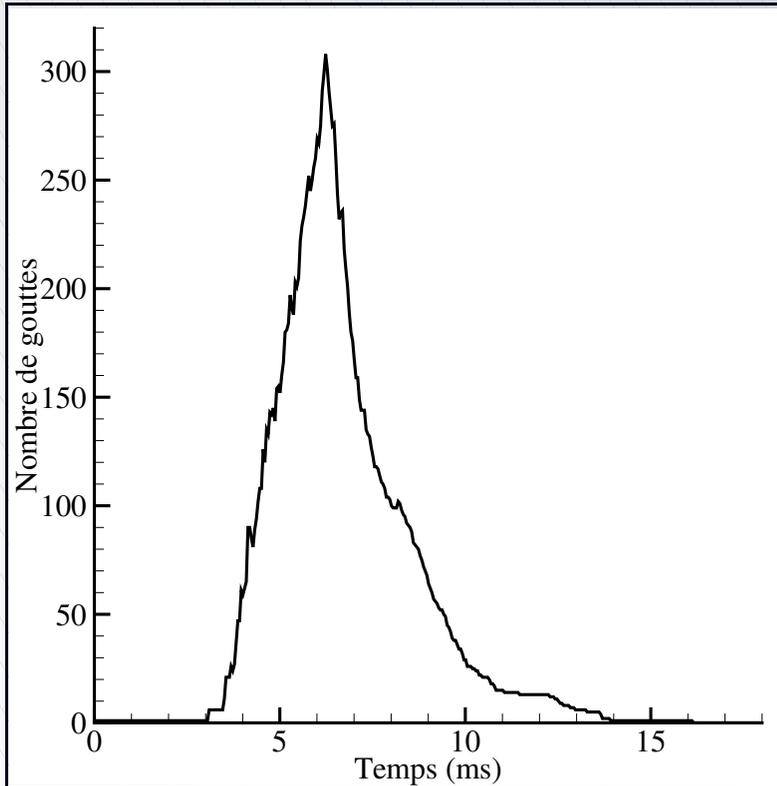
$$V_{g01} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



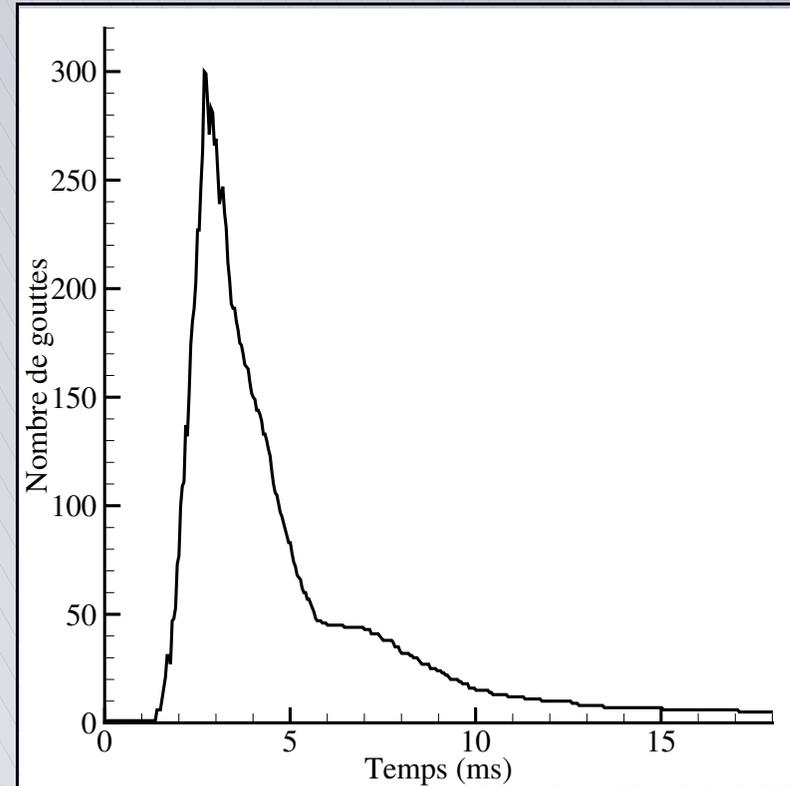
$$V_{g03} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Validation du modèle

Résultats des calculs (nombre de gouttes)



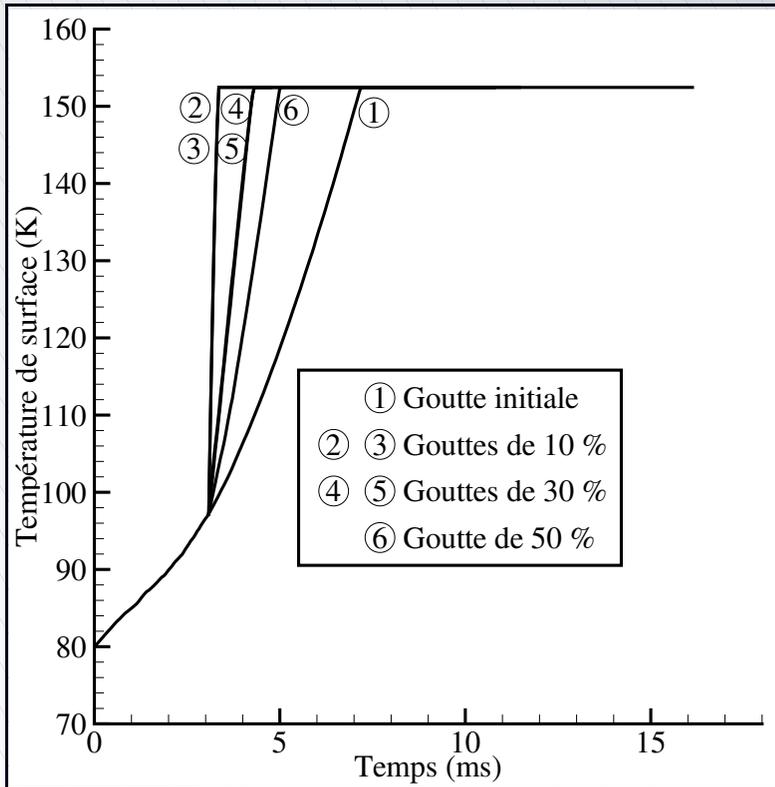
$$V_{g01} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



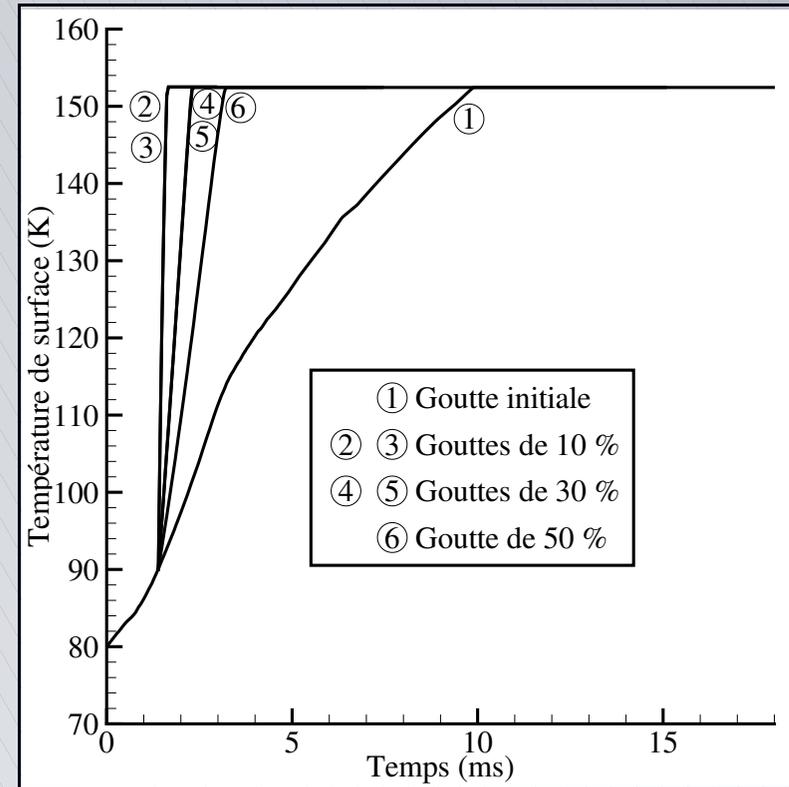
$$V_{g03} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Validation du modèle

Résultats des calculs (température)



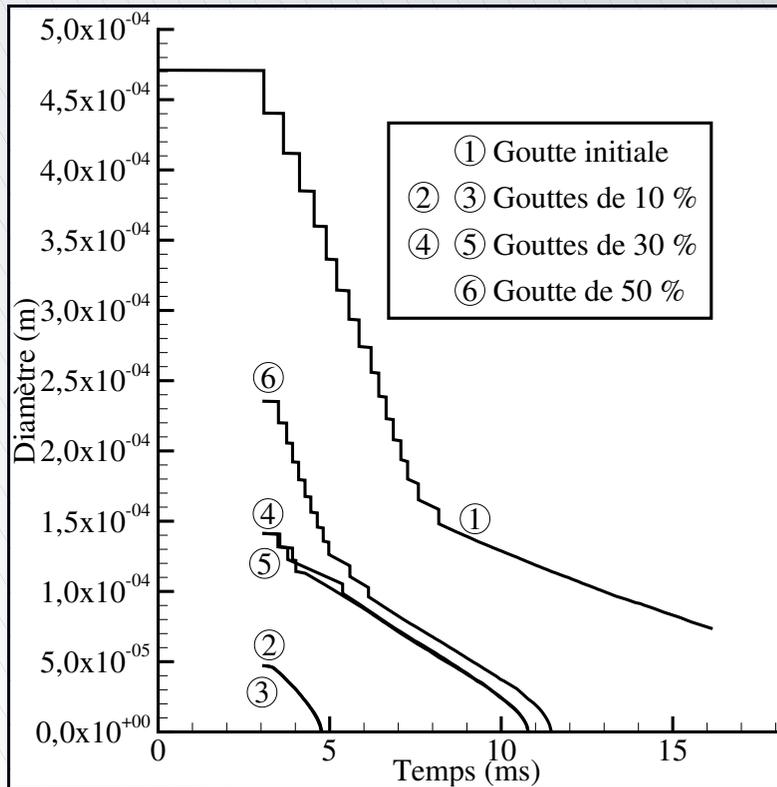
$$V_{g01} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



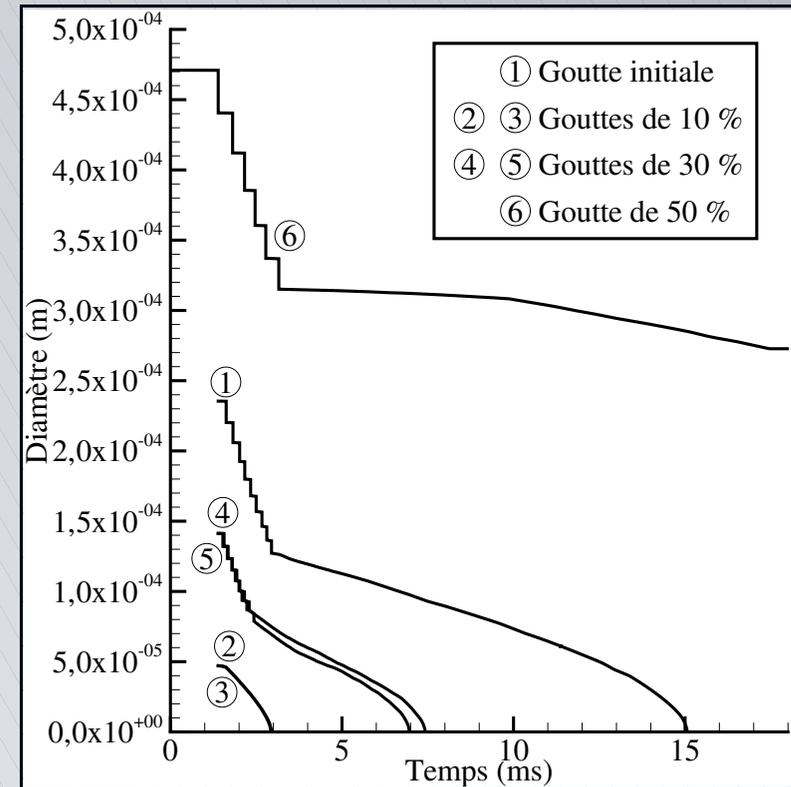
$$V_{g03} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Validation du modèle

Résultats des calculs (diamètres)



$$V_{g01} = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$



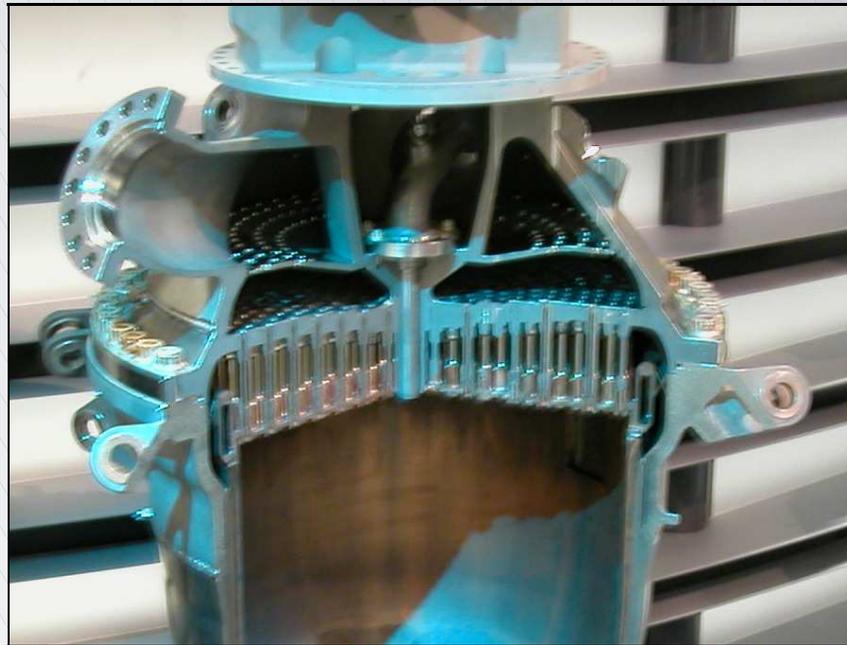
$$V_{g03} = 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Domaine de calcul

MASCOTTE : **M**ontage **A**utonome **S**implifié pour la **C**ryocombustion dans l'**O**xygène et **T**outes **T**echniques **E**xpérimentales

- Permet de reproduire l'un des injecteur du moteur VULCAIN du lanceur ARIANE V

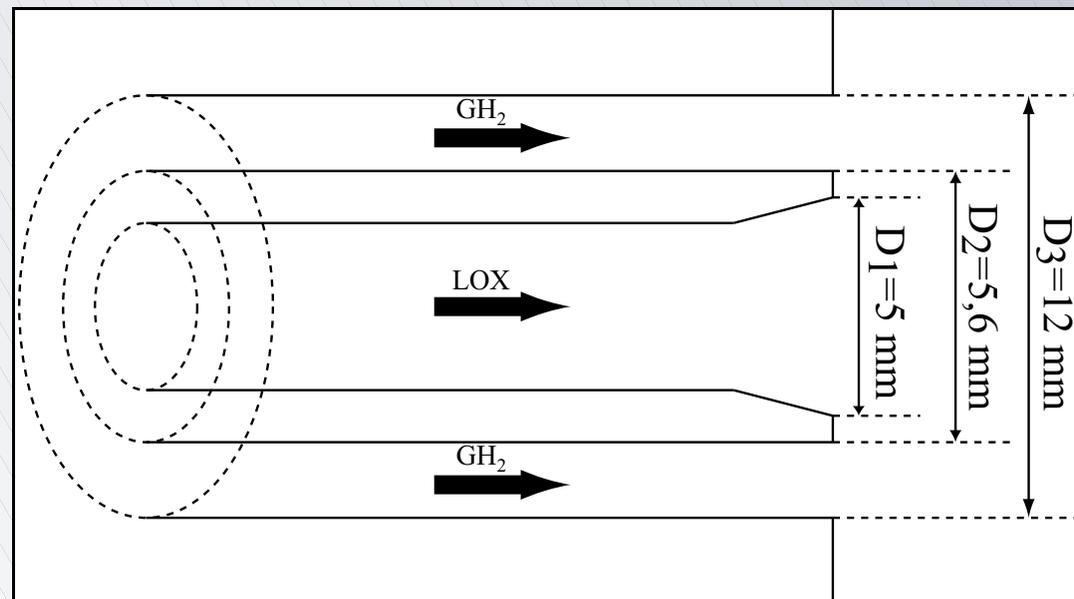


Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Domaine de calcul

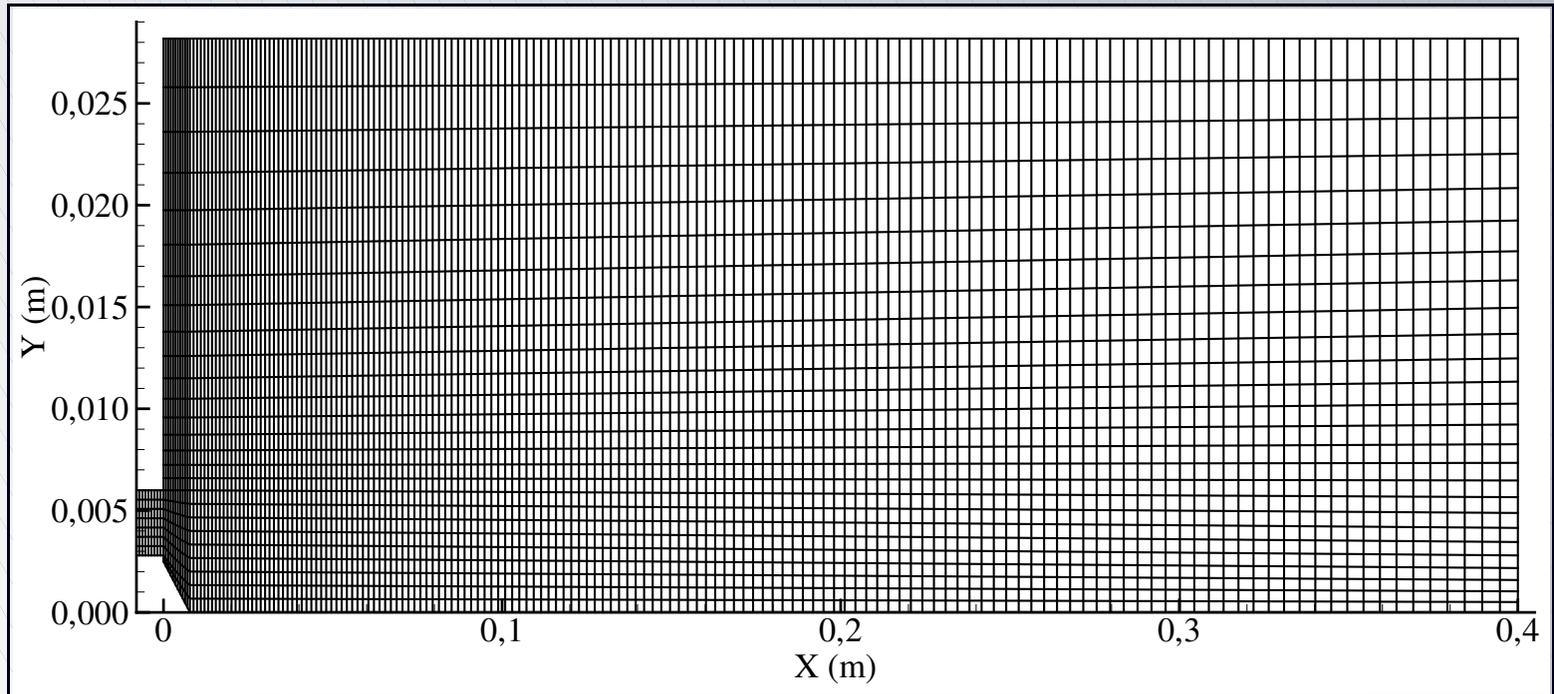
MASCOTTE : **M**ontage **A**utonome **S**implifié pour la **C**ryocombustion dans l'**O**xygène et **T**outes **T**echniques **E**xpérimentales

- ❑ Permet de reproduire l'un des injecteur du moteur VULCAIN du lanceur ARIANE V
- ❑ Injecteur coaxial isolé



Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Domaine de calcul

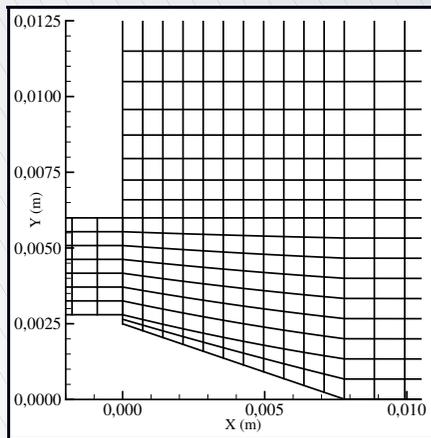


- ⇒ 8 838 nœuds et 4 223 éléments hexaédriques
- ⇒ Domaine 2D axisymétrique, de 5 degrés d'ouverture

Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Injection des gouttes d'oxygène liquide (LOX)

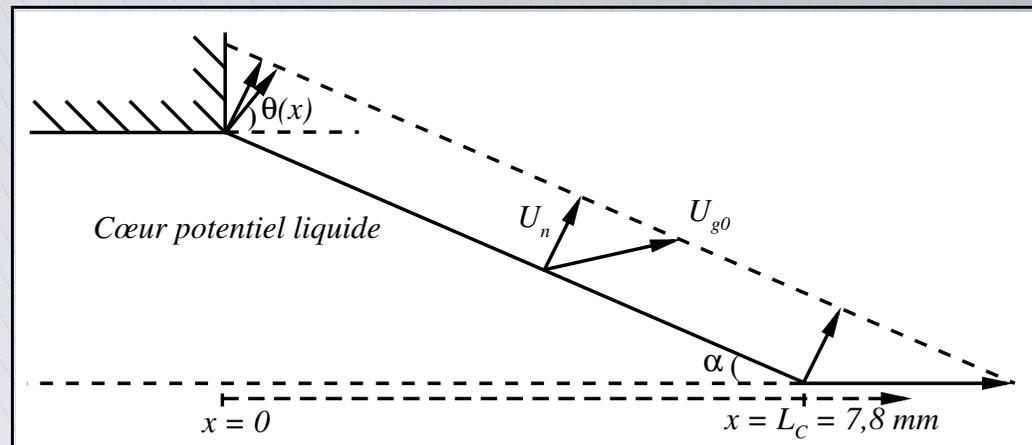
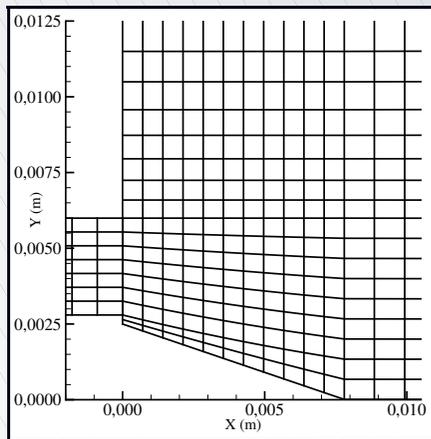
- Injection le long d'un cœur potentiel liquide de longueur $L_C = \frac{6 D_1}{\sqrt{J}} = 7,8 \text{ cm}$ (Villermaux, 1998)



Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Injection des gouttes d'oxygène liquide (LOX)

- Injection le long d'un cœur potentiel liquide de longueur $L_C = \frac{6 D_1}{\sqrt{J}} = 7,8 \text{ cm}$ (Villermoux, 1998)



$$\theta(x) = \arctan \left[\frac{\frac{D_1}{2} \left(1 - \frac{x}{L_C}\right)}{x + \frac{D_1}{2 \tan \theta_i}} \right], \quad \tan \theta_i = 0,68 \left(\frac{U_g}{U_l} - 1 \right) \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}}$$

$$U_{g0}(\theta) = \frac{U_n}{\cos \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - \theta \right)}, \quad \alpha = 17,7^\circ, \quad U_n = 0,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Injection des gouttes d'oxygène liquide (LOX)

❑ Injection le long d'un cœur potentiel liquide de longueur $L_C = \frac{6 D_1}{\sqrt{J}} = 7,8 \text{ cm}$ (Villermaux, 1998)

❑ Distribution initiale de Rosin-Rammler

$$1 - \nu_c(D) = \exp \left[- \left(\frac{D}{D_{RR}} \right)^N \right], \text{ avec } D_{RR} = 130 \times 10^{-6} \text{ m et}$$

$$N = 2,25$$

Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Conditions de simulation

- Conditions du 2nd *International Workshop on Rocket Combustion Modeling* (Haidn, 2001), reproduisant un point de fonctionnement du dispositif MASCOTTE ($J = 14,5$; $M = 2,1$)

	Hydrogène (GH ₂)	Oxygène (LOX)
Pression (MPa)	1,0	1,0
Débit (g·s ⁻¹)	23,7	50,0
Température (K)	287	85
Densité (kg·m ⁻³)	0,84	1 170
Capacité calorifique (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	14 300	1 690
Vitesse (m·s ⁻¹)	319	2,18
Viscosité (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	$8,6 \times 10^{-6}$	$1,94 \times 10^{-4}$
Tension superficielle (N·m ⁻¹)	–	$1,44 \times 10^{-2}$

Simulations du banc d'essai MASCOTTE

Modèles utilisés

- Propriétés thermodynamiques variables pour les phases gazeuse et liquide
 - ▶ Loi des gaz réels pour la phase gazeuse
 - ▶ Polynômes de degré 3 en température pour les C_p
 - ▶ Viscosités, densités fonctions de P et T
 - ▶ Tension superficielle fonction de la température de surface T_S de la goutte
 - ▶ Conductivité thermique de l'hydrogène fonction de la température T
- Modèle de turbulence $k-\varepsilon$
- Dispersion turbulente des particules
- Vaporisation du liquide selon une loi en D^2 classique

Simulations en conditions non réactives

Calculs réalisés

- ❑ Effets du modèle de cassure sur les propriétés du brouillard et de l'écoulement
 - ▶ Simulation **avec** atomisation secondaire
 - ▶ Simulation **sans** atomisation secondaire
- ❑ Caractéristiques d'un calcul
 - ▶ 200 000 itérations, avec $\Delta t = 8,8 \times 10^{-8}$ s
 - ▶ Temps physique : 17,6 ms
 - ▶ Sortie des caractéristiques toutes les 500 itérations
 - ▶ \approx 600 heures sur supercalculateur SGI ORIGIN 2000
 - ▶ Génération d'environ 20 Go de données
- ❑ Résultats présentés : moyennes réalisées sur les 100 000 derniers pas de temps (\approx 7 000 000 gouttes)

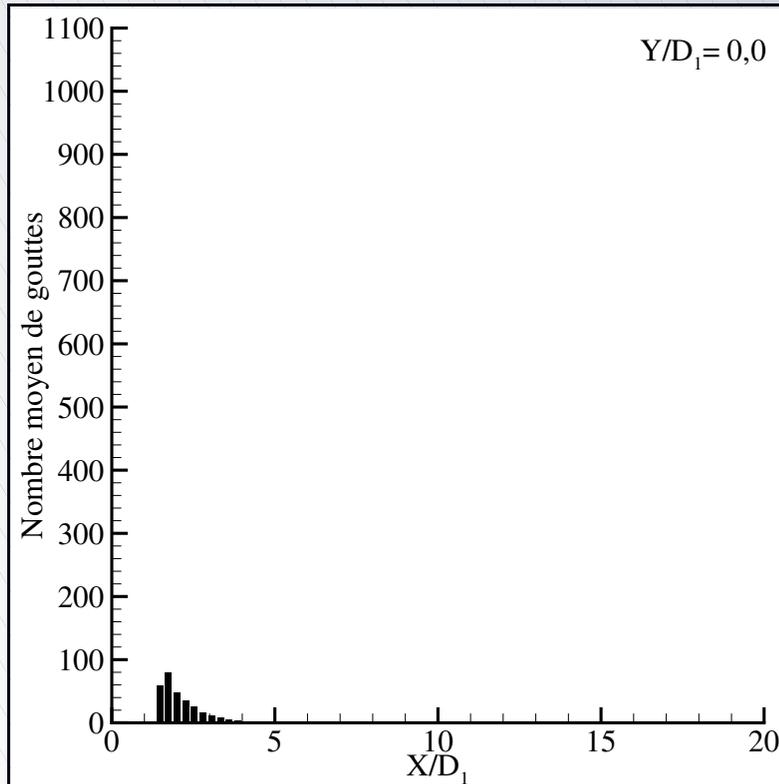
Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Global dans le domaine

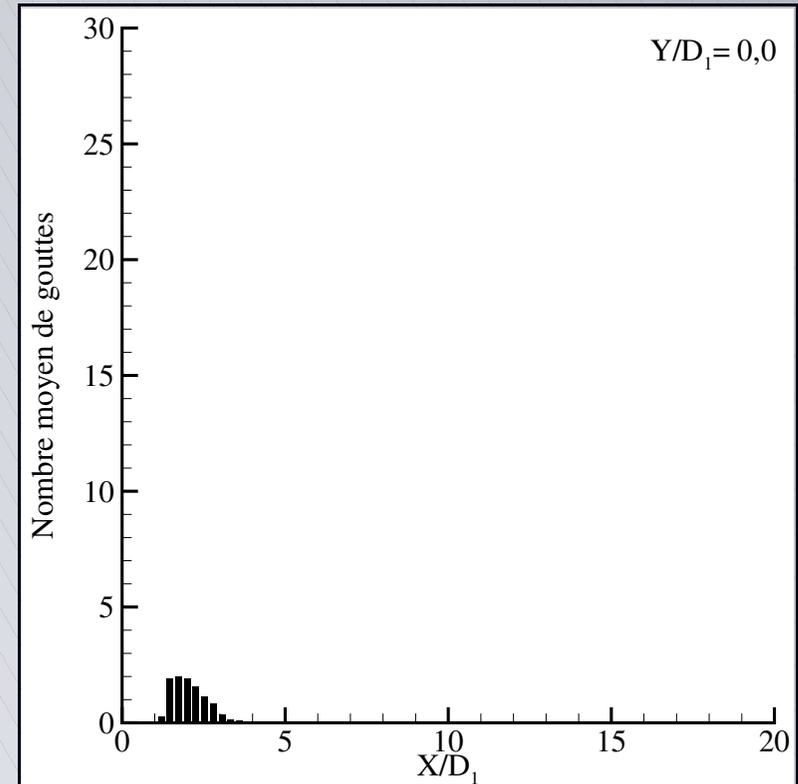
Nombre de gouttes	
Avec atomisation	37 419
Sans atomisation	3 181

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions axiales



Avec atomisation

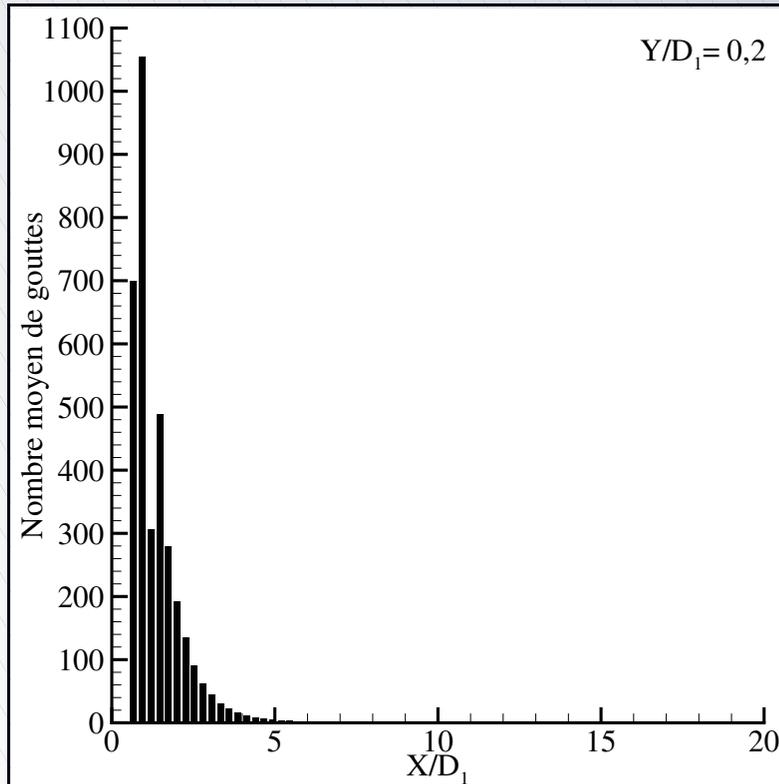


Sans atomisation

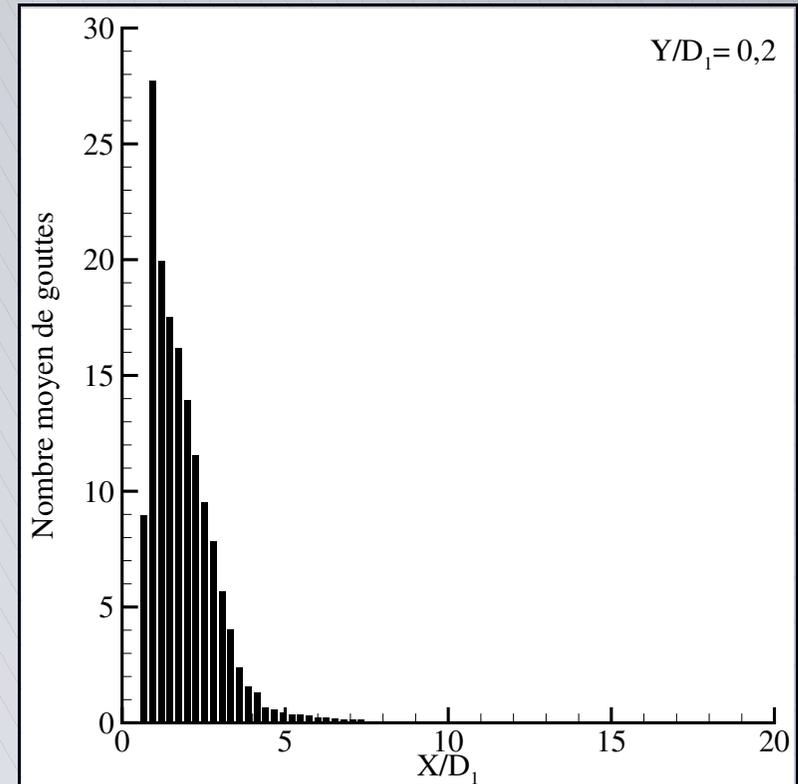
$$Y/D_1 = 0,0$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions axiales



Avec atomisation

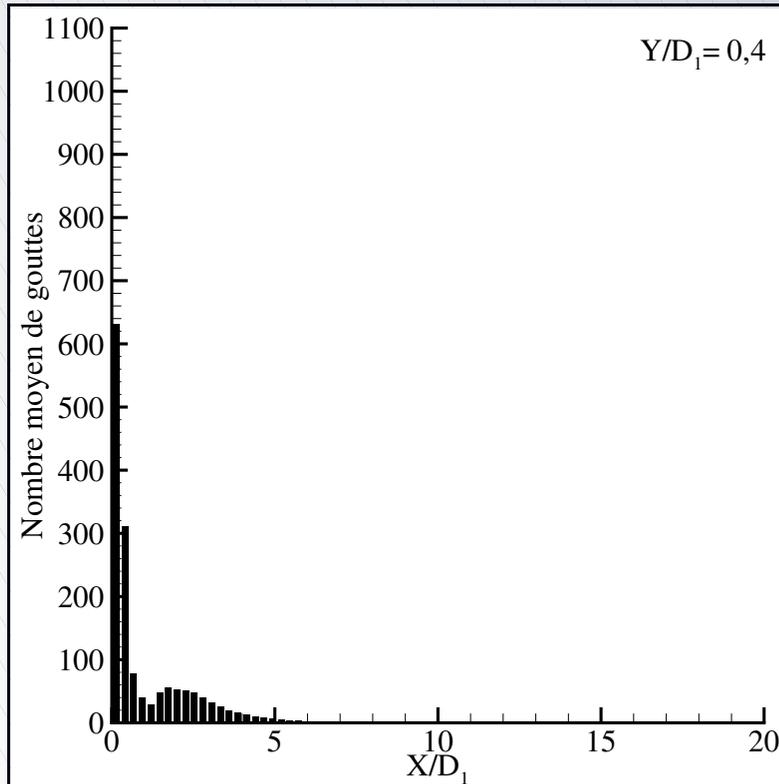


Sans atomisation

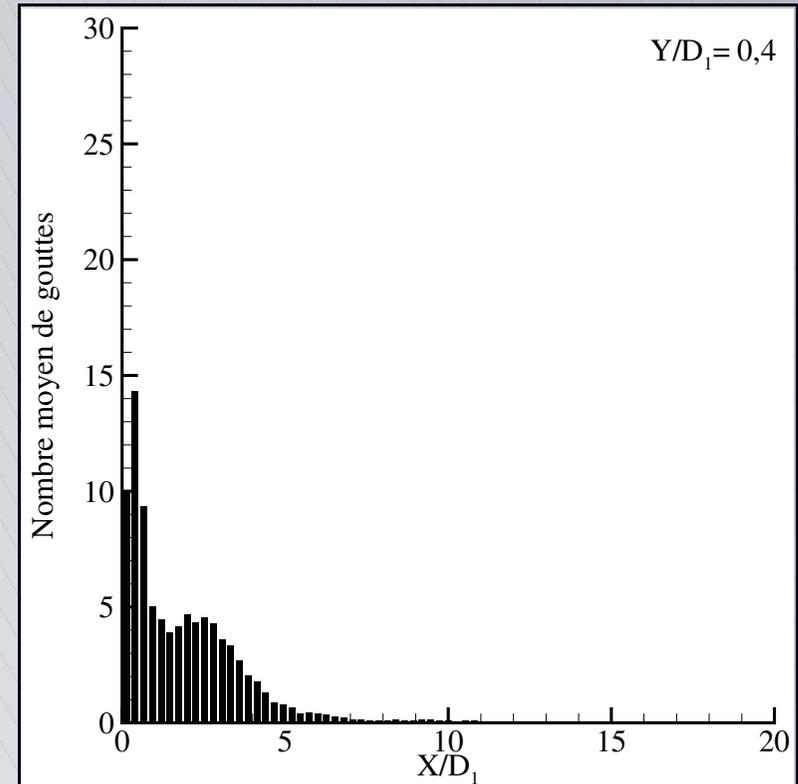
$$Y/D_1 = 0,2$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions axiales



Avec atomisation

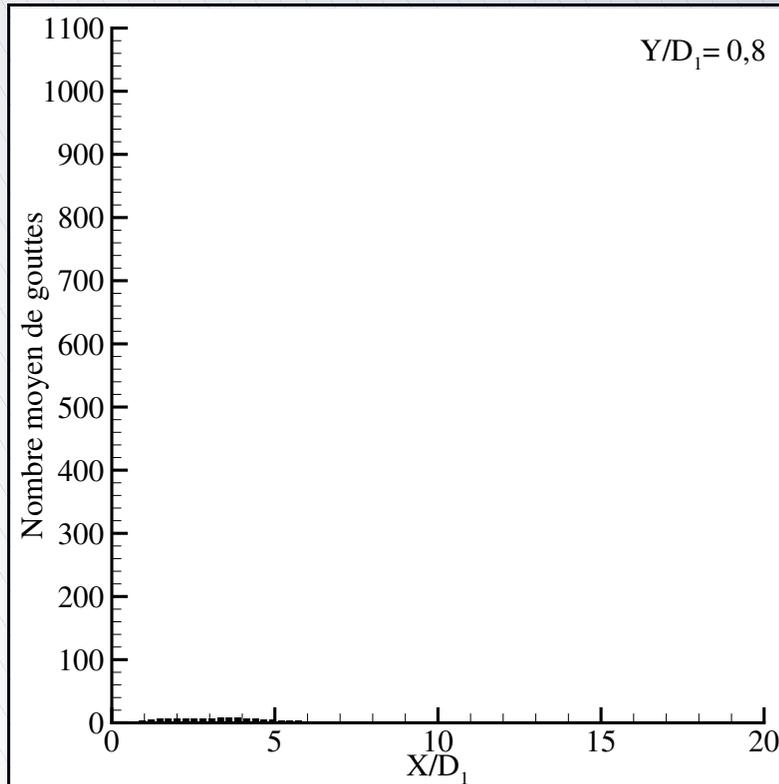


Sans atomisation

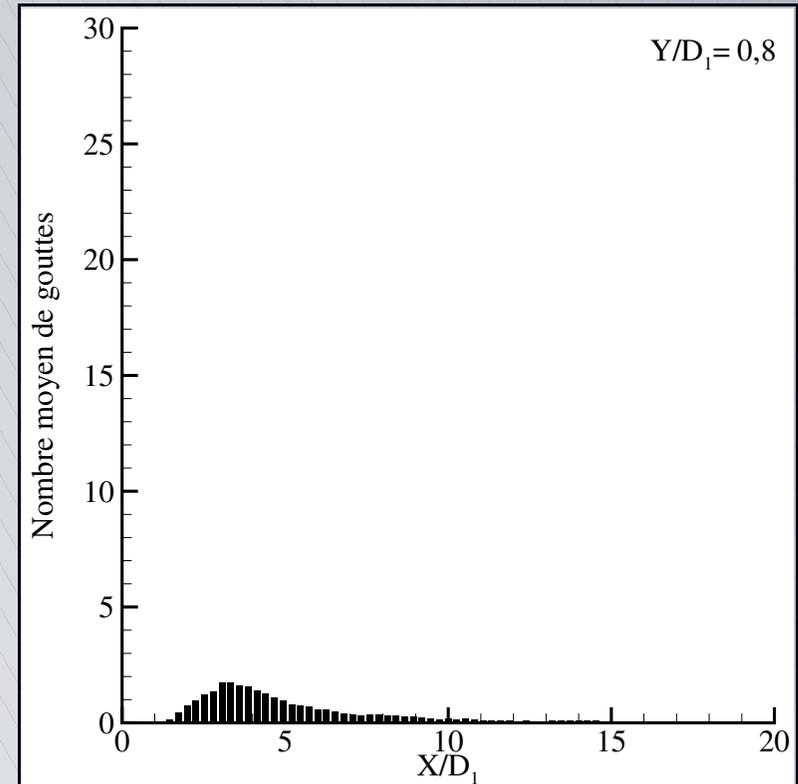
$$Y/D_1 = 0,4$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions axiales



Avec atomisation

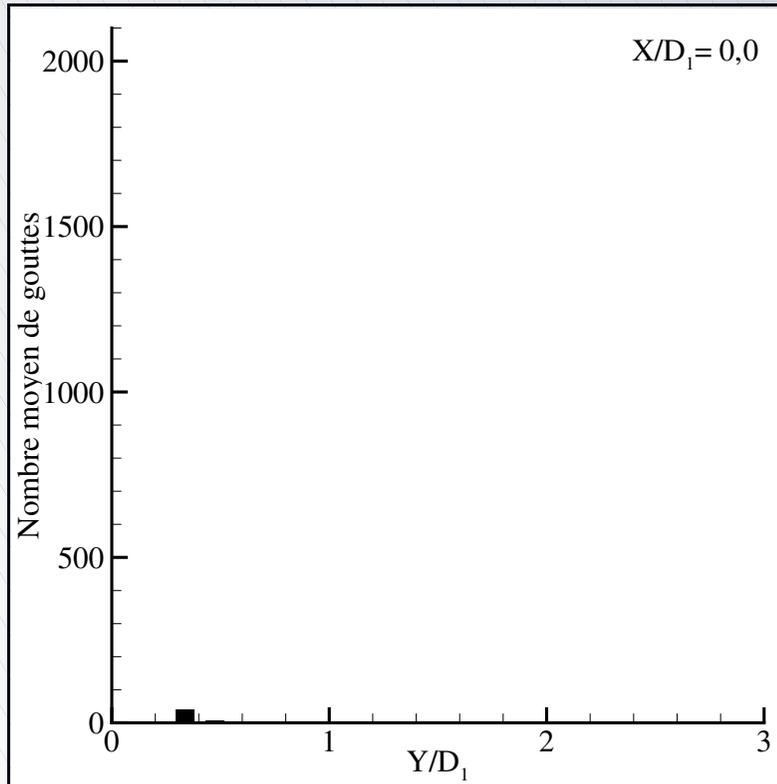


Sans atomisation

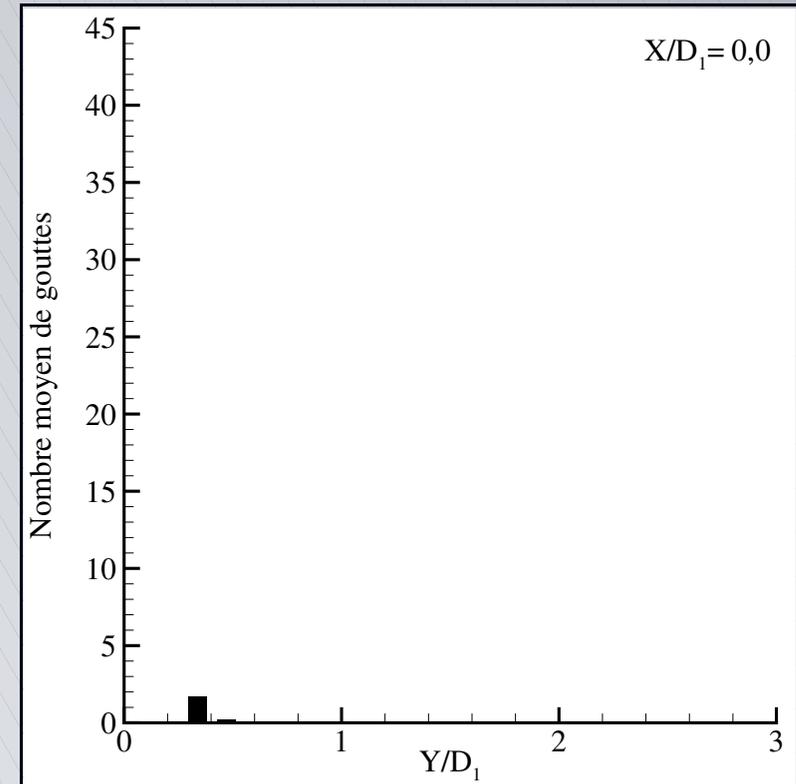
$$Y/D_1 = 0,8$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions radiales



Avec atomisation

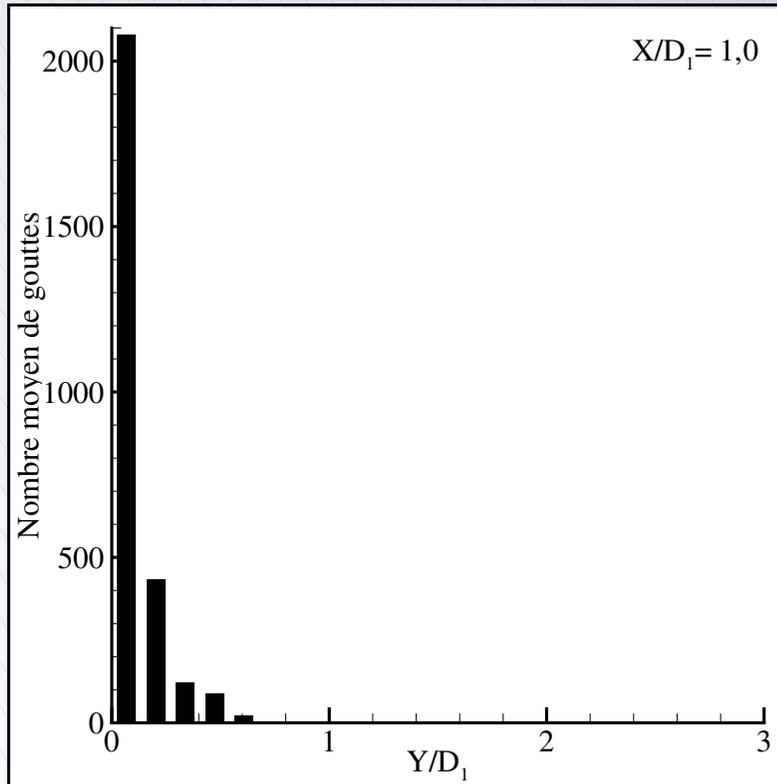


Sans atomisation

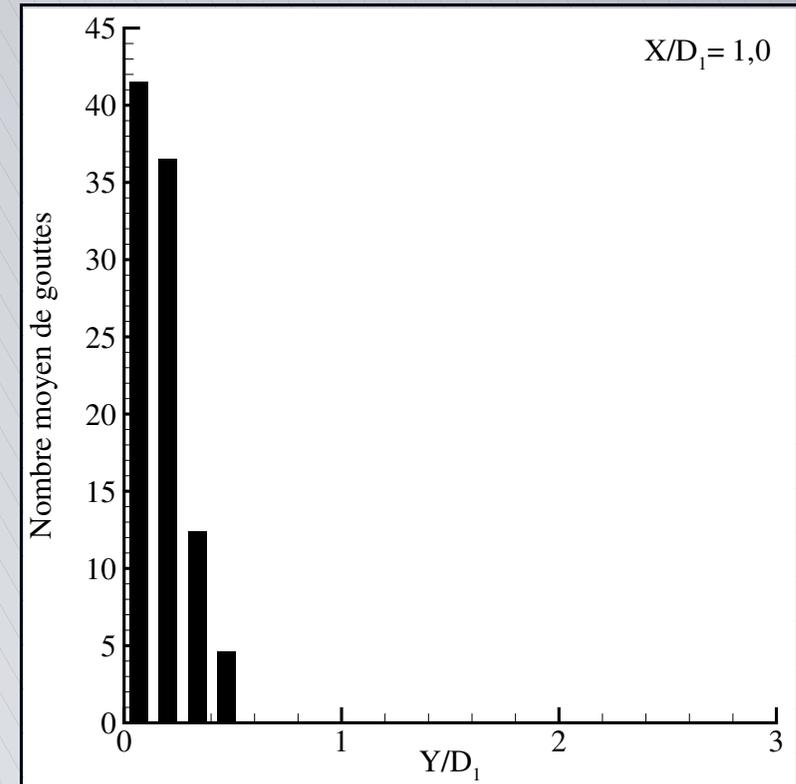
$X/D_1 = 0,0$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions radiales



Avec atomisation

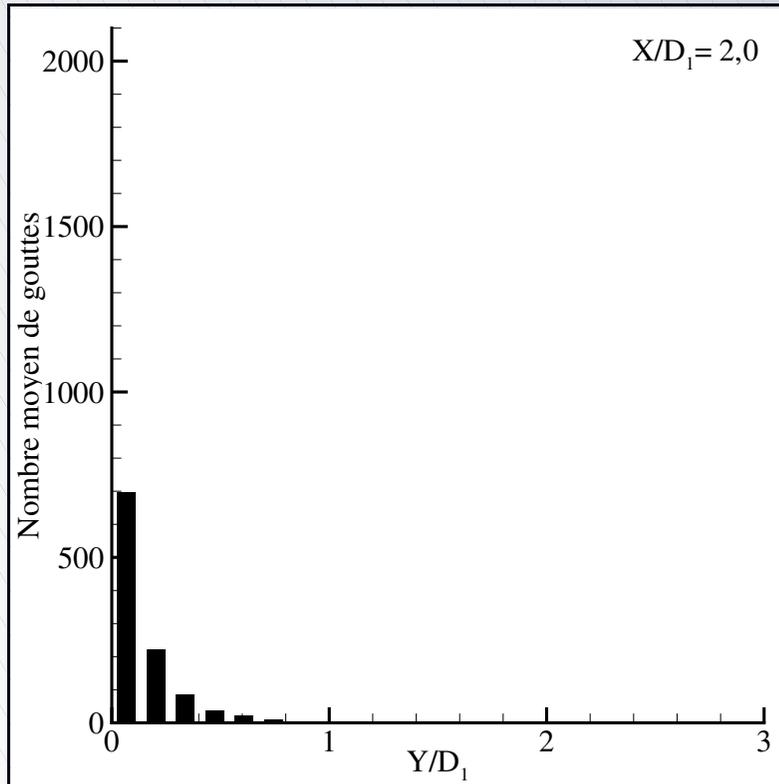


Sans atomisation

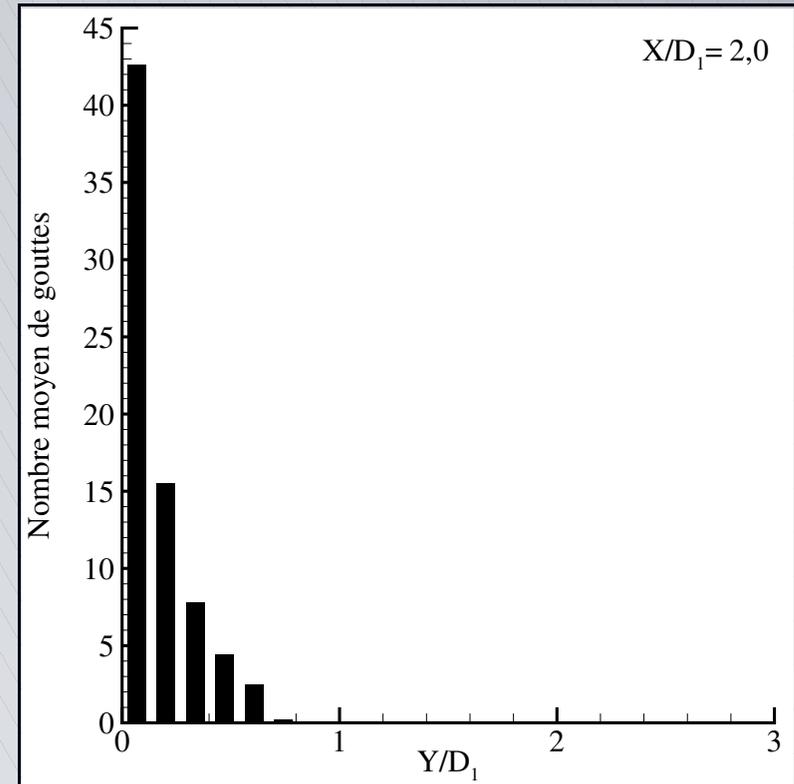
$$X/D_1 = 1,0$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions radiales



Avec atomisation

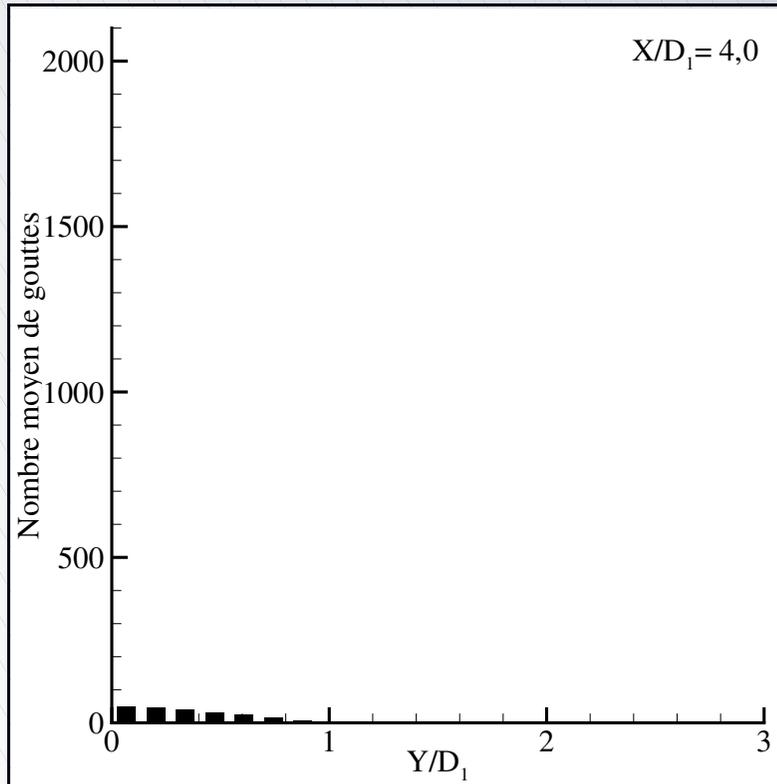


Sans atomisation

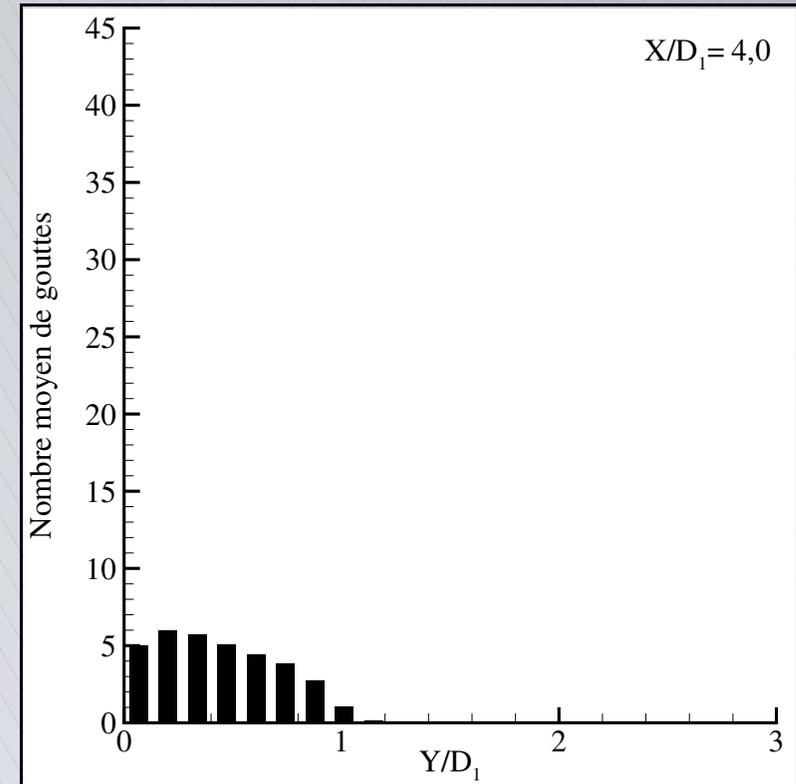
$$X/D_1 = 2,0$$

Simulations en conditions non réactives

Nombre de gouttes Évolutions radiales



Avec atomisation



Sans atomisation

$$X/D_1 = 4,0$$

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen arithmétique D_{10}

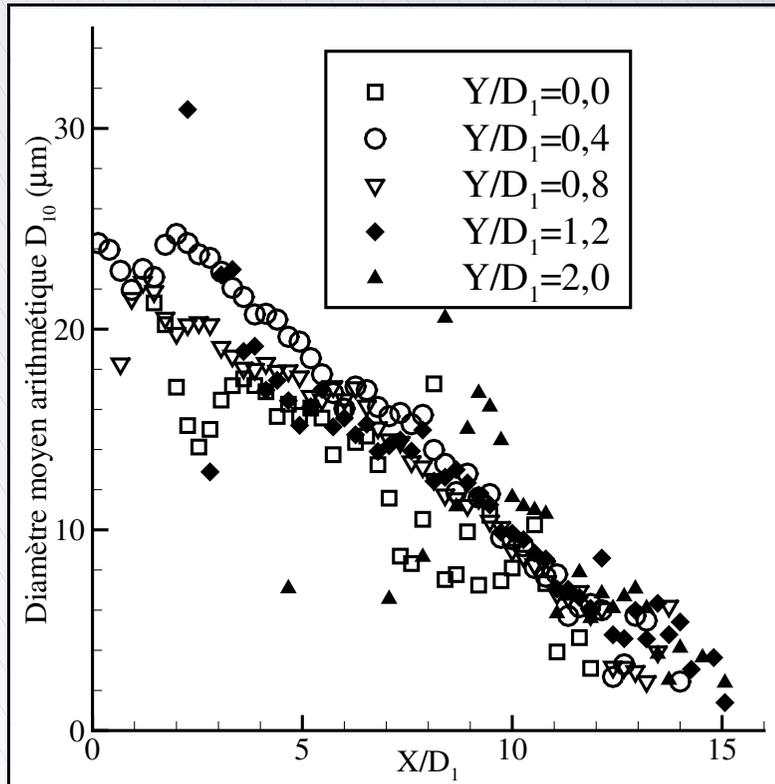
$$D_{10} = \frac{1}{N} \sum D_i$$

Global dans le domaine

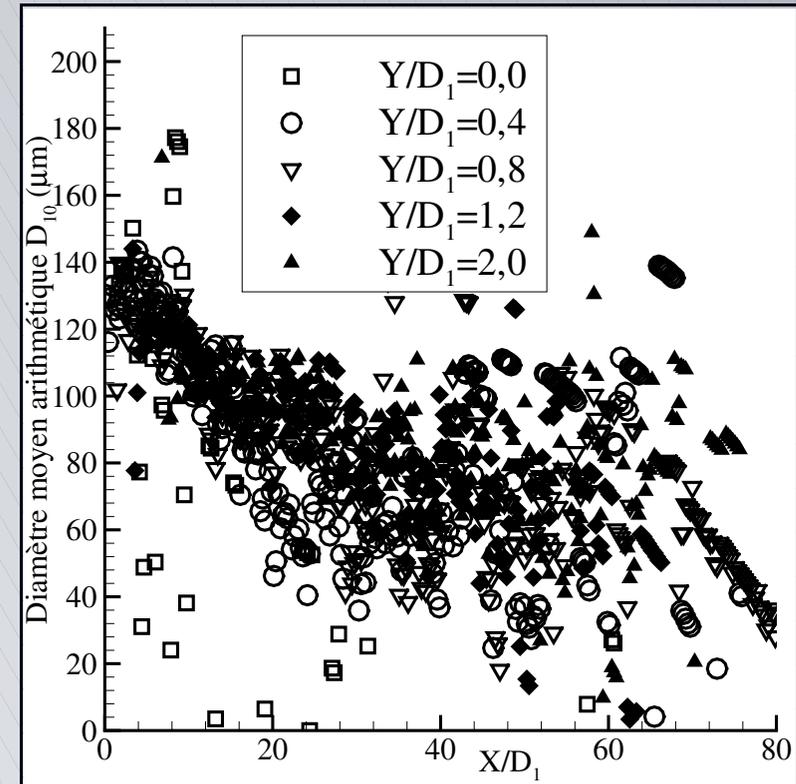
Diamètre moyen arithmétique D_{10} (μm)	
Avec atomisation	23,1
Sans atomisation	116,9

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen arithmétique D_{10} Évolutions axiales



Avec atomisation



Sans atomisation

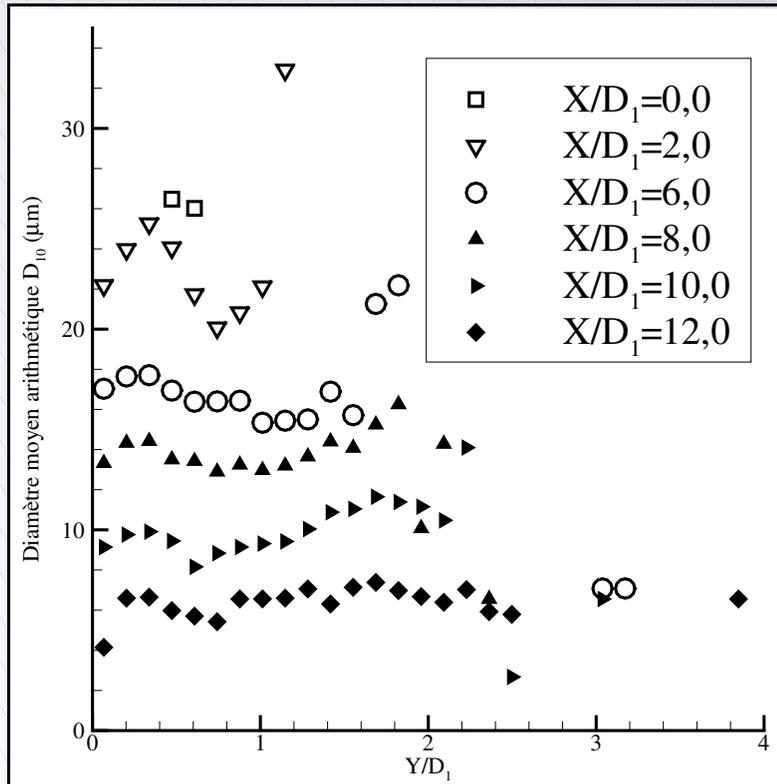
Taux de décroissance axiale : $\tau_{dec} = \frac{d D_{10}}{d X}$

$$\tau_{dec} = 327,7 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

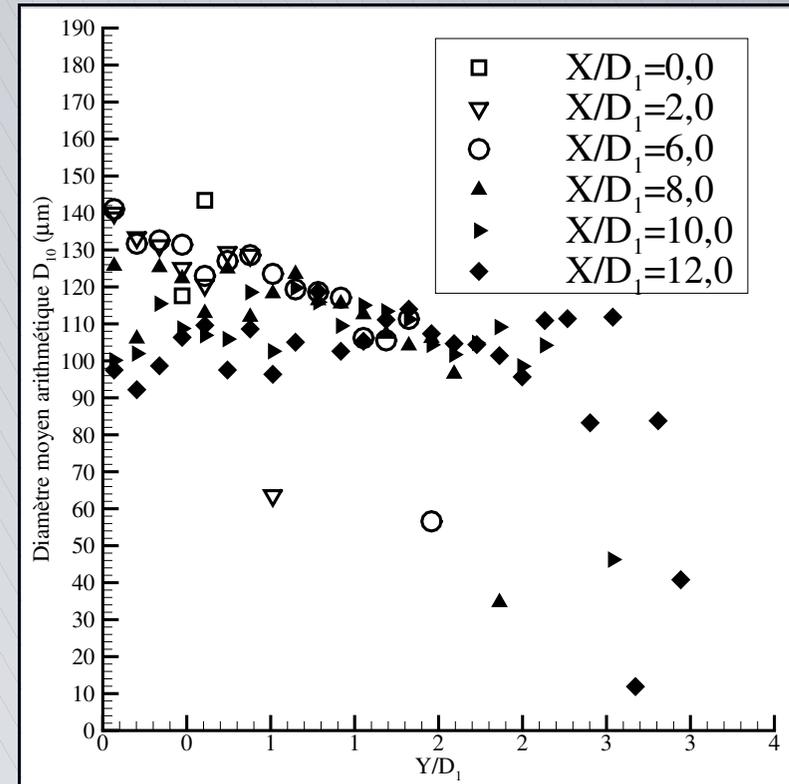
$$\tau_{dec} = 145,9 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen arithmétique D_{10} Évolutions radiales



Avec atomisation



Sans atomisation

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen de Sauter D_{32}

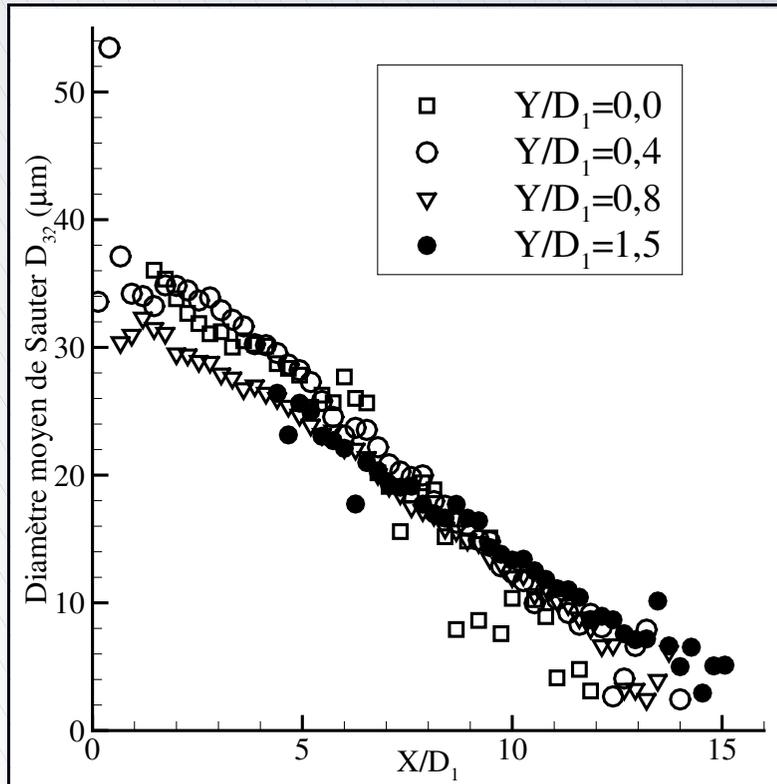
$$D_{32} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2}$$

Global dans le domaine

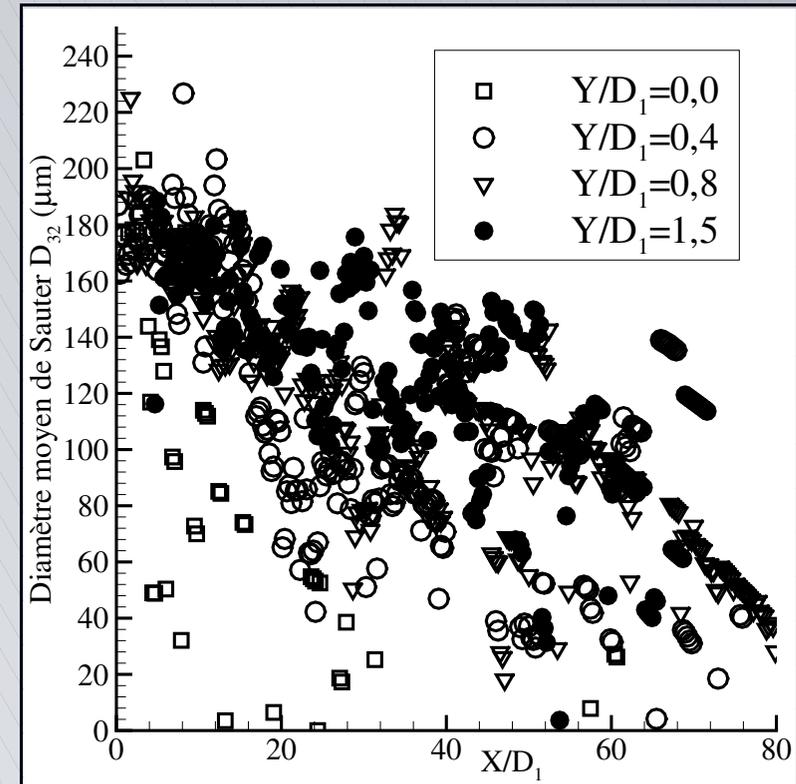
Diamètre moyen de Sauter D_{32} (μm)	
Avec atomisation	39,7
Sans atomisation	85,7

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen de Sauter D_{32} Évolutions axiales



Avec atomisation



Sans atomisation

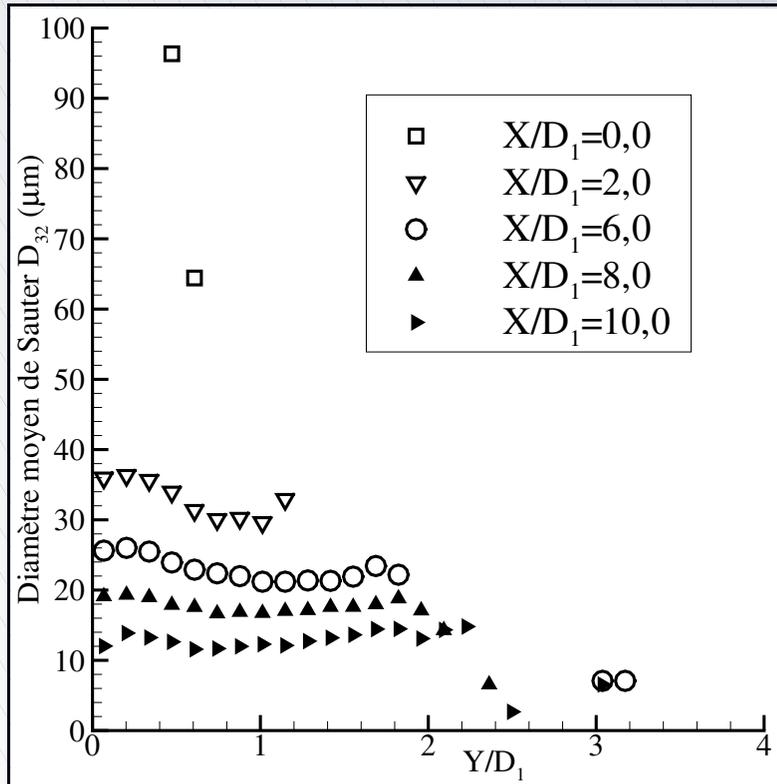
Taux de décroissance axiale : $\tau_{dec} = \frac{d D_{32}}{d X}$

$$\tau_{dec} = 504,9 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

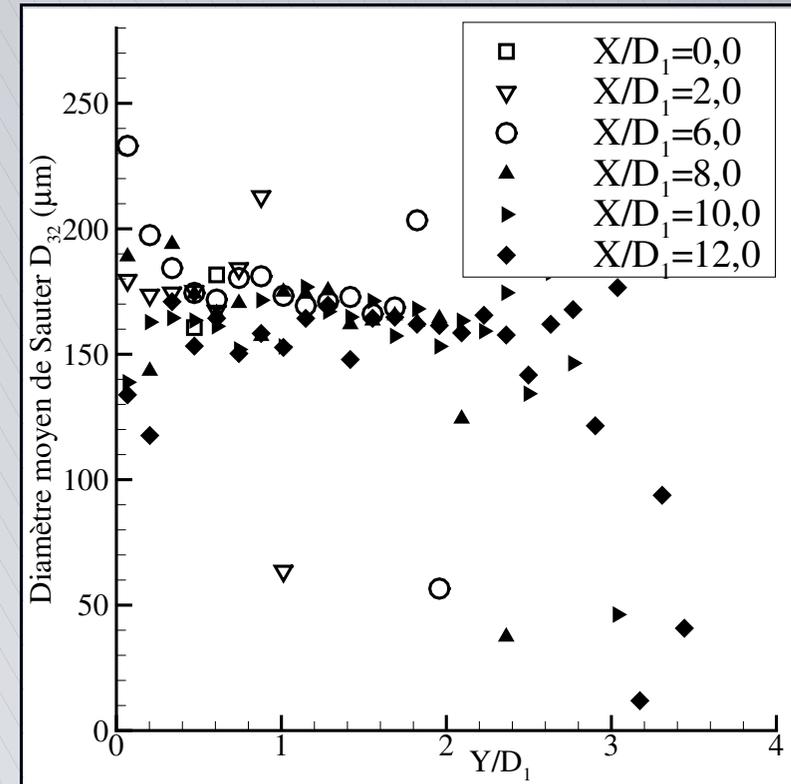
$$\tau_{dec} = 247,4 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

Simulations en conditions non réactives

Diamètre moyen de Sauter D_{32} Évolutions radiales



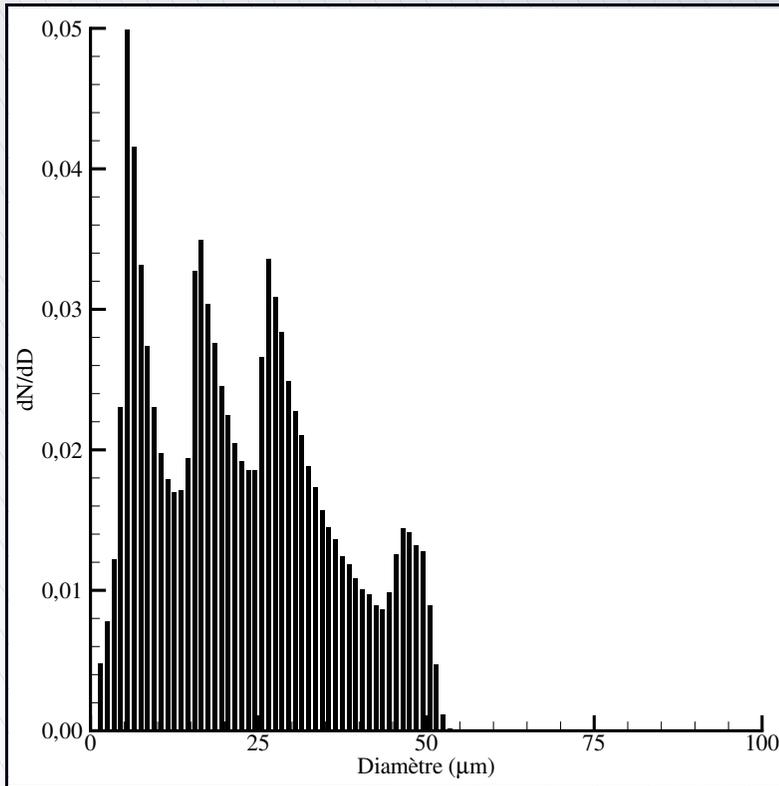
Avec atomisation



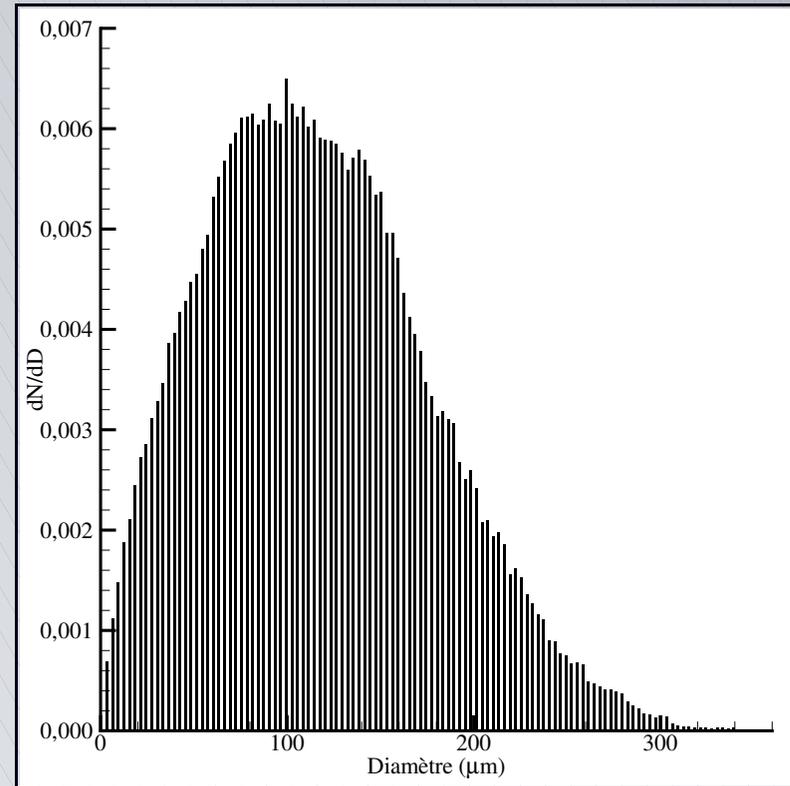
Sans atomisation

Simulations en conditions non réactives

Distributions finales Globales dans le domaine



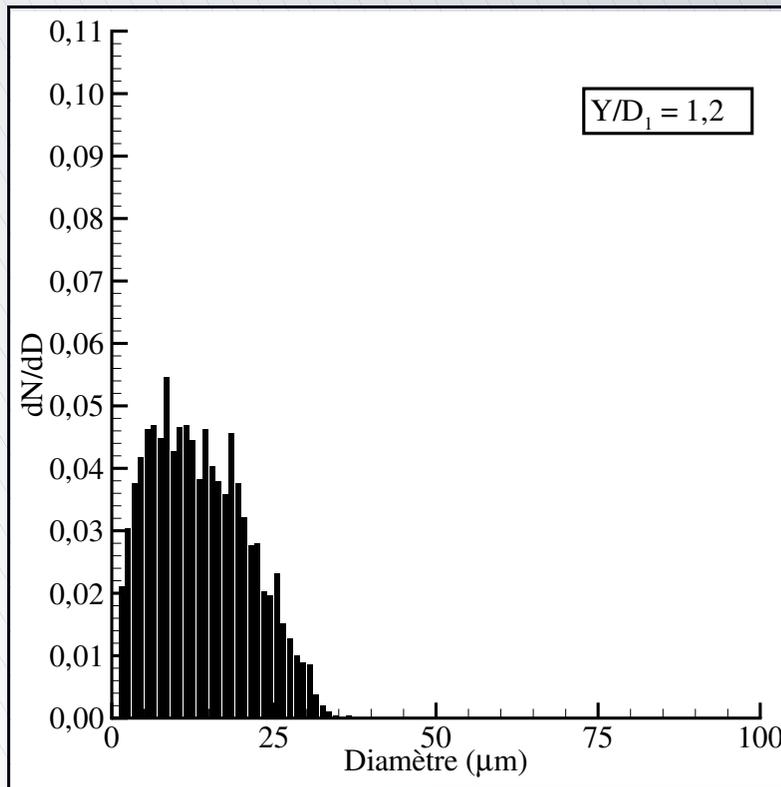
Avec atomisation



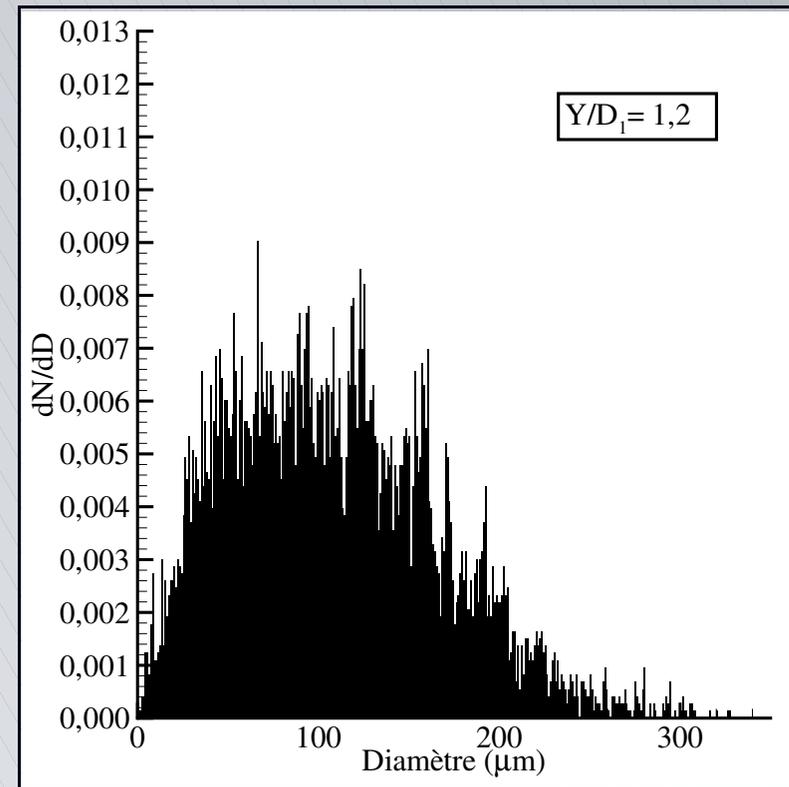
Sans atomisation

Simulations en conditions non réactives

Distributions finales Évolutions axiales ($Y/D_1 = 1,2$)



Avec atomisation



Sans atomisation

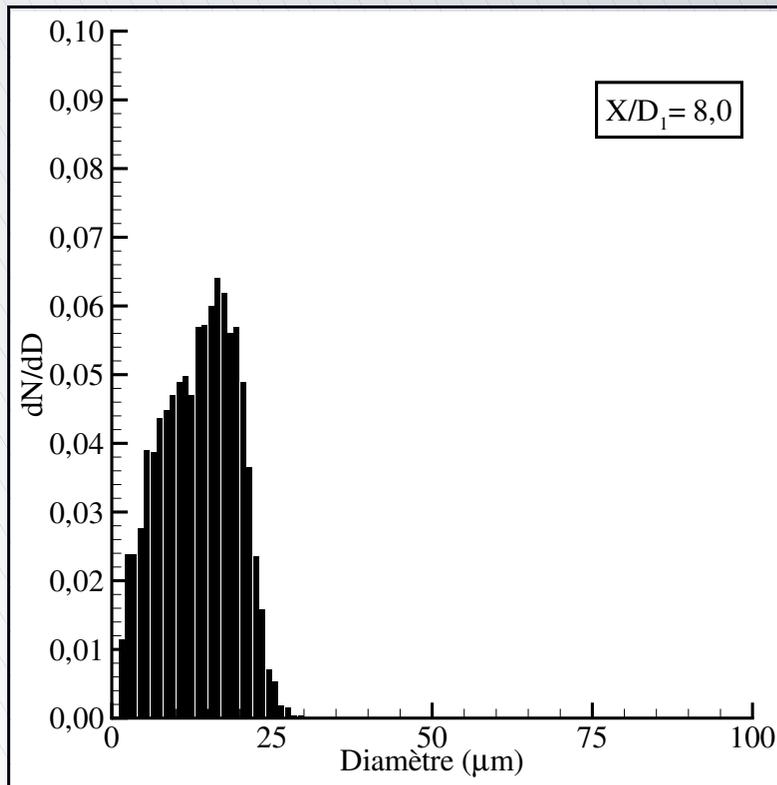
Distribution de Rosin-Rammler : $1 - \nu_c(D) = \exp \left[- \left(\frac{D}{D_{RR}} \right)^N \right]$

$D_{RR} = 22,1 \times 10^{-6} \text{ m}, N = 1,8$

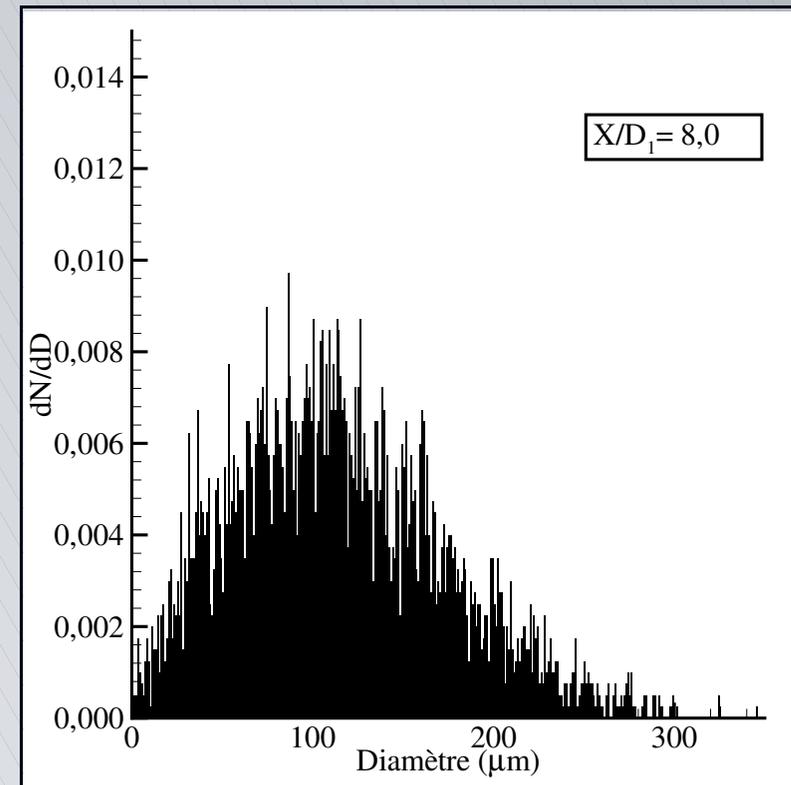
$D_{RR} = 118,4 \times 10^{-6} \text{ m}, N = 1,9$

Simulations en conditions non réactives

Distributions finales Évolutions radiales ($X/D_1 = 8,0$)



Avec atomisation



Sans atomisation

Distribution de Rosin-Rammler : $1 - \nu_c(D) = \exp \left[- \left(\frac{D}{D_{RR}} \right)^N \right]$

$D_{RR} = 21,4 \times 10^{-6} \text{ m}, N = 1,8$

$D_{RR} = 115,8 \times 10^{-6} \text{ m}, N = 1,9$

Simulations en conditions non réactives

Rapport $D_{0,5}/D_{32}$, (Simmons, 1977)

Rapport permettant de caractériser la distribution en terme de taille des gouttes / fraction de volume

$D_{0,5}/D_{32} = 1,2$ (Simmons, 1977)

$$\frac{\sum_{D=0}^{D_{0,5}} V(D)}{\sum_{D=0}^{D_{Max}} V(D)} = 0,5$$

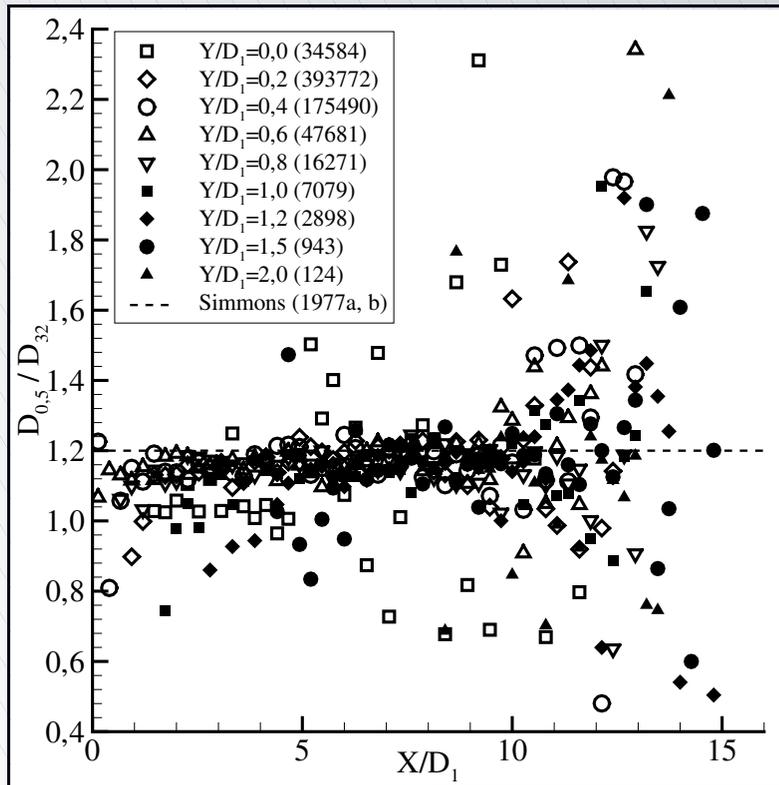
Global dans le domaine

	$D_{0,5} / D_{32}$
Avec atomisation	1,01
Sans atomisation	1,10

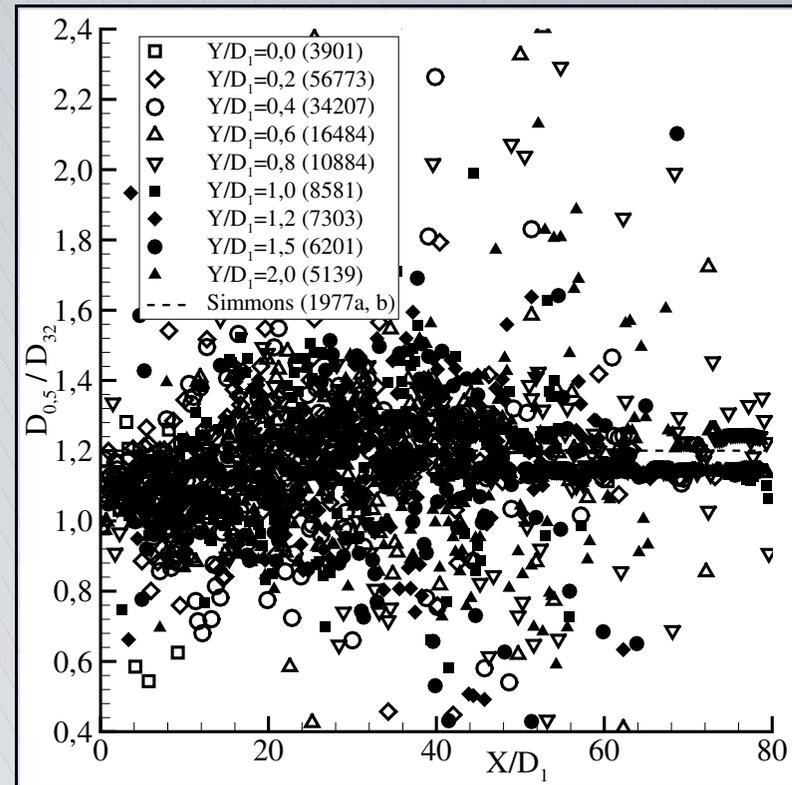
Simulations en conditions non réactives

Rapport $D_{0,5}/D_{32}$, (Simmons, 1977)

Évolutions axiales



Avec atomisation

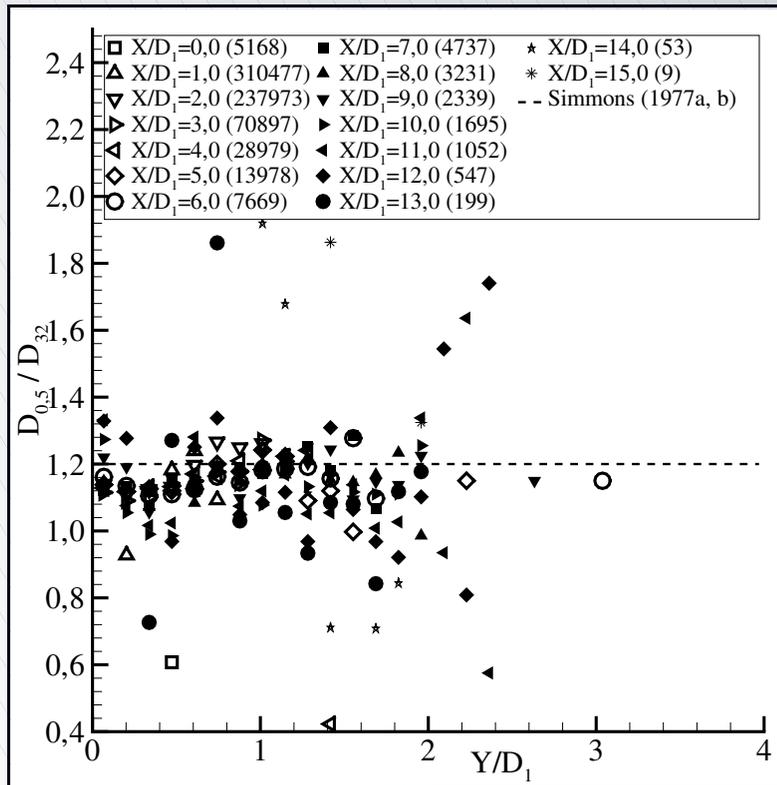


Sans atomisation

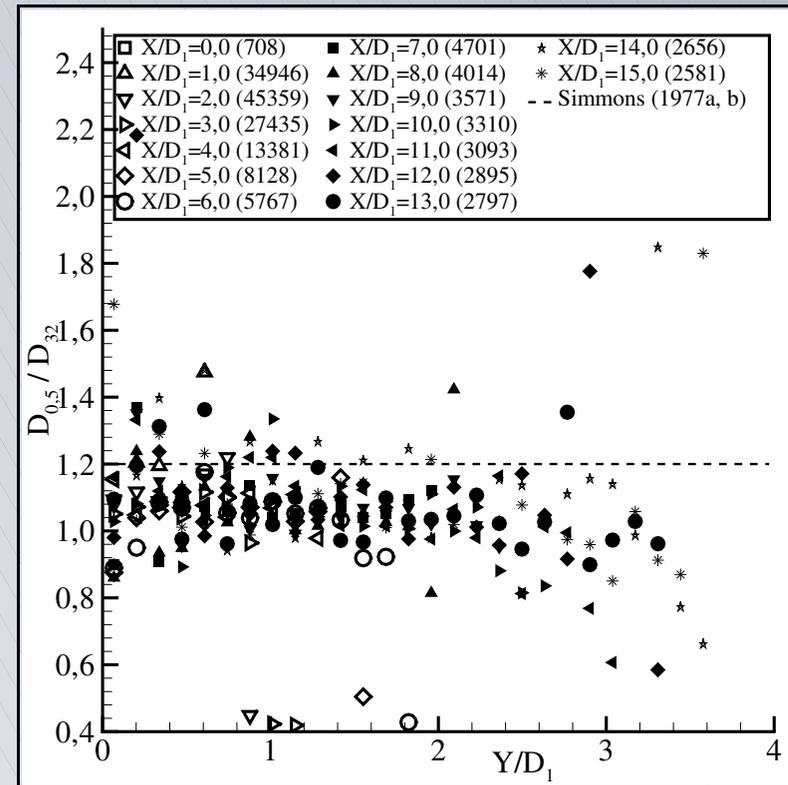
Simulations en conditions non réactives

Rapport $D_{0,5}/D_{32}$, (Simmons, 1977)

Évolutions radiales



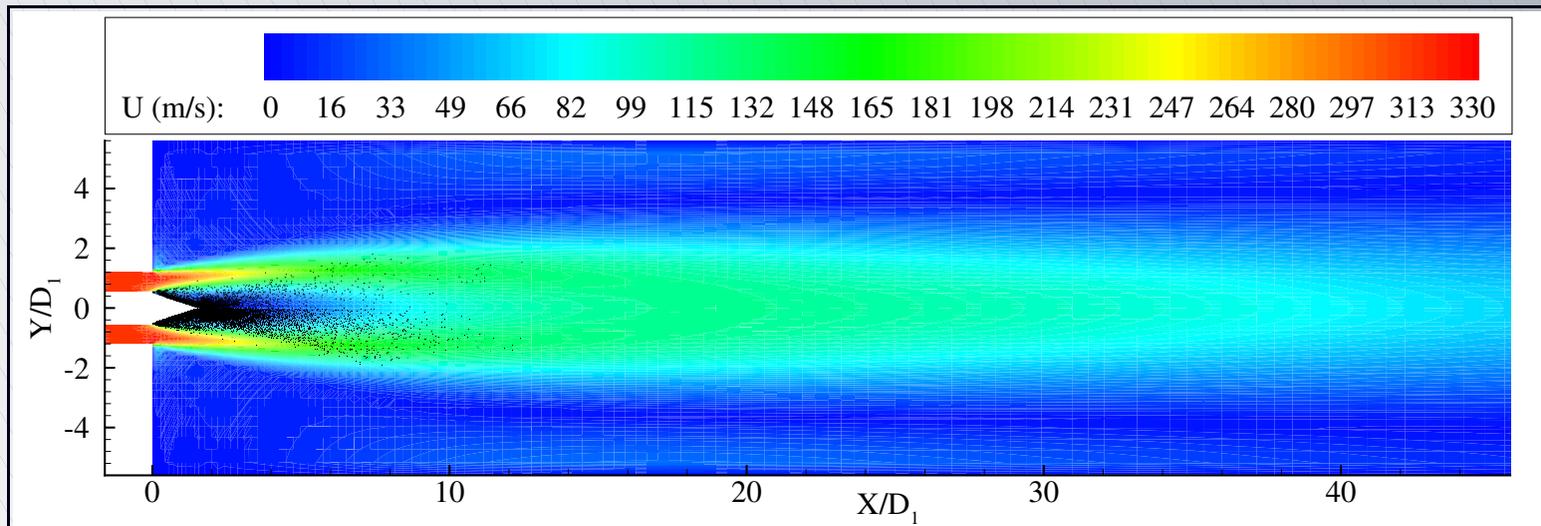
Avec atomisation



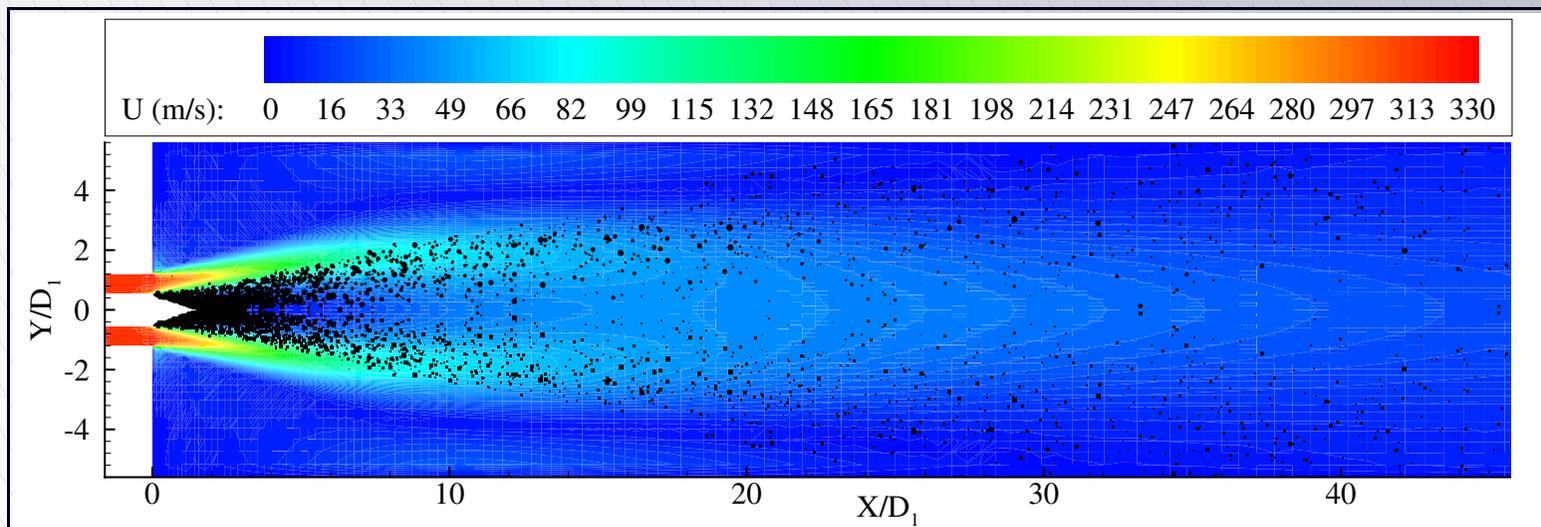
Sans atomisation

Simulations en conditions non réactives

Visualisation de l'ensemble d'un calcul



Avec atomisation



Sans atomisation

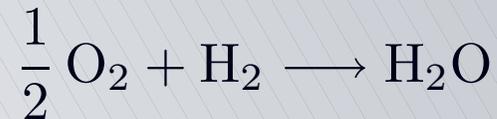
Simulations en conditions réactives

Modèle de combustion

- ❑ Réaction à une étape de la forme :



se traduisant ici par :



- ❑ Modèle **Eddy Break Up** (modèle de combustion à chimie infiniment rapide), particulièrement adapté à la combustion dans des conditions turbulentes (ici modèle $k-\varepsilon$)
- ❑ Flamme à haute température ($\sim 3\,000\text{ K}$)
 - ▶ Dissociation des produits de la réaction
 - ▶ Prise en compte par correction du C_p des produits de combustion

Simulations en conditions réactives

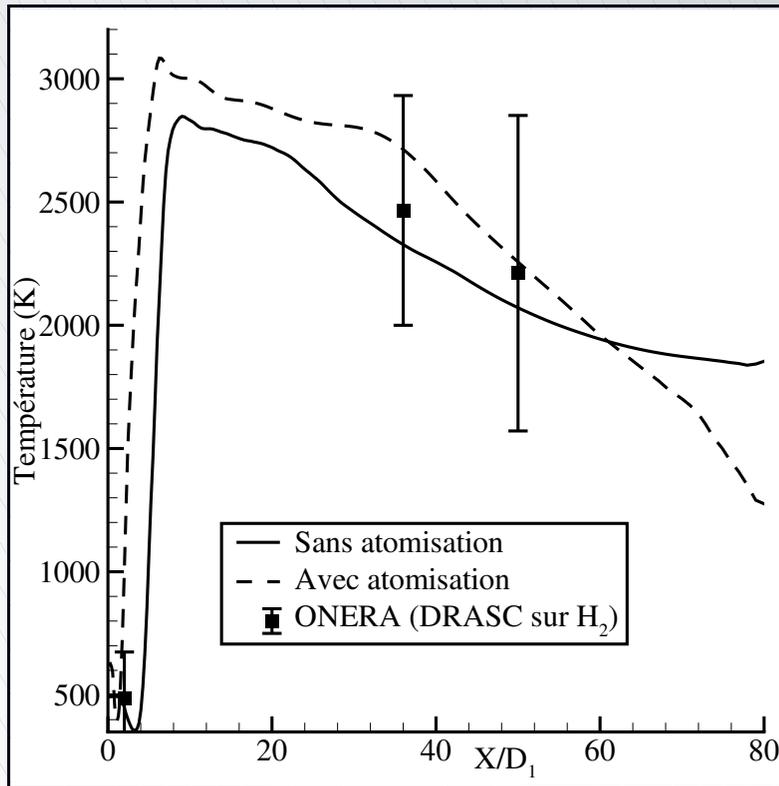
Calculs réalisés

- ❑ Effets du modèle de cassure sur les propriétés du brouillard et de l'écoulement
 - ▶ Simulation **avec** atomisation secondaire
 - ▶ Simulation **sans** atomisation secondaire
- ❑ Caractéristiques d'un calcul
 - ▶ 200 000 itérations, avec $\Delta t = 7 \times 10^{-8}$ s
 - ▶ Temps physique : 14 ms
 - ▶ Sortie des caractéristiques toutes les 500 itérations
 - ▶ \approx 1 000 heures sur supercalculateur SGI ORIGIN 2000
 - ▶ Génération d'environ 30 Go de données
- ❑ Résultats présentés : moyennes réalisées sur les 100 000 derniers pas de temps (200 séries de caractéristiques)

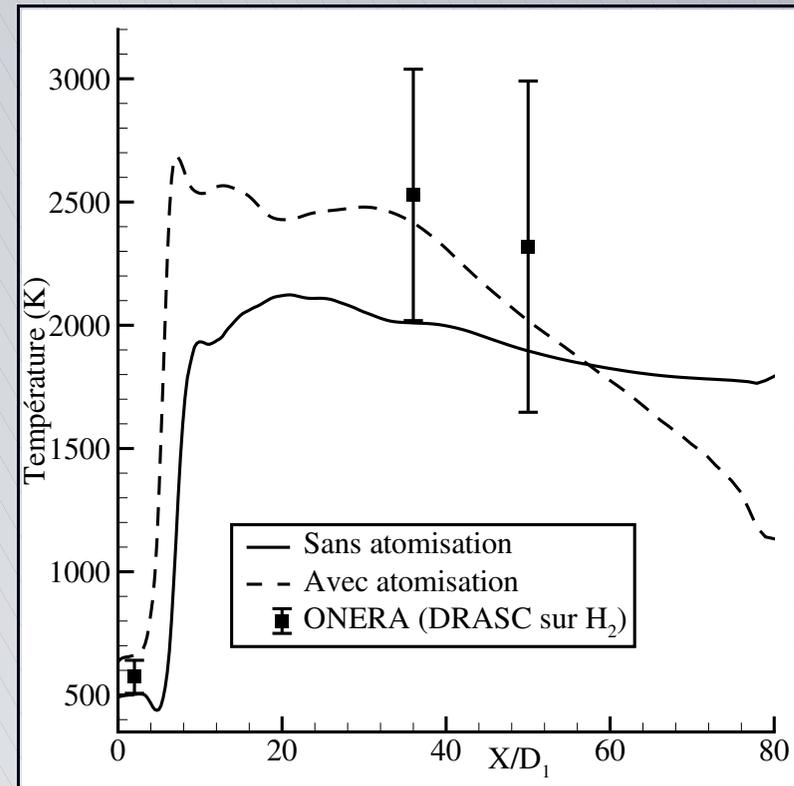
Simulations en conditions réactives

Température de l'écoulement

Évolutions axiales



$$Y/D_1 = 2,0$$

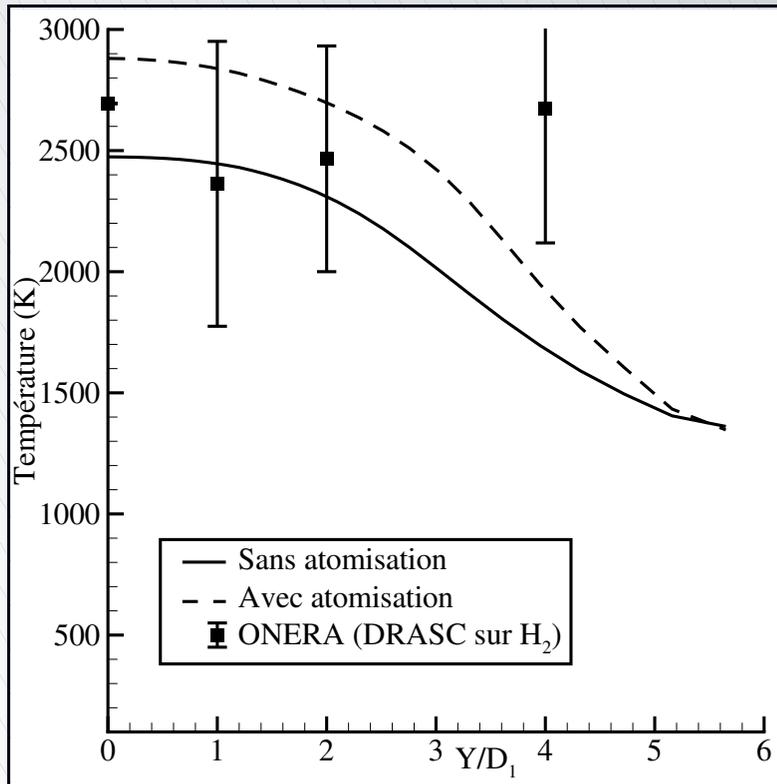


$$Y/D_1 = 3,0$$

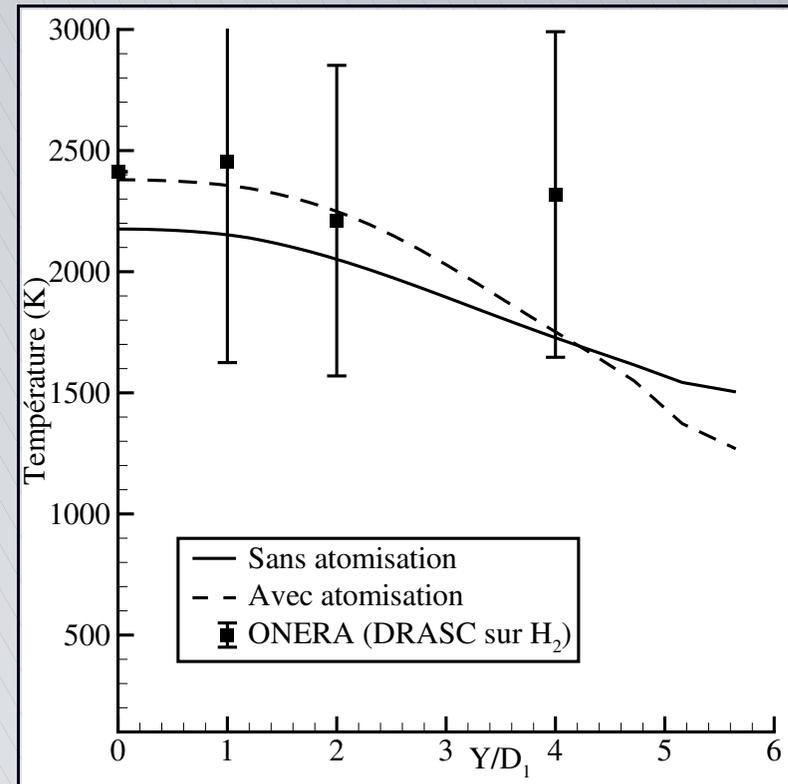
Simulations en conditions réactives

Température de l'écoulement

Évolutions radiales



$$X/D_1 = 36,0$$

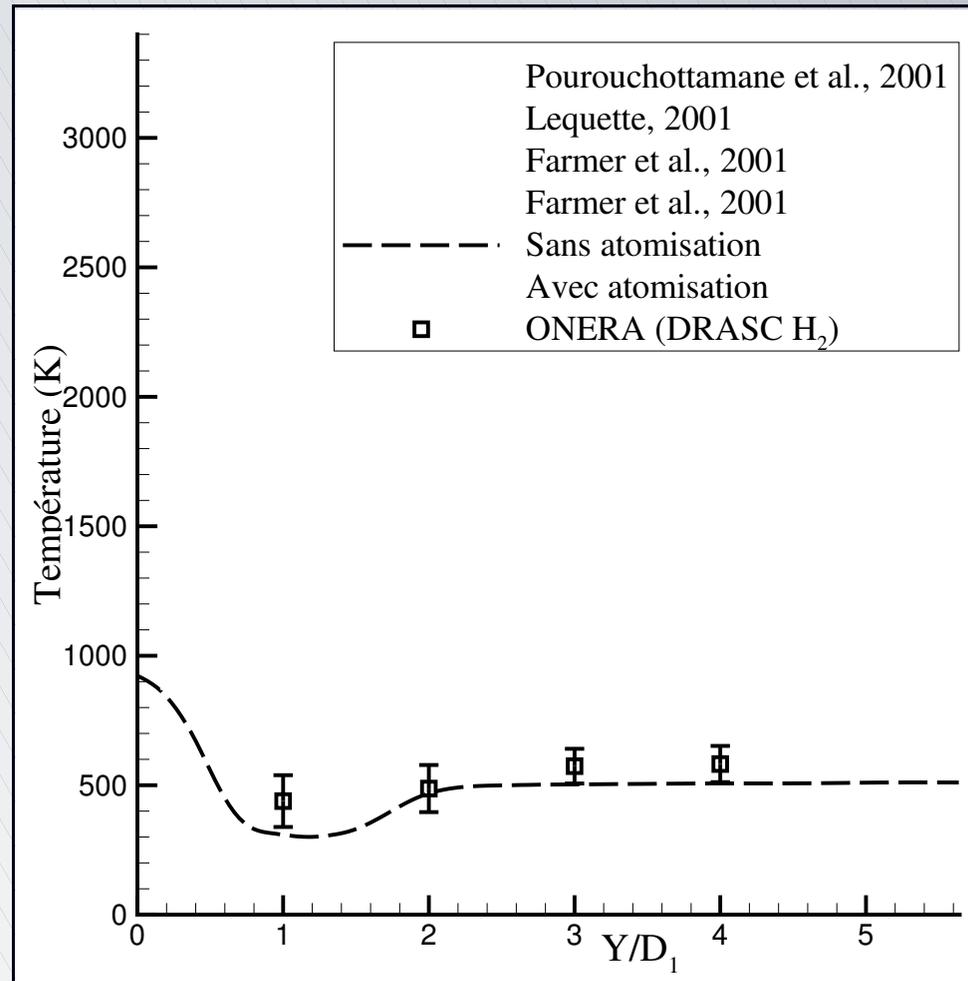


$$X/D_1 = 50,0$$

Simulations en conditions réactives

Température de l'écoulement

Évolutions radiales

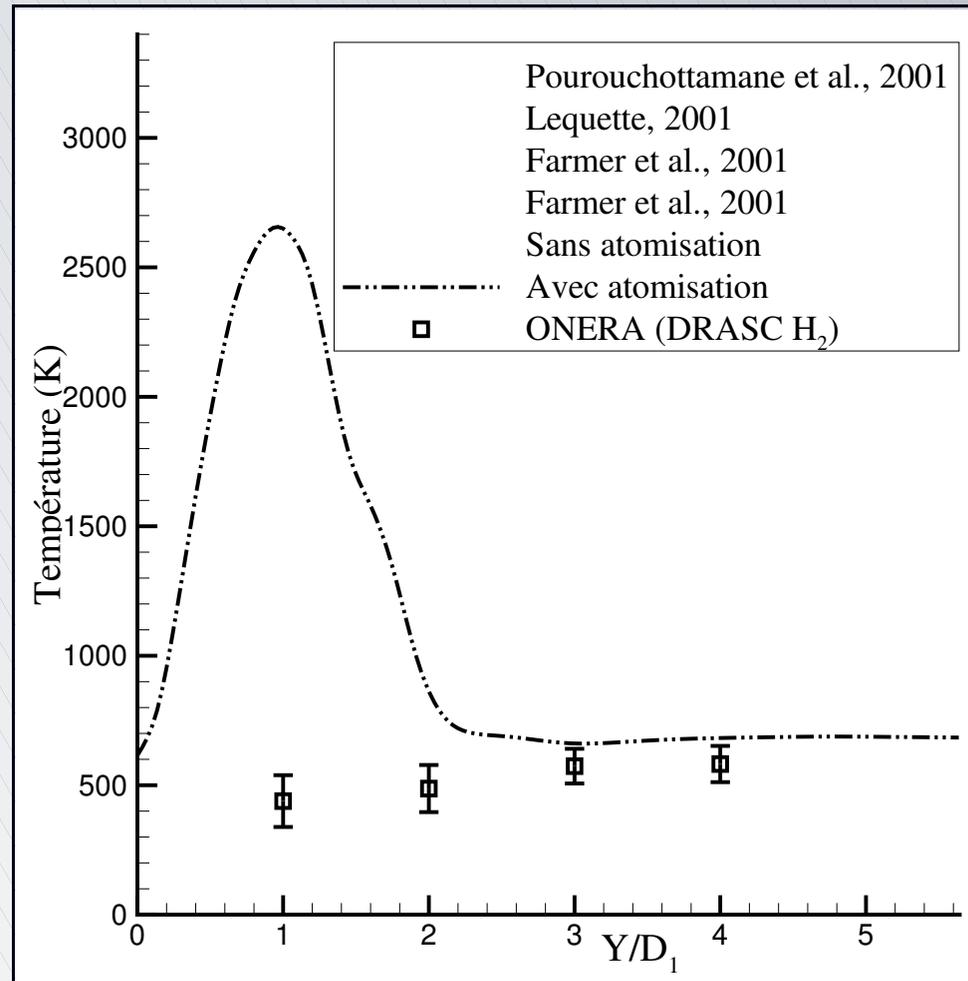


$X/D_1 = 2,0$ (résultats du Workshop)

Simulations en conditions réactives

Température de l'écoulement

Évolutions radiales

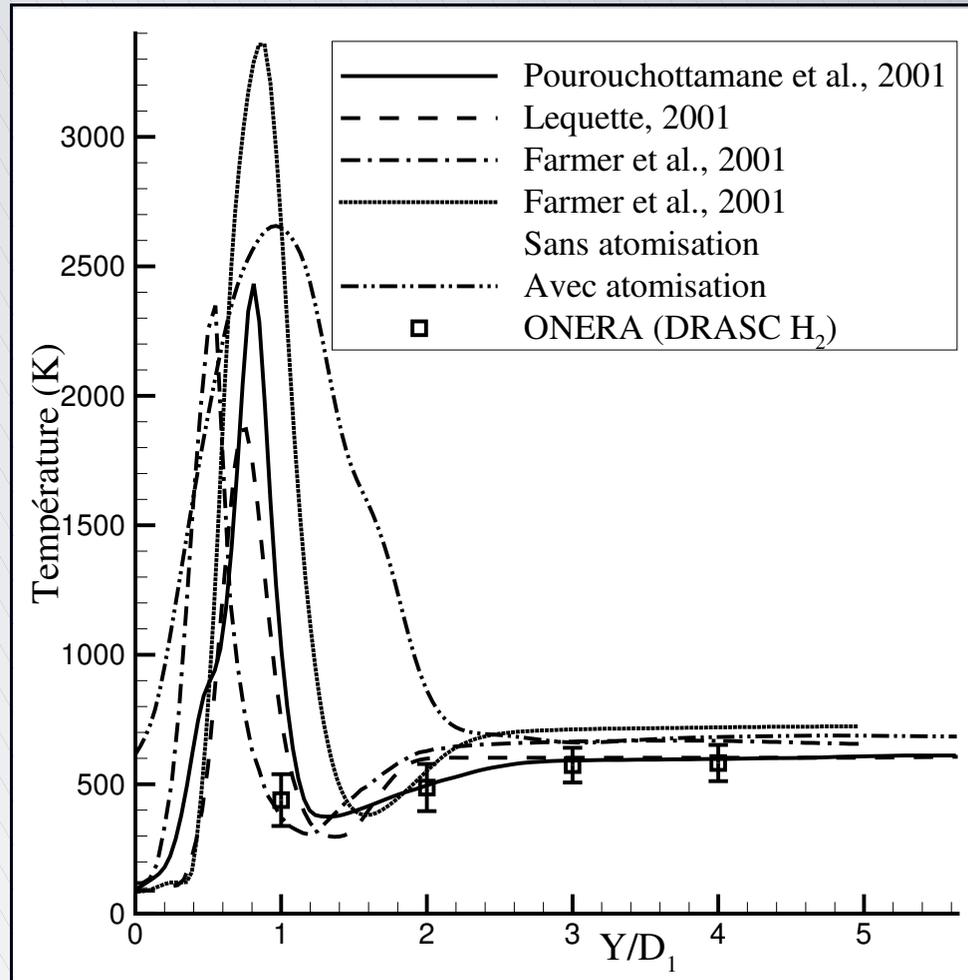


$X/D_1 = 2,0$ (résultats du Workshop)

Simulations en conditions réactives

Température de l'écoulement

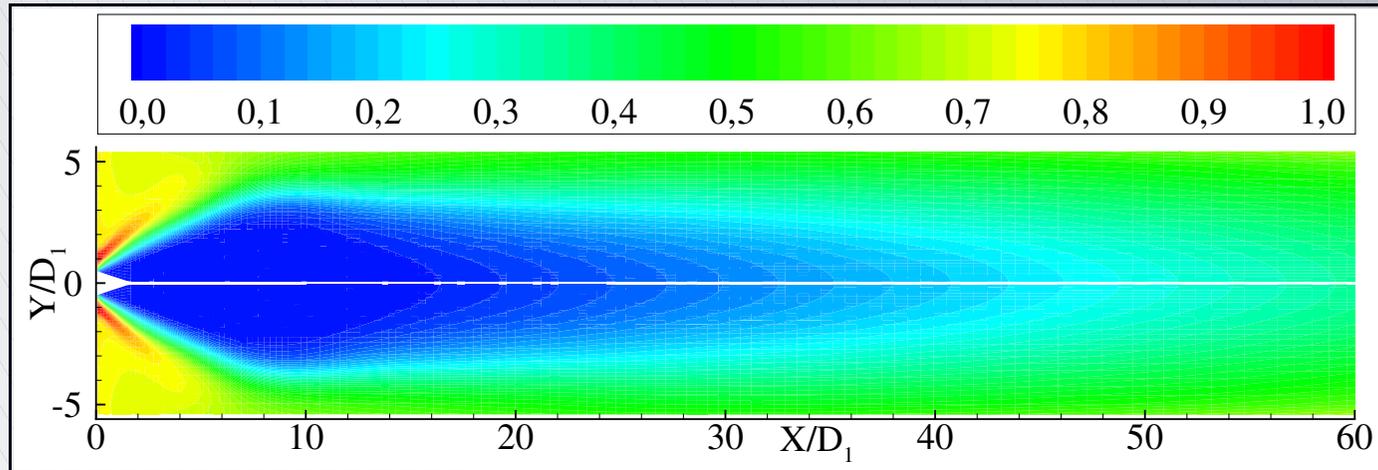
Évolutions radiales



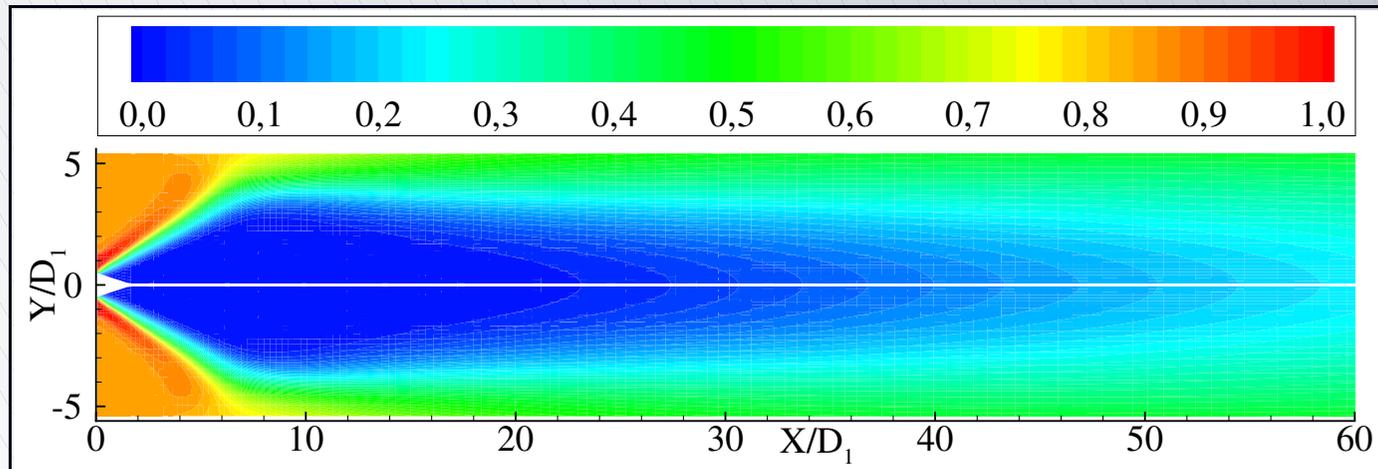
$X/D_1 = 2,0$ (résultats du Workshop)

Simulations en conditions réactives

Composition de l'écoulement Hydrogène gazeux



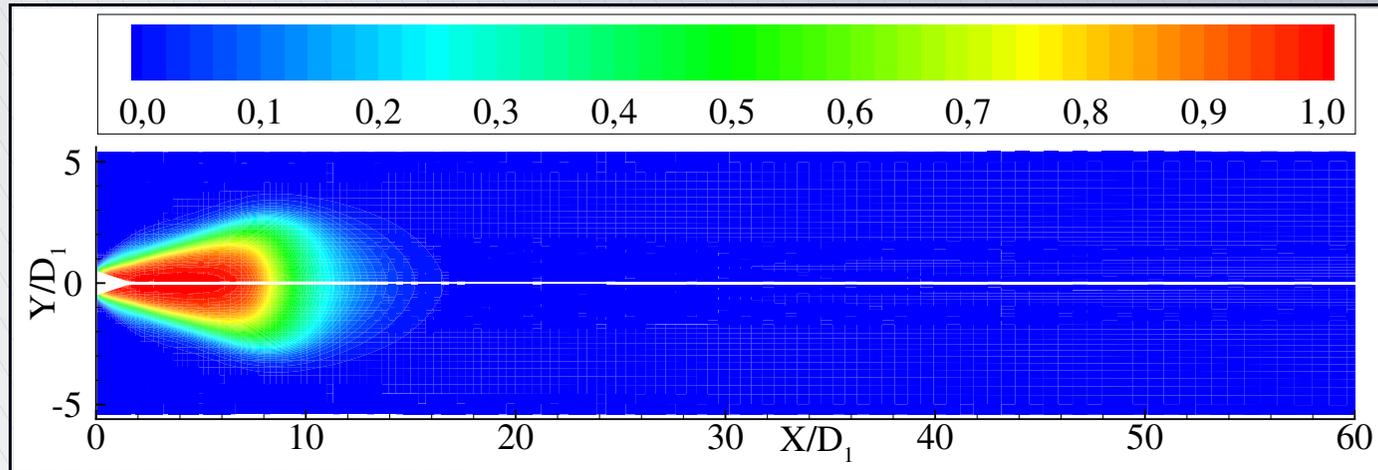
Avec atomisation



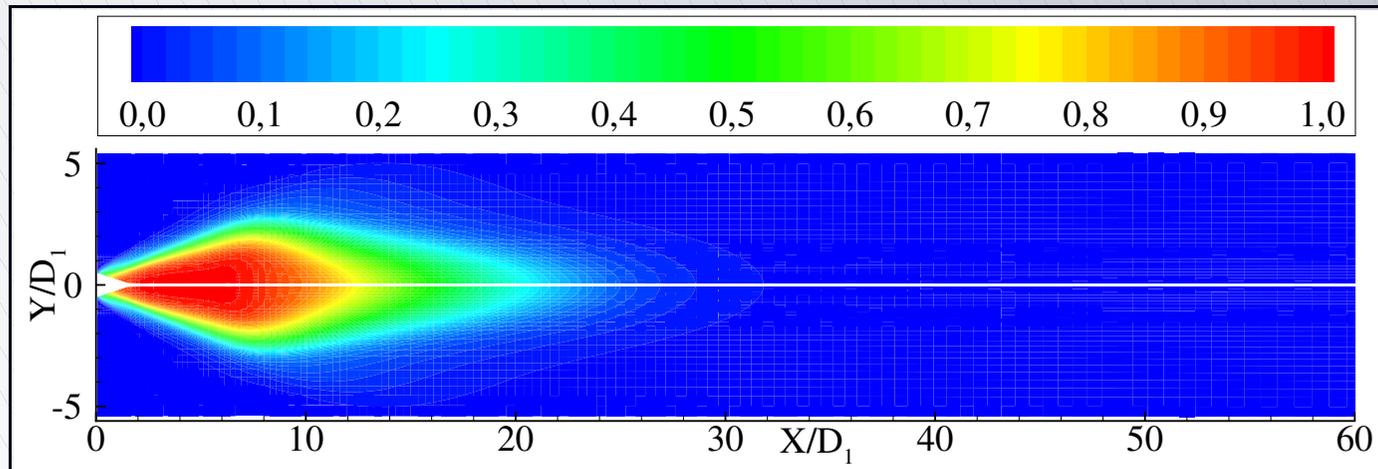
Sans atomisation

Simulations en conditions réactives

Composition de l'écoulement Oxygène gazeux



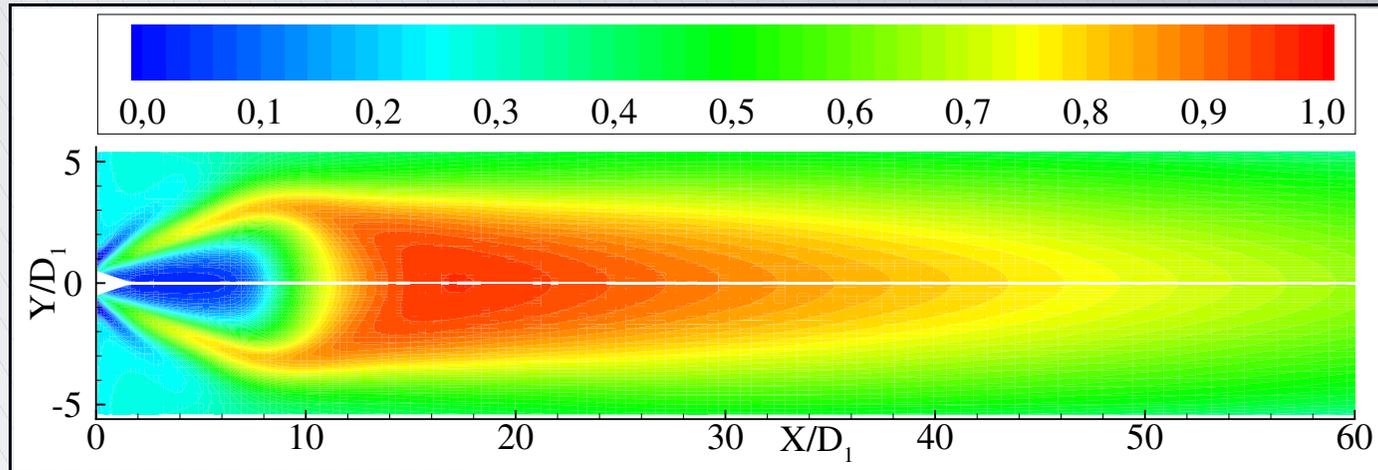
Avec atomisation



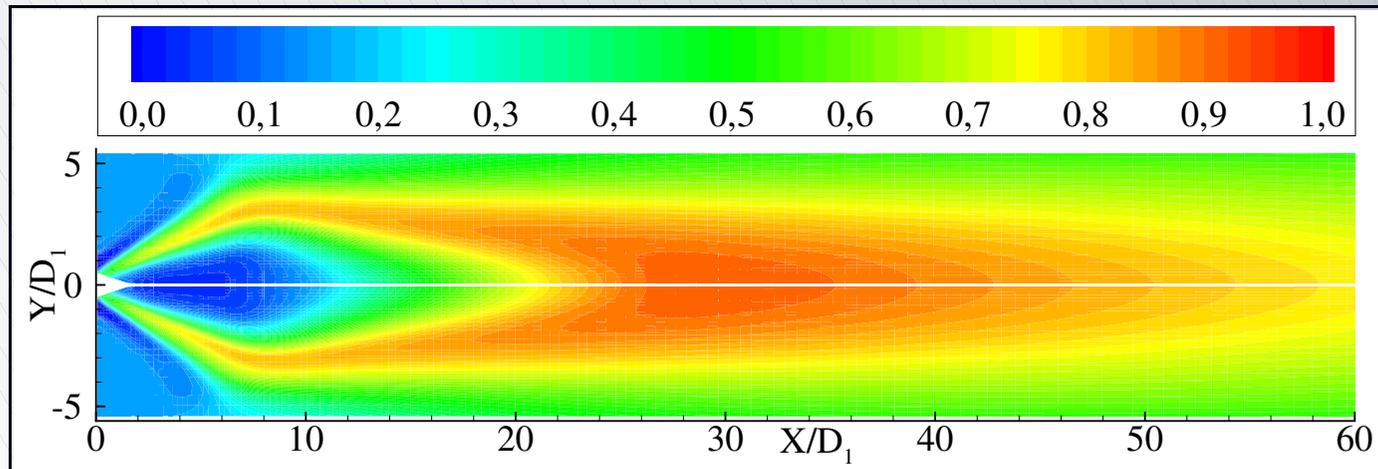
Sans atomisation

Simulations en conditions réactives

Composition de l'écoulement Vapeur d'eau (produits de combustion)



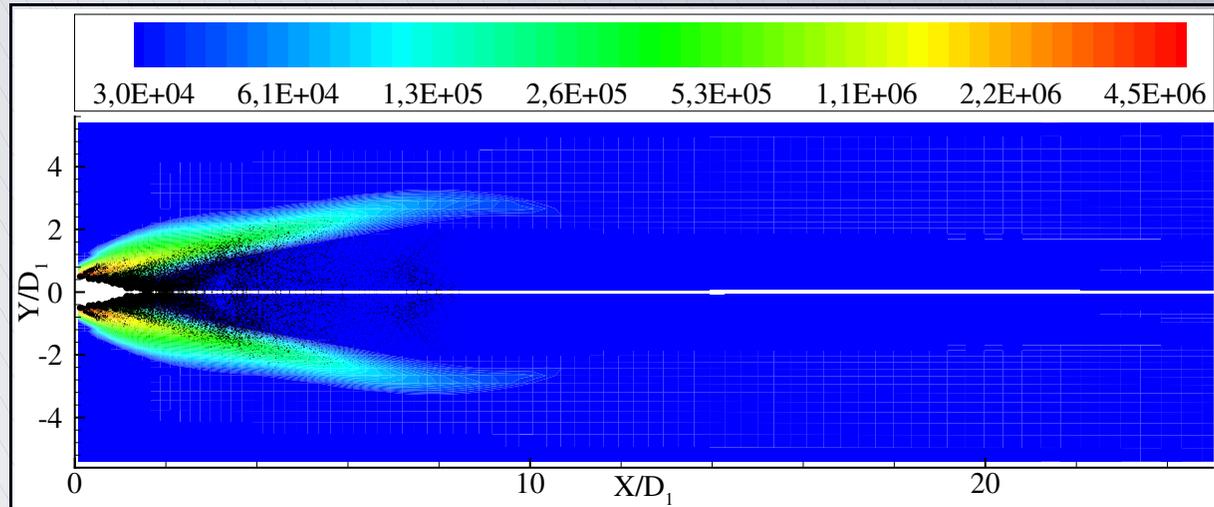
Avec atomisation



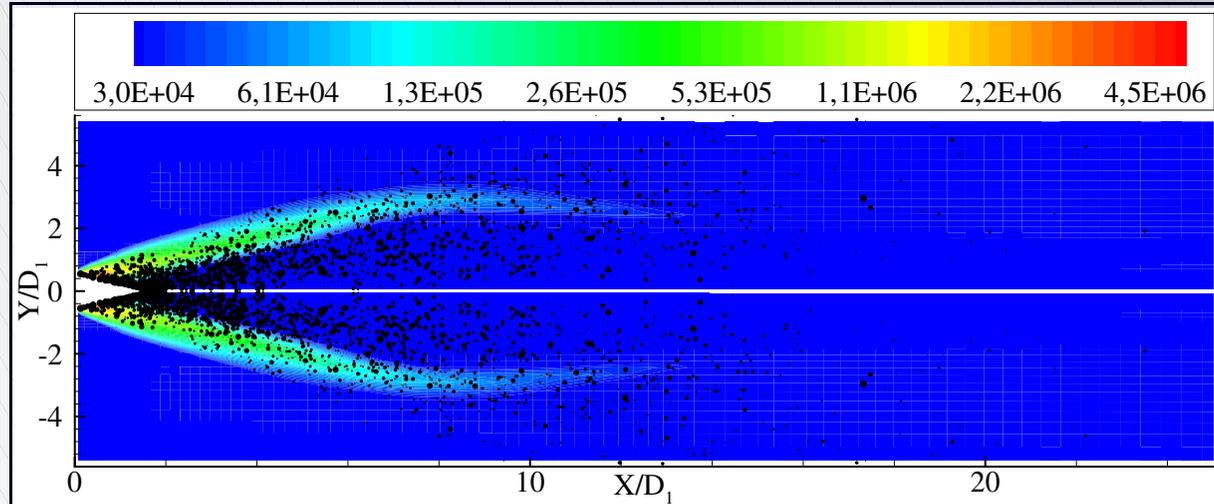
Sans atomisation

Simulations en conditions réactives

Visualisation de l'ensemble d'un calcul



Avec atomisation

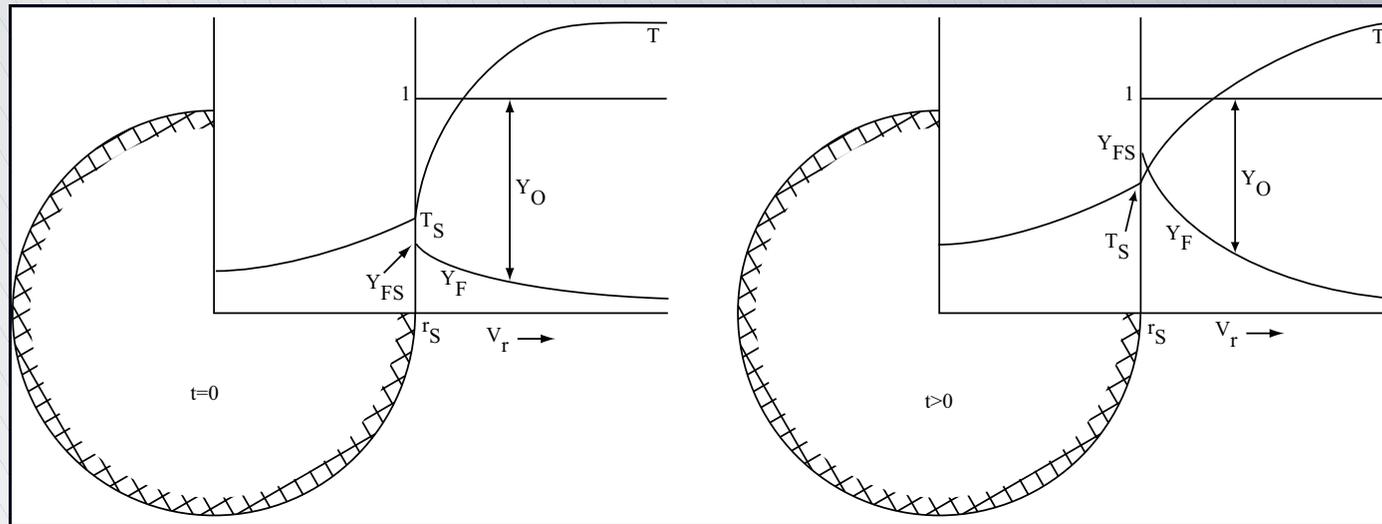


Sans atomisation

La vaporisation turbulente

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

Processus de vaporisation



- ❑ Établissement d'un transfert de chaleur du milieu gazeux vers le milieu liquide (chauffage de la goutte)
- ❑ Établissement d'un transfert de masse du milieu liquide vers le milieu gazeux (évacuation de la vapeur générée)
- ❑ Création de gradients de température et de matière entre les phases

Processus de vaporisation

La loi en D^2

- Modèle de base de la vaporisation : la loi en D^2
 - ▷ Goutte isolée à symétrie sphérique
 - ▷ Écoulement s'adaptant instantanément aux conditions autour de la goutte
 - ▷ Équilibre à la surface de la goutte
 - ▷ Pression constante autour de la goutte
 - ▷ Propriétés de transport constantes ($Le = 1$)
 - ▷ Température de la goutte constante et uniforme
 - ▷ ...

Processus de vaporisation

La loi en D^2

- Modèle de base de la vaporisation : la loi en D^2
- Limitations
 - ▷ Effet de convection non pris en compte
 - ▷ Chauffage de la goutte
 - ▷ Effets des interactions dans un brouillard
 - ▷ Effets supercritiques
 - ▷ ...

Processus de vaporisation

La loi en D^2

- ❑ Modèle de base de la vaporisation : la loi en D^2
- ❑ Limitations
- ❑ Loi en D^2

$$D^2 = D_0^2 - K t$$

- ❑ Taux de vaporisation

$$K = 8 \frac{\rho_{Fg}}{\rho_{Fl}} D_m \ln(1 + B) = 8 \frac{\lambda_g}{\rho_{Fl} C_{p_g}} \ln(1 + B)$$

- ❑ Temps de vaporisation de la goutte

$$t_v = \frac{D_0^2}{K} = \frac{\rho_{Fl} D_0^2}{8 \frac{\lambda_g}{C_{p_g}} \ln(1 + B)}$$

Processus de vaporisation

Vaporisation en milieu turbulent

- ❑ Vapeur évacuée plus rapidement \Rightarrow modification du gradient de vapeur autour de la goutte
- ❑ Modification du gradient de température autour de la goutte
- ❑ Déformation de la goutte \Rightarrow perte de la symétrie sphérique (une des principales hypothèses de la loi en D^2), et augmentation de l'interface liquide/gaz
- ❑ Accroissement de la vaporisation seulement dépendante de l'intensité de la turbulence et non de son échelle (Driscoll et Pelaccio, 1980)

Modélisation de la vaporisation turbulente

Modélisation de la vaporisation turbulente

- Modélisation basée sur les résultats expérimentaux de Birouk (1996)
 - ▶ Goutte sphérique suspendue par une fibre en quartz
 - ▶ Variation des propriétés de la goutte (densité, température d'ébullition...) par changement de sa composition (du n-hexane au n-décane)
 - ▶ Diamètre initial de la goutte compris entre 1,5 et 1,7 mm
 - ▶ Environnement turbulent d'air à vitesse moyenne nulle, à température et pression ambiantes
 - ▶ Suivi temporel du diamètre de la goutte pour différentes intensités de la turbulence

Modélisation de la vaporisation turbulente

Modélisation de la vaporisation turbulente

- ❑ Modélisation basée sur les résultats expérimentaux de Birouk (1996)
- ❑ Taux de vaporisation turbulent

$$\frac{K_{turb}}{K} - 1 = 0,019 Re_t^{2/3} Sc^2 \quad (Re_t = \sqrt{q}D_0/\nu, Sc = D_m/\nu)$$

Modélisation de la vaporisation turbulente

Modélisation de la vaporisation turbulente

- ❑ Modélisation basée sur les résultats expérimentaux de Birouk (1996)

- ❑ Taux de vaporisation turbulent

$$\frac{K_{turb}}{K} - 1 = 0,019 Re_t^{2/3} Sc^2 \quad (Re_t = \sqrt{q}D_0/\nu, Sc = D_m/\nu)$$

- ❑ Correction du coefficient de traînée de la goutte

- ▶ Coefficient de traînée d'une goutte sans vaporisation

$$C_D = \frac{F}{(\pi/4) D^2 (\rho_g U_g^2 / 2)}$$

Modélisation de la vaporisation turbulente

Modélisation de la vaporisation turbulente

- ❑ Modélisation basée sur les résultats expérimentaux de Birouk (1996)

- ❑ Taux de vaporisation turbulent

$$\frac{K_{turb}}{K} - 1 = 0,019 Re_t^{2/3} Sc^2 \quad (Re_t = \sqrt{q}D_0/\nu, Sc = D_m/\nu)$$

- ❑ Correction du coefficient de traînée de la goutte

- ▶ Coefficient de traînée d'une goutte sans vaporisation

$$C_D = \frac{F}{(\pi/4) D^2 (\rho_g U_g^2 / 2)}$$

- ▶ Coefficient de traînée d'une goutte en vaporisation

$$C_D (1 + B_{turb})^{0,2} = \frac{24}{Re} + 4,8 Re^{-0,37} \quad \text{pour } 10 < Re < 300$$

Modélisation de la vaporisation turbulente

Modélisation de la vaporisation turbulente

- ❑ Modélisation basée sur les résultats expérimentaux de Birouk (1996)

- ❑ Taux de vaporisation turbulent

$$\frac{K_{turb}}{K} - 1 = 0,019 Re_t^{2/3} Sc^2 \quad (Re_t = \sqrt{q}D_0/\nu, Sc = D_m/\nu)$$

- ❑ Correction du coefficient de traînée de la goutte

- ▶ Coefficient de traînée d'une goutte sans vaporisation

$$C_D = \frac{F}{(\pi/4) D^2 (\rho_g U_g^2 / 2)}$$

- ▶ Coefficient de traînée d'une goutte en vaporisation

$$C_D (1 + B_{turb})^{0,2} = \frac{24}{Re} + 4,8 Re^{-0,37} \quad \text{pour } 10 < Re < 300$$

- ▶ Coefficient de transfert turbulent

$$K_{turb} = 8 \frac{\rho_{Fg}}{\rho_{Fl}} D_m \ln(1 + B_{turb}) = 8 \frac{\lambda_g}{\rho_{Fl} C_{p_g}} \ln(1 + B_{turb})$$

Le code de calcul MSD

Présentation du code MSD (code ONERA)

- ❑ Code RANS tridimensionnel instationnaire
- ❑ Calculs parallèles avec méthodes MPI et PVM
- ❑ Intégration temporelle implicite ou explicite
- ❑ Méthodes spatiales : Roe et dérivées, schémas mixtes...
- ❑ Calculs mono ou multi-espèces
- ❑ Lois des gaz parfaits ou réels
- ❑ Thermodynamique variable ou constante
- ❑ Turbulence : modèles à 1 ou 2 équations ($k-\varepsilon$, ...)
- ❑ Domaines de calcul 1D, 2D et 3D, avec conditions de périodicité et de symétrie
- ❑ Modèles de combustion : **Eddy Break Up**, Cramer, CLE...

Le code de calcul MSD

Présentation du code MSD (code ONERA)

Phase dispersée

- ❑ Calculs multiphasiques avec une approche Eulérienne ou Lagrangienne
- ❑ Introduction ponctuelle des particules
- ❑ Particules à thermodynamique constante ou variable, inertes ou évaporantes
- ❑ Dispersion turbulente des particules
- ❑ Couplage avec la phase gazeuse « one way coupling » ou « two way coupling »
- ❑ ...

Le code de calcul MSD

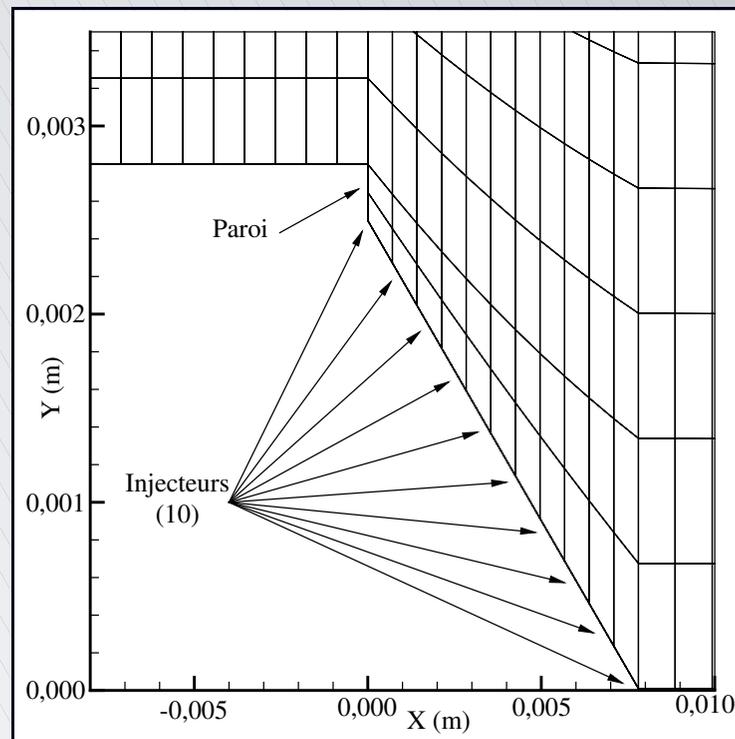
Intégration du modèle dans MSD

- ❑ Modèle de vaporisation turbulente intégré dans MSD par l'intermédiaire du module diphasique Lagrangien *SPARTE* (accès aux caractéristiques des gouttes plus aisé)
- ❑ Remplacement des routines d'évaluation de la vaporisation et du calcul du coefficient de traînée
- ❑ Actualisation des coefficients de transferts (massique et thermique) par le coefficient de transfert turbulent B_{turb}
- ❑ Remplacement du coefficient de vaporisation classique par le coefficient de vaporisation turbulent K_{turb}

Simulations de la vaporisation turbulente

Injection des gouttes d'oxygène liquide

- ❑ Maillage identique à celui utilisé au cours des calculs d'atomisation secondaire
- ❑ 10 injecteurs le long du cœur potentiel introduisant chacun 10 % du volume liquide



Simulations de la vaporisation turbulente

Injection des gouttes d'oxygène liquide

- ❑ Maillage identique à celui utilisé pour les calculs d'atomisation secondaire
- ❑ 10 injecteurs le long du cœur potentiel introduisant chacun 10 % du volume liquide
- ❑ Vitesse initiale d'injection parallèle à l'axe, avec $V_{g0} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- ❑ Diamètre initial des gouttes : $D_{ini} = 82 \times 10^{-6} \text{ m}$

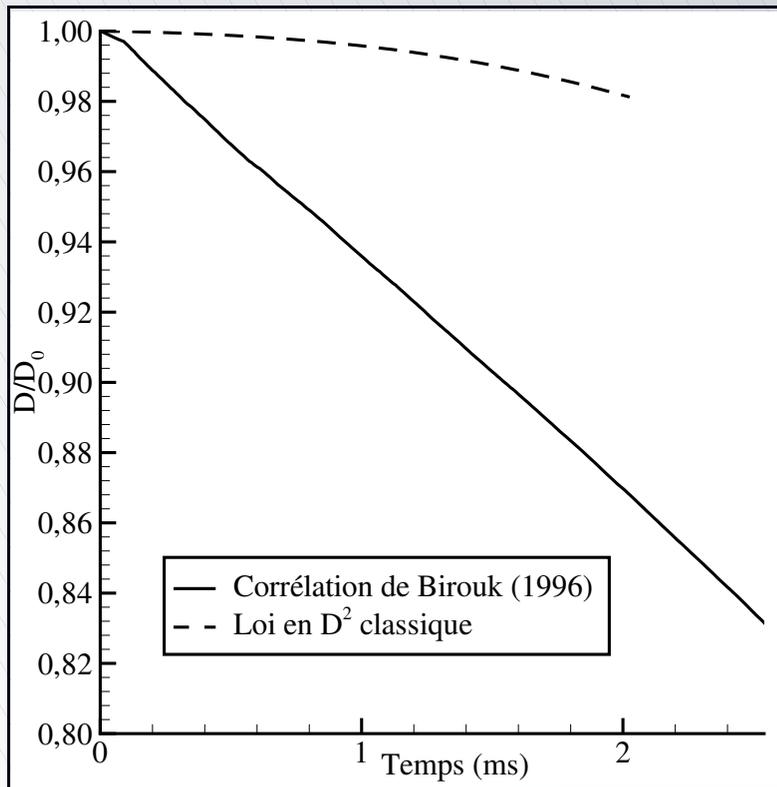
Simulations de la vaporisation turbulente

Calculs réalisés

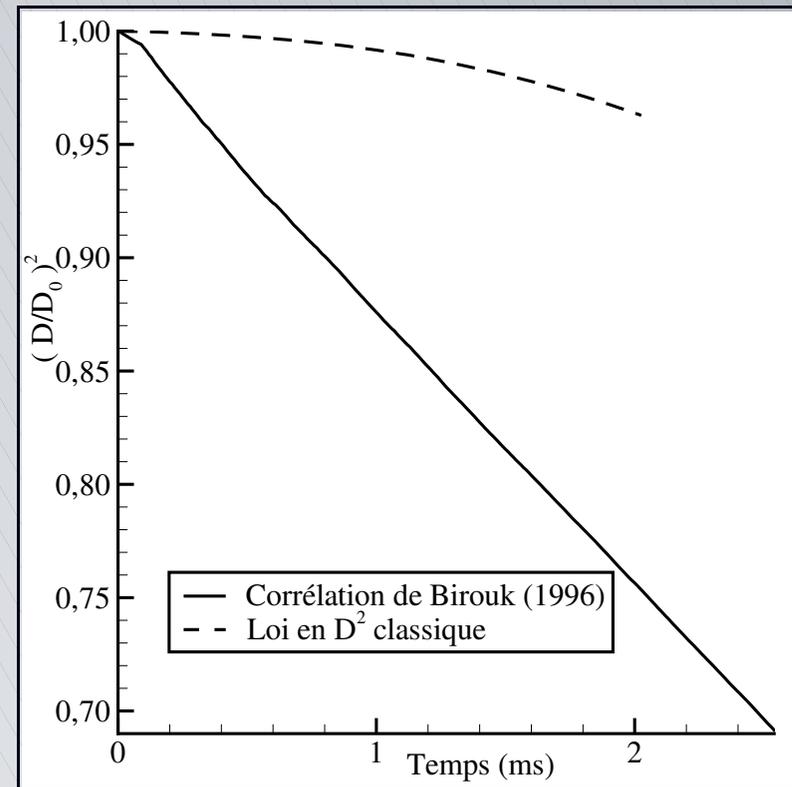
- ❑ Effets du modèle de vaporisation turbulente sur les propriétés des gouttes
 - ▶ Simulation avec vaporisation suivant la loi en D^2
 - ▶ Simulation avec le modèle de vaporisation turbulente
- ❑ Caractéristiques d'un calcul
 - ▶ 200 000 itérations, avec $\Delta t = 8,8 \times 10^{-8}$ s
 - ▶ Temps physique : 17,6 ms
 - ▶ \approx 200 heures sur COMPAQ ALPHA DS20E
 - ▶ Génération d'environ 3 Go de données
- ❑ Résultats correspondant aux propriétés d'une goutte issue de l'avant dernier injecteur suivant la direction axiale

Simulations de la vaporisation turbulente

Diamètre de la goutte



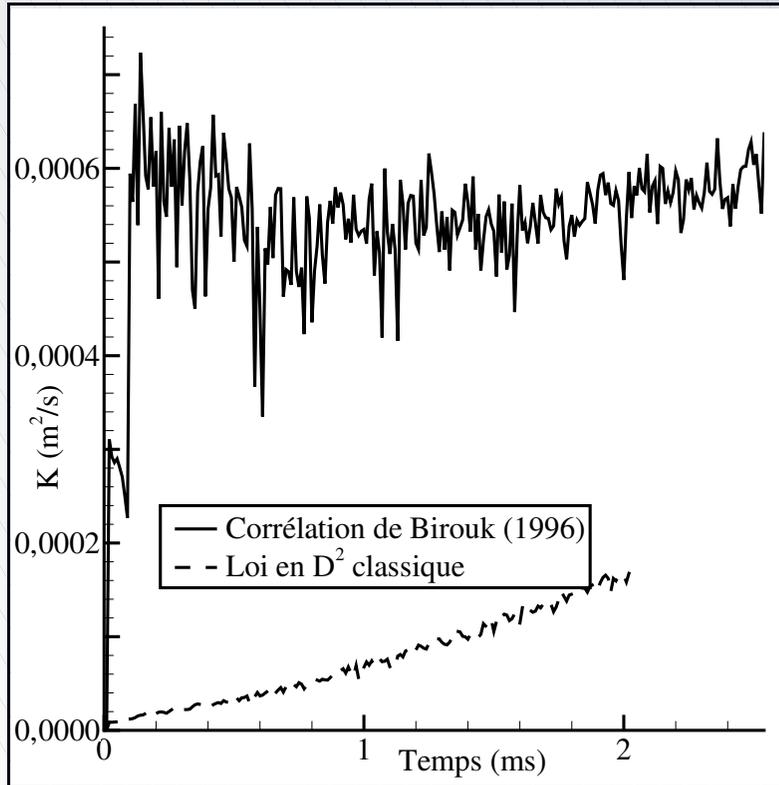
Diamètre



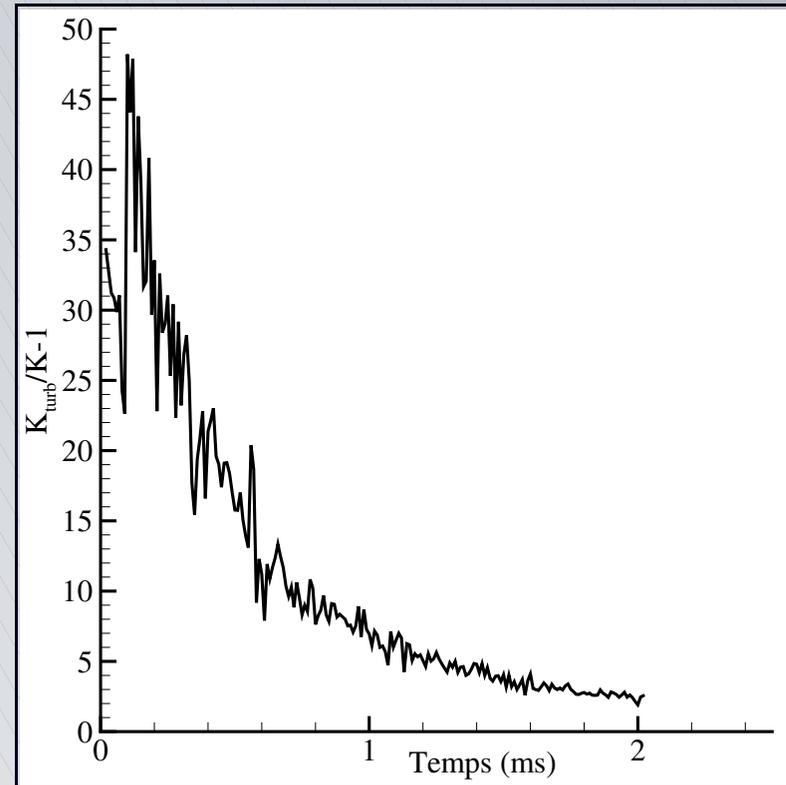
Diamètre au carré

Simulations de la vaporisation turbulente

Taux de vaporisation



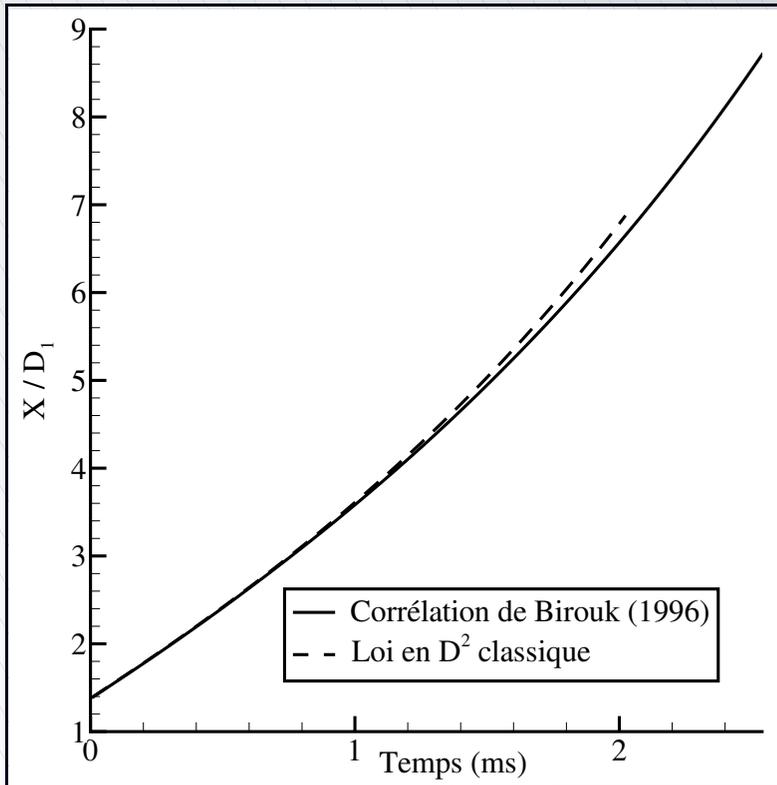
Taux de vaporisation



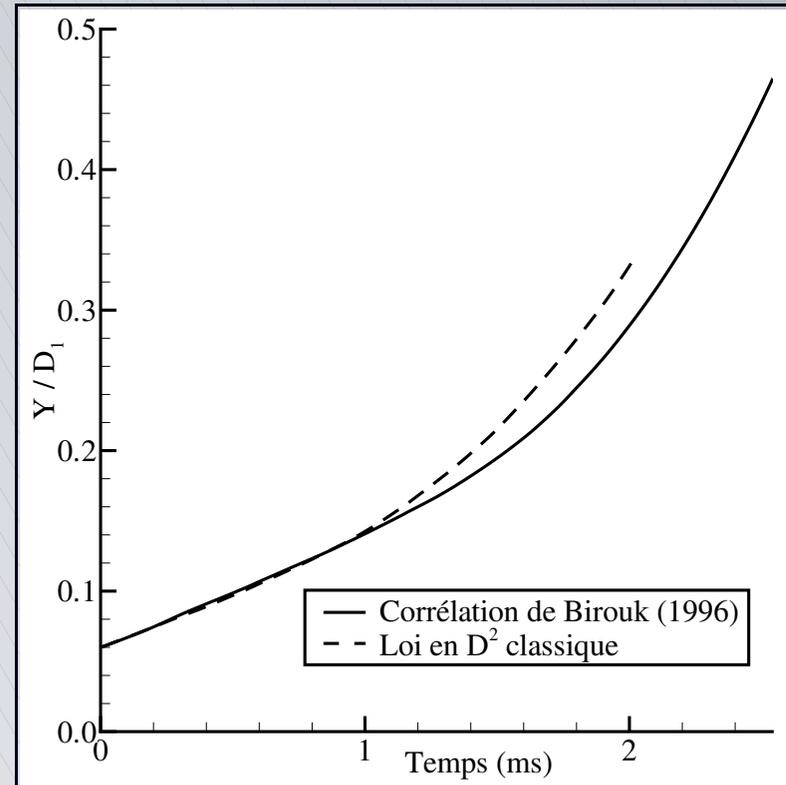
Groupement $\frac{K_{turb}}{K} - 1$

Simulations de la vaporisation turbulente

Localisation de la goutte



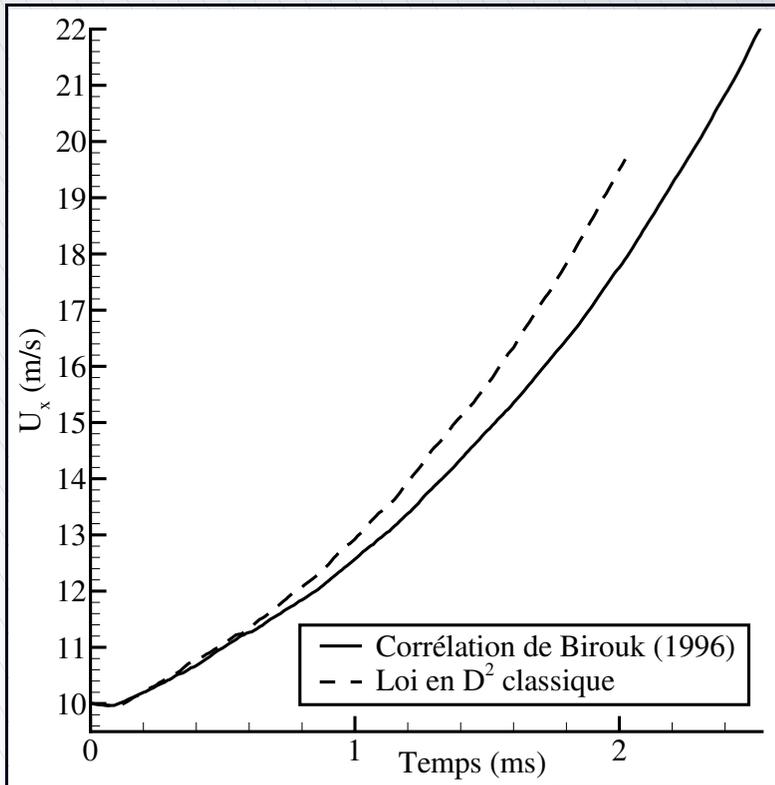
Position axiale



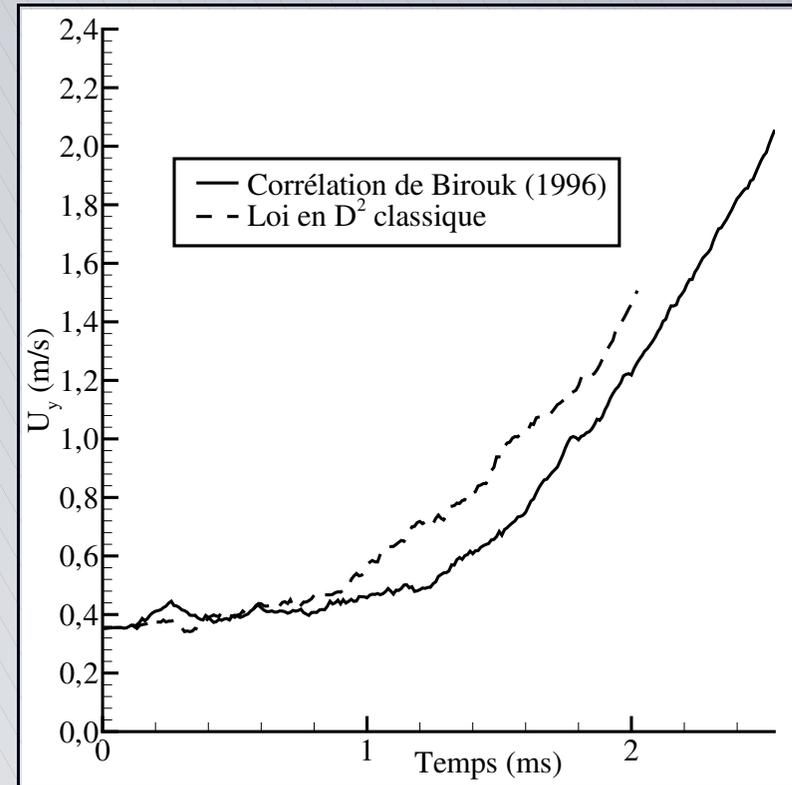
Position radiale

Simulations de la vaporisation turbulente

Vitesse de la goutte



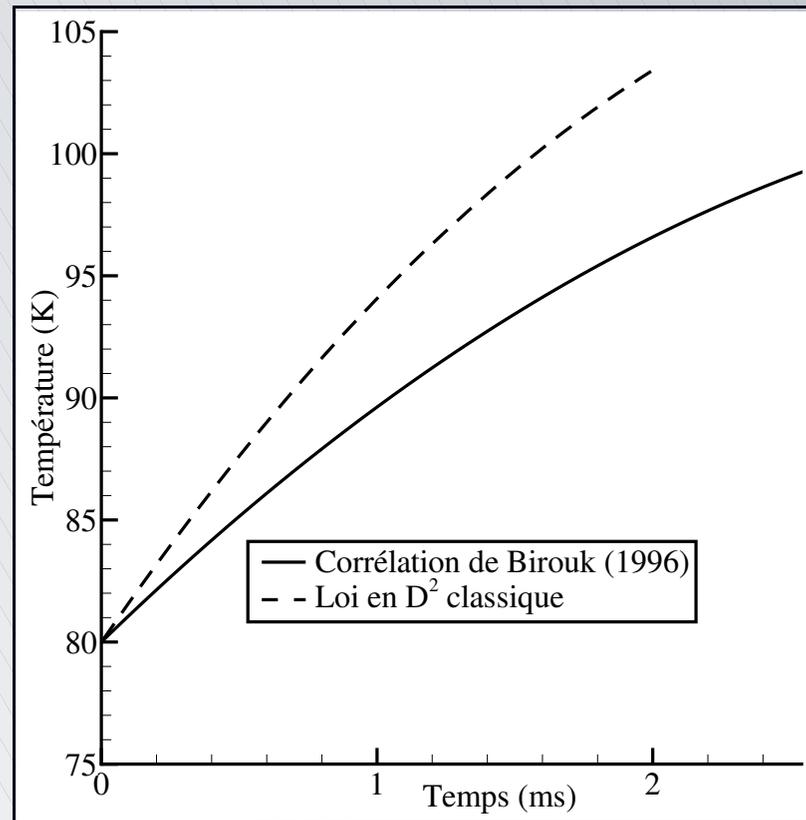
Vitesse axiale



Vitesse radiale

Simulations de la vaporisation turbulente

Température



Conclusions et perspectives

- ▣ Contexte de l'étude
- ▣ Objectifs de l'étude
- ▣ L'atomisation secondaire
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de l'atomisation secondaire*
 - ▷ *Validation du modèle de cassure secondaire*
 - ▷ *Simulations du banc d'essai MASCOTTE*
- ▣ La vaporisation turbulente
 - ▷ *Description du processus-Principaux paramètres*
 - ▷ *Modélisation de la vaporisation turbulente*
 - ▷ *Simulations de la vaporisation turbulente*
- ▣ Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Conclusions

- ❑ Modèle d'atomisation secondaire
 - ▶ Élaboration d'un modèle permettant de générer des gouttes secondaires de différentes dimensions
 - ▶ Forte augmentation du nombre des gouttes par réduction de leurs diamètres
 - ▶ Distributions de Rosin-Rammler loin de l'injection
 - ▶ Favorise la vaporisation et donc la combustion
 - ▶ Confinement des gouttes par le jet gazeux dans le cas de l'utilisation de l'atomisation secondaire
 - ▶ Reproduction plus correcte du profil de température dans le cas des calculs en combustion

Conclusions et perspectives

Conclusions

- ❑ Modèle d'atomisation secondaire
 - ▶ Reproduction de la structure de type flamme-jet de diffusion observée expérimentalement (Herding, 1997 ; Mayer et Tamura, 1996)
 - ▶ Flamme accrochée à la lèvre de l'injecteur (Juniper *et al.*, 2001)
 - ▶ Quasi indépendance des propriétés du brouillard vis-à-vis des distributions initiales injectées (*non présenté ici*)

Conclusions et perspectives

Conclusions

- Modèle d'atomisation secondaire
- Modèle de vaporisation turbulente
 - ▶ Reproduction de la plus forte vaporisation observée expérimentalement
 - ▶ Croissance plus lente de la température de la goutte en raison de la plus forte part de l'énergie consacrée à la vaporisation
 - ▶ Trajectoires des gouttes influencées par la vaporisation en raison des variations entraînées dans l'environnement proche ainsi que dans les propriétés des gouttes (variation différente de la température)

Conclusions et perspectives

Perspectives

- ❑ Utilisation d'un modèle de combustion à chimie détaillée
- ❑ Pour les gouttes, prise en compte des processus de coalescence, de déformation...
- ❑ Caractériser les effets de la turbulence sur la dispersion des gouttes dans le domaine de calcul
- ❑ Couplage des deux modèles dans le même code pour une simulation du dispositif MASCOTTE plus précise