

Dossier scientifique en vue de la création d'un GdR "Ruissellement et films en écoulements cisailés"

Christian Ruyer-Quil *

12 septembre 2009

Résumé

L'objet du présent document est la formation d'un Groupement de Recherche portant sur les thématiques du ruissellement, des films liquides s'écoulant par gravité et/ou cisailés par un écoulement gazeux et du transfert. Ces types d'écoulements sont rencontrés en génie des procédés et/ou génie chimique, dans l'industrie automobile, l'industrie aérospatiale et du transport aéronautique (ingestion d'eau dans les moteurs, présence de films liquides dans les chambres de combustion, dépôt d'alumine dans les propulseurs d'Ariane V, . . .), l'industrie du bâtiment et la sidérurgie et motivent une recherche importante tant fondamentale qu'appliquée. Partant de ce constat, les objectifs de ce projet sont de fédérer une communauté scientifique autour de la thématique des films liquides, et d'assurer l'implication des partenaires industriels. Ce projet propose de regrouper 23 équipes (14 issues des laboratoires rattachés à l'INST2I, 7 non rattachés dont 4 industriels et 2 venues de Belgique) avec des sensibilités allant de la physico-chimie des interfaces au génie chimique en passant par la mécanique, l'analyse numérique, l'hydrodynamique physique et les mathématiques appliquées. Les approches mises en œuvre couvriront tous les aspects : expérimentation, modélisation et approches numériques. Il est proposé d'articuler le travail du GdR autour de problématiques physiques au sens large (formation d'un film, écoulements gravitaires, cisailé, arrachage, mouillage et transferts) et de "configurations" c'est à dire de problèmes physiques (géométrie, paramètres etc.) définis en commun.

Table des matières

1	Introduction	3
2	Verrous technologiques et motivations	3
3	Thématiques et problématiques physiques	4
4	Approches	5

*laboratoire FAST — UMR CNRS 7608, Universités Paris VI et Paris XI, Campus universitaire, 91405 Orsay (France), E-mail : ruyer@fast.u-psud.fr

5	Laboratoires impliqués	6
6	Configurations	11
6.1	Formation d'un film liquide	11
6.1.1	Impact d'un spray (Tab. 5)	11
6.1.2	Impact de jets (Tab. 6)	12
6.2	Écoulements gravitaires	12
6.2.1	Plan incliné (Tab. 7)	12
6.2.2	Paroi périodique (Tab 8)	14
6.3	Écoulements cisailés	14
6.3.1	Film à l'intérieur d'un tube (Tab. 9)	14
6.3.2	Film liquide dans un canal avec écoulement de gaz (Tab. 10)	17
6.3.3	Film cisailé sur un plan horizontal (Tab. 11)	17
6.3.4	Film avec décrochement (Tab. 12)	17
7	Objectifs, attentes et retombées	20
8	Annexe : Présentation de chaque équipe	21
8.1	CORIA	21
8.2	FAST	22
8.3	IEMN	23
8.4	IJLRA	24
8.5	IMT	25
8.6	IMFT	26
8.7	IRPHE	27
8.8	LadHyX	28
8.9	LEGI	28
8.10	LEMTA	30
8.11	LET	31
8.12	LSGC	32
8.13	MSC	33
8.14	TREFLE	34
8.15	Air Liquide	35
8.16	ArcelorMittal	36
8.17	PSA Peugeot Citroën	37
8.18	Renault	38
8.19	CSTB	39
8.20	LME	40
8.21	ONERA	41
8.22	IVK	42
8.23	ULB	43

1 Introduction

Au sein de l’Institut ST2I, de nombreuses équipes travaillent sur la thématique des films liquides. Certains travaux répondent à un besoin industriel fort en génie des procédés et/ou génie chimique (optimisation des contacteurs de réacteurs chimique, procédés de dessalement d’eau de mer ou de liquéfaction d’un gaz, procédés de revêtement par “essorage”) mais aussi dans le domaine du transport automobile (ruissellement de films d’eau par temps de pluie sur un pare-brise), de l’industrie du verre, la sidérurgie (procédés de laminage à chaud) ou encore de l’industrie du bâtiment (étanchéité des éléments de couverture). D’autres travaux encore sur les films liquides sont motivés par la recherche fondamentale dans le domaine de l’hydrodynamique, de la physique non-linéaire et de la physico-chimie des interfaces. Citons deux exemples. Le premier concerne les propriétés du mouillage dynamique (problème du déplacement d’une ligne triple). Le second exemple est la dynamique d’un film s’écoulant par gravité, structurée autour d’ondes de surface localisées et en interaction. Ce régime d’écoulement constitue en effet un cas de référence pour la théorie du chaos spatio-temporel et la transition d’un régime régulier (laminaire) vers un régime irrégulier (turbulent au sens faible du terme).

Le simple constat d’une activité de recherche importante portant sur la thématique des écoulements diphasiques de films liquides en présence ou non d’un cisaillement par un gaz conduit à l’idée de fédérer cet effort de recherche. Or, cette fédération répond à la demande de trois industriels (PSA, Renault, Air Liquide) rejoints par ArcelorMittal. La constitution d’un GdR “Ruissellement et films en écoulements cisailés” est un outil qui permettrait de répondre à deux objectifs formulés par le Conseil Scientifique du département [1, p. 18] :

- (i) permettre la «constitution de communautés scientifiques, plus ou moins portées vers les applications, l’expérimentation etc. c’est-à-dire partageant une culture propre.»
- (ii) permettre d’«impliquer plus fortement les industriels et ainsi permettre une plus grande porosité des recherches vers le milieu économique.»

C’est avec ces deux objectifs en mémoire qu’a été rédigé ce dossier scientifique. Les contributions des partenaires académiques, industriels et européens (deux laboratoires hors de France ayant manifesté leur intérêt pour ce GdR) ont donc été mises en perspective de manière à favoriser les interactions, échanges et/ou collaborations entre laboratoires, les implications des industriels.

2 Verrous technologiques et motivations

La création du présent GdR est motivée par un certain nombre de questions fondamentales et appliquées rencontrées dans les applications industrielles. Les réponses à ces questions conditionnent le développement et l’amélioration de procédés industriels et constituent des “verrous technologiques”.

Parmi les questions ouvertes par les industriels, citons :

- Quels sont les mécanismes prépondérants de l’entraînement d’un film liquide sur une paroi par un écoulement turbulent ? (effet du cisaillement par un écoulement turbulent, effet de la modification de la surface du film sur l’entraînement, comportement du film

- liquide en fonction du taux de cisaillement) (automobile, génie chimique)
- Quel est l’impact de l’état de surface et de la mouillabilité sur cet entraînement (angle de contact, apparition de rivulets) ?
 - Sous quelles conditions des gouttes peuvent-elles être arrachées à la surface du film et/ou à une singularité géométrique. Est-il possible de définir un critère d’arrachement universel ? (en aéronautique, phénomène important à prendre en compte pour la quantification des débits d’eau ingérés par les moteurs)
 - Quels sont les régimes d’interactions goutte-paroi ou goutte-film qui doivent être modélisés pour simuler correctement la formation d’un film liquide par impact de spray ? (exemple en propulsion aéronautique, formation de films liquides de carburant sur les parois des chambres de combustion)
 - Quels sont les phénomènes physiques indispensables à modéliser pour la simulation correcte de l’entraînement d’un film liquide sur un véhicule ? Enjeux en termes de sécurité (visibilité), sûreté de fonctionnement et image de marque (automobile) ?
 - Quelles sont les méthodologies métrologiques de laboratoire déclinable dans un contexte industriel (automobile, génie chimique) ? Comment caractériser un écoulement de film liquide à l’échelle industrielle ?
 - Comment améliorer le transfert de masse et de chaleur entre un film liquide et un gaz turbulent tout en évitant l’engorgement des échangeurs (génie chimique, [2]) ? Ce problème est d’actualité : l’absorption physique ou chimique d’un gaz dans un film liquide en ruissellement sert par exemple au captage de CO₂ par une solution amine pour limiter les rejets de gaz à effet de serre.
 - Comment la présence d’un film liquide à la paroi modifie la physique des couches limites et les transferts thermiques avec la paroi ? (exemple en aéronautique, formation de film liquide dans les tuyères)
 - Comment définir et trouver les actionneurs (jets, spray) assurant la flexibilité du refroidissement d’une surface solide en fonction de conditions imposées (vitesse de défilement du produit, température initiale. . .) (sidérurgie) ?
 - Comment assurer le refroidissement homogène dans la direction transverse à l’aide de films liquides créés par jets ou spray (sidérurgie) ?
 - Comment maintenir un refroidissement optimal à l’aide de jets ou spray tout en diminuant la quantité de liquide (eau) utilisée (sidérurgie) ?

3 Thématiques et problématiques physiques

Les questions ouvertes présentées au § 2 font intervenir des écoulements de films liquides par gravité, en présence de contre-écoulement ou de lignes triples (zones sèches), d’arrachage ou d’impacts de gouttelettes et des transferts (masse, chaleur). Ces écoulements s’inscrivent dans des thématiques diverses :

aspects physiques : écoulements à surface libre, mouillage, capillarité etc. écoulements diphasiques,

aspects dynamiques : instabilités hydrodynamiques, dynamique non-linéaire, turbulence etc.

Afin de faciliter les échanges et les interactions entre équipes spécialisées sur telle ou telle thématique, il semble préférable d’axer le contenu scientifique du futur GdR non pas sur les thématiques recensées ci-dessus mais sur les problématiques physiques rencontrées à chaque étape de l’évolution d’un film liquide depuis sa formation jusqu’à sa disparition. En procédant de la sorte, on peut ainsi identifier les problématiques suivantes (où sont indiquées entre parenthèses les différentes thématiques abordées) :

Formation : Formation d’un film liquide sous l’effet de l’impact d’un jet ou du dépôt d’un spray (écoulements diphasiques, mouillage, capillarité).

Gravité : Entraînement gravitaire, influence de la géométrie (instabilités hydrodynamiques, turbulence, dynamique non-linéaire, écoulements à surface libre).

Cisaillement : Entraînement par cisaillement d’un contre écoulement laminaire ou turbulent, influence de la géométrie sur l’écoulement, par exemple forme des parois et distance entre les parois (écoulements diphasiques, instabilités hydrodynamiques, turbulence, dynamique non-linéaire).

Mouillage : Mouillage, démouillage, dynamique de lignes triples, ruissellement (écoulements à surface libre, mouillage, capillarité).

Arrachage : Arrachage et formation de gouttelettes à partir d’un film cisailé (écoulements diphasiques, instabilités hydrodynamiques, turbulence, mouillage, capillarité).

Transfert : Étude des transferts de masse et de chaleur pour lesquels le couplage entre évaporation et écoulement devient important (notamment en présence de déplacement de lignes triples).

Enfin, notons que la répartition par problématiques physiques est aussi un outil pour aider à définir un certains nombres de “configurations” (ou “cas-tests”), c’est à dire de problèmes physiques bien définis (géométrie, conditions initiales, aux limites, fluides utilisées etc.).

4 Approches

Trois types d’approches complémentaires sont envisagées et correspondent aux efforts et compétences des laboratoires impliqués dans ce projet (cf. § 8). Elles sont détaillées ci-dessous :

Expériences : L’observation des phénomènes physiques est évidemment prépondérante pour la compréhension et la description des mécanismes mis en jeu. Suivant la thématique/problématique abordée, différents moyens de mesure seront utilisés, pour caractériser les déformations de l’interface (caméras rapides, fluorescence laser LIF), de la vitesse dans le gaz (méthode “Particle Image Velocimetry” PIV, vélocimétrie laser “Laser Doppler Anemometry” LDA ou “Phase Doppler Particle Analyzer” PDPA) et dans le film liquide (μ PIV), ou encore le déplacement d’une ligne de contact (microscopie).

Simulations : La simulation numérique des écoulements à surface libre en présence d’arrachage, d’impact de jet est un domaine en plein essor. La simulation des écoulements permet un accès facilité à certaines grandeurs (par exemple le champ de vitesse) et permet un contrôle fin des conditions initiales et aux limites. Cette approche vient donc en complément de l’approche expérimentale. Plusieurs méthodes numériques sont

envisagées : méthode “Volume Of Fluid” VOF, méthode de suivi d’interface “Level Set Method”, “Ghost Fluid Method”, “Large Eddy Simulation” LES pour modéliser le comportement turbulent aux petites échelles dans la phase gazeuse etc.

Modélisations analytiques : Ici sont regroupées les différents outils d’analyse des instabilités : étude linéaire (fonctions de Green, stabilité absolue–convective des écoulements ouverts, analyse de Floquet des instabilités secondaires etc.) et non-linéaire (systèmes dynamiques, bifurcations, échelles multiples etc.), l’approche complémentaire utilisant la théorie de la lubrification (développement en ondes longues, modélisation du film sous forme d’équations moyennées suivant l’épaisseur du film etc.) permettant d’identifier les mécanismes des phénomènes étudiés en “simplifiant” le problème étudié.

5 Laboratoires impliqués

Quatre tables ci-dessous présentent succinctement les laboratoires affiliés au CNRS (tables 1 et 2), les laboratoires non affiliés et partenaires industriels (table 3) et les laboratoires européens participants (table 4) et résumant les moyens et les problématiques abordés par ces laboratoires dans le cadre de ce projet de GdR.

Une carte (figure 1) souligne la dispersion géographique et thématique des laboratoires impliqués dans ce projet de création de GdR. Cette carte met également en perspective la diversité de compétences et de domaines de recherche ici présents : mécanique des fluides (aspects expérimentaux et numériques), physique des liquides et des interfaces, génie chimique et des procédés, mathématiques pures et appliquées.

Les compétences des partenaires de ce projet (détaillées en annexe section 8) sont complémentaires et permettent de développer pour chacun des problèmes physiques détaillés en section 6 l’ensemble des approches (expérimentale, numérique ou analytique) détaillées en section 4.

Labo.	code CNRS	Responsable	Moyens	Problématiques
CORIA	UMR 6614	Alain Berlemont	1 DR, 1 prof., 1 doctorant, calculs au CRIHAN et IDRIS, code ARCHER	cisaillement, arrachage
FAST	UMR 7608	Christian Ruyer-Quil	3 EC et 1 DR, caméra IR, outils de visualisation, rhéomètres	gravité, cisaillement
IEMN	UMR 8520	Philippe Brunet	1 CR, 3 EC, caméra rapide, banc d'acquisition ultrarapide, salle blanche, bancs expérimentaux (gouttes, microcanaux, suspensions)	formation, mouillage
IJLRA	UMR 7190	Stéphane Zaleski	2 EC, 1 cluster de calcul, code GERRIS	cisaillement, arrachage
IMT	UMR 5219	Jean-Paul Vila	5 EC, 1 IR	gravité, cisaillement
IMFT	UMR 5502	Jacques Magnaudet	1 DR, 1 CR, 2 Pr., 1 IR, 1 AI, 1 IE et 1 technicien, code JADIM, 1 banc expérimental, 1 caméra rapide, 1 PIV	gravité, cisaillement, mouillage, arrachage, transferts
IRPHE	UMR 6594	Michel Provansal	2 EC, 2 chercheurs, 2 doctorants, 2 techniciens, caméra rapide, diagnostics optiques divers, PIV, outils de visualisations et 2 salles d'essais	cisaillement, arrachage

TAB. 1 – Laboratoires rattachés à l'INST2I (EC : enseignant-chercheurs)

Labo.	code CNRS	Responsable	Moyens	Problématiques
LadHyX	UMR 7646	Paul Manneville	1 DR, moyens de calcul de l'IDRIS	gravité
LEGI	UMR 5519	Alain Cartellier	6 chercheurs, bancs d'atomisation et bancs de mesures (angles de contact), PIV et PTV rapides, LIF, sondes optiques, microscopes et granulomètre à diffraction laser, serveur de calcul, code NGA	formation, cisaillement, mouillage, arrachage, transferts
LEMTA	UMR 7563	Fabrice Lemoine	1 CR et 4 EC, 1 caméra IR, 1 caméra rapide, PIV, 2 granulomètres, 1 dispositif de chauffage par induction	formation, gravité, transferts
LET	UMR 6608	Frédéric Plourde	1 CR et 1 post-doc, Calculateur parallèle	gravité, cisaillement
LSGC	UPR 6811	Huai Zhi Li	1 CR, 3 EC, 1 AI, 1 PIV 3D, 1 micro-PIV 2D, 1 LDA 2D, 1 caméra rapide, 1 tensiomètre dynamique, 1 rhéomètre	gravité, cisaillement, mouillage
MSC	UMR 7057	Laurent Limat	1DR, 1 CR, 1 EC, 3 doctorants, 1 IR, bancs d'expériences hydrodynamiques, systèmes d'acquisition et de traitement d'images, deux caméras rapides, microscopes (dont un AFM).	gravité, mouillage, arrachage
TREFLE	UMR 8508	Jean-Paul Caltagirone	2 EC, 1 supercalculateur scalaire parallèle, code AQUILON	cisaillement, arrachage, mouillage, transferts

TAB. 2 – Laboratoires rattachés à l'INST2I (suite)

Labo.	Responsable	Moyens	Problématiques
Air Liquide	Guillaume Mougin	3 chercheurs, 1 technicien, bancs d'essai cryogénie, 1 cluster de calcul, co-encadrement de 2 doctorants et 1 PostDoc	gravité, cisaillement, transferts
ArcelorMittal	Pascal Gardin	3 chercheurs, pilote expérimental de refroidissement des aciers, codes THETIS, JADIM	transferts
PSA	Sébastien Depardon	2 chercheurs, 1 doctorant, 1 technicien, PIV, caméra rapide, fil chaud, LEDAR	gravité, cisaillement, arrachage
Renault	Emmanuelle Andrès	2 chercheurs, 1 doctorant, 2 techniciens, PIV, caméra rapide, fil chaud, LDV	gravité, cisaillement, arrachage
CSTB	Jean-Paul Bouchet	2 chercheurs, 3 techniciens, souffleries, anémométries, granulométries, traitement images	gravité, cisaillement, arrachage
LME	Larbi Labraga	2 EC, 1 ingénieur, souffleries, anémométries, polarographie	formation, arrachage
ONERA	Pierre Berthoumieu Claire Laurent	2 chercheurs, 1 banc d'essai, caméras rapides, LIF, LDA, code CEDRE	formation, gravité, cisaillement

TAB. 3 – Laboratoires industriels ou non rattachés au CNRS

Labo.	Responsable	Moyens	Problématiques
IVK	Jean-Marie Buchlin	3 profs., 1 IR, lasers, caméra rapide, PIV, grappes de calculateurs, 1 ingénieur de laboratoire, 2 doctorants, 2 techniciens	cisaillement, arrachage
ULB	Pierre Colinet	4 chercheurs, 3 doctorants, interféromètres, tensiomètre, spin-coater, serveur de calcul	gravité, transferts

TAB. 4 – Laboratoires européens partenaires



FIG. 1 – Une communauté dispersée géographiquement et thématiquement : équipes industrielles (Air Liquide (AL), ArcelorMittal (AM) PSA, Renault), équipes non-CNRS (CSTB, LME, ONERA, IVK, ULB), équipes CNRS orientées mécanique des fluides (CORIA, FAST, IJLRA, IMFT, IRPHE, LadHyX, LEGI, LEMTA, LET, TREFLE), équipes CNRS orientées physique des liquides (IEMN, MSC), équipe CNRS orientée génie chimique (LSGC), équipe CNRS en mathématiques (IMT)

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
IEMN	expériences	P. Brunet	étude de l'impact de gouttes sur un plan, influence de l'hydrophobicité du matériau	salle blanche, banc acquisition ultra-rapide
LEGI	expériences	A. Cartellier	interaction de jets multiples et impacts des jets sur des parois, étude de la dynamique du film formé	bancs de mesure
ONERA	expériences, simulations	P. Berthoumieu, C. Laurent	formation de film liquide par impact de spray	LIF, code CEDRE

TAB. 5 – Formation – impact d'un spray : actions envisagées

6 Configurations

La définition d'un nombre limité de "configurations", c'est à dire de problèmes posés et définis en commun par l'ensemble des participants du GdR, est un moyen de rassembler l'activité, d'assurer l'interaction entre participants et aussi d'impliquer les industriels. Ce n'est bien sûr pas le seul et l'objet du GdR n'est pas la définition de ces configurations. Toutefois, il apparaît difficile, voire improbable, d'assurer une comparaison fine entre approches différentes sans accord sur des géométries, des ensembles de paramètres (propriétés du fluide choisi, débit, présence ou non d'un bruit en entrée etc.) et des grandeurs à mesurer (mesurer le débit ou l'épaisseur, en quel endroit, comparaison des propriétés statistiques ou des réponses à une sollicitation du système en entrée etc.).

Pour cette raison, il semble indispensable de proposer des ébauches de configurations dont la définition ultime est l'un des objectifs à court terme du GdR. Des ébauches de configurations sont donc présentées dans le reste de cette section et classées dans l'ordre des problématiques citées ci-dessus. Des tableaux (Tables 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) résument les actions proposées pour chaque configuration (les projets détaillés sont exposés pour chaque équipe participante en annexe § 8).

6.1 Formation d'un film liquide

6.1.1 Impact d'un spray (Tab. 5)

La problème de la formation d'un film liquide à l'aide d'impact de goutte ou de brouillard peut être abordé sous ses aspects dynamiques (instabilités, ondes capillaires) et physico-chimique (mouillabilité, déplacement de lignes triples etc.) Deux problèmes industriels font intervenir cette problématique : la formation de film d'eau sur les pare-brise de véhicules et la condensation des produits de combustion à la sortie d'un réacteur (aéronautique). La configuration envisagée est celle d'un film liquide formée par impact d'un spray sur une plan horizontal ou incliné.

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
AM	expériences, simulations	P. Gardin	impact d'un jet d'eau sur une paroi chauffée en mouvement : mécanismes d'instabilité du film liquide et influence sur la vaporisation du film et sur le refroidissement de la paroi solide	Pilote expérimental, thermographie infrarouge, codes THETIS et JADIM
MSC	expériences	L. Limat	formation de nappe liquide par impact d'un jet liquide sur un autre liquide	banc hydrodynamique, caméra rapide
TREFLE	expériences, simulations	J.-P. Caltagirone	impact d'un jet d'huile sur un obstacle plan ou hémisphérique avec transferts thermiques. Expériences prévues à partir de fin 2009	code Aquilon et banc expérimental

TAB. 6 – Formation – impact d'un jet : actions envisagées (AM : ArcelorMittal)

6.1.2 Impact de jets (Tab. 6)

Une configuration très proche est celle de la formation de films liquides par impact de jets sur une paroi ou non en mouvement. Cette géométrie est rencontrée dans le refroidissement d'aciers laminés à chaud.

6.2 Écoulements gravitaires

6.2.1 Plan incliné (Tab. 7)

Le problème le plus simple et aussi celui qui a suscité le plus de travaux est celui d'écoulement de film liquide par gravité le long d'un plan incliné (cf. schéma 2(a)). Pourtant, même pour ce problème, de nombreuses questions restent en suspens lorsque le fluide utilisé est relativement peu visqueux (eau) et que le débit est relativement important, c'est à dire lorsque le nombre de Reynolds est de l'ordre de la centaine et au-delà. En effet, l'écoulement est alors tridimensionnel et désordonné et les points de comparaison entre expériences et simulations numériques sont peu nombreux. Dans ces conditions, les modèles de films liquides sous forme d'équations moyennées sur l'épaisseur sont poussés dans leurs derniers retranchements tandis que la simulation numérique directe de la dynamique 3D du film devient onéreuse. Il est alors important de définir des points de mesure (par exemple l'épaisseur moyenne du film à une distance déterminée de l'entrée de l'écoulement, ou la statistique des fronts d'onde en un point déterminé du film) pour un jeu de paramètres réalisables expérimentalement et numériquement.

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
CSTB	expériences	J.-P. Bouchet, S. Aguinaga	écoulement d'un film liquide sur un plan incliné	mesures optiques par fluorescence
FAST	analytiques	C. Ruyer-Quil	développement d'un modèle de film capturant les changements de signes du cisaillement pariétal, simulations à l'aide du modèle	code AUTO
IMFT	simulations	J. Magnaudet	étude numérique directe	code JADIM
IMT	analytiques	J.-P. Vila	analyse asymptotique (théorie des systèmes hyperboliques) et développement de modèles type Saint-Venant	
LadHyX	analytiques	P. Manneville	développement de modèles de film (équations moyennées avec résidus pondérés) incluant les effets Marangoni en présence d'évaporation	IDRIS
LET	analytiques	F. Plourde	étude numérique à l'aide d'un modèle de film (équations moyennées avec résidus pondérés)	code interne
Renault	expériences	E. Andrès	écoulement d'un film d'eau (à nombre de Reynolds élevé)	atténuation lumineuse, caméra rapide
LEMETA	expériences	F. Lemoine	film liquide sur paroi chauffée avec évaporation : étude du transfert thermique à la paroi	caméra ultra rapide, fluorescence LIF, thermographie infrarouge
MSC	expériences, analyse	L. Limat	démouillage d'un film ruisselant sur une surface inclinée avec formation de zones sèches	caméra rapides, microscopes (AFM)
ULB	expériences, analyse	B. Scheid	écoulements de films liquides sur surfaces structurées et/ou chauffées. étude du déplacement d'une ligne triple.	caméra infrarouge, salle blanche, banc d'essai

TAB. 7 – Écoulements gravitaires – Plan incliné : actions envisagées

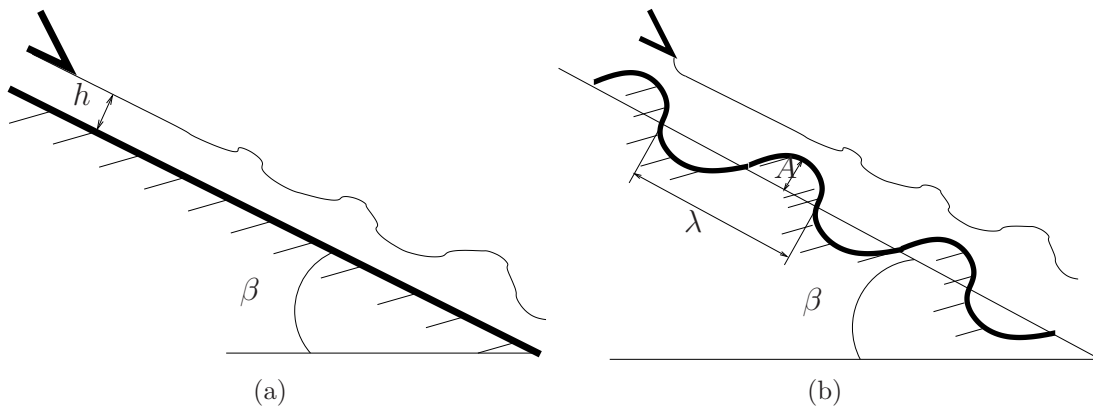


FIG. 2 – (a) Écoulement d’un film liquide sur un plan incliné; (b) écoulement d’un film sur une paroi périodique

6.2.2 Paroi périodique (Tab 8)

Une autre configuration intéressante du point de vue des applications (échangeurs en génie chimique) correspond à un film liquide s’écoulant sur un fond périodique. Cette configuration suscite un intérêt très actuel [3–5]. Là encore, il s’agit de définir un ensemble de géométries (forme de la paroi, périodicité λ , amplitude A) et de paramètres (fluide utilisé, débit et excitation en entrée etc.) pour lesquels la confrontation “expériences–modélisations–simulations numériques” soit réalisable.

6.3 Écoulements cisailés

La complexité des phénomènes en jeu lors de l’entraînement d’un film par un co-courant ou contre-courant (compétition instabilités interfaciales et de cisaillement, multiplicité des échelles etc.) ne peut pas se réduire à un jeu de quelques “configurations” même bien choisies. Si la multiplicité des études est bien venue, celle-ci justifie également la définition de quelques configurations suscitant l’accord le plus large. Quatre géométries sont proposées :

6.3.1 Film à l’intérieur d’un tube (Tab. 9)

L’écoulement de film sur les parois intérieures d’un tube (cf. figure 3(a)) correspond probablement à la géométrie la plus simple pour laquelle l’action d’un cisaillement par un gaz sur un film tombant peut être étudiée. En réalité, cette configuration a été beaucoup étudiée dans le cadre du problème de l’engorgement (“flooding”) [7,8]. Des questions très concrètes sont pourtant encore sans réponses : quelle est l’influence du co- ou contre-courant sur la dynamique des ondes de surface ? Quelle est le mécanisme de l’engorgement ?

Cette configuration pourra servir de point de référence pour la comparaison entre approches lorsque l’écoulement de gaz est laminaire ou turbulent. Notons que le cas plan (§ 6.2.1) s’obtient dans le cas limite de grand diamètre de tube par rapport à l’épaisseur du film.

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
LET	simulations, analyse	F. Plourde	étude de la dynamique d'ondes sur une paroi de grande extension à l'aide d'un modèle de film (équations moyennées avec résidus pondérés)	code développé en interne
AL	expériences, simulations	G. Mougin	écoulement de film liquide cisailés en situation cryogénique	banc d'essai de garnissages, codes commerciaux
LEGI	simulations	A. Cartellier	DNS avec prise en compte des transferts thermiques et changements de phase	code interne et code NGA
LSGC	expériences	H. Z. Li	influence des matériaux et de la géométrie avec ou non présence de ligne triple de contact	micro PIV, caméra rapide

TAB. 8 – Écoulements gravitaires – Paroi périodique : actions envisagées

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
IMFT	expériences	F. Charru	écoulement eau-air en tube. étude l'arrachage et de la redéposition de gouttelettes en écoulement liquide-gaz stratifié	caméra rapide, PIV

TAB. 9 – Écoulements cisailés – Tube : actions envisagées

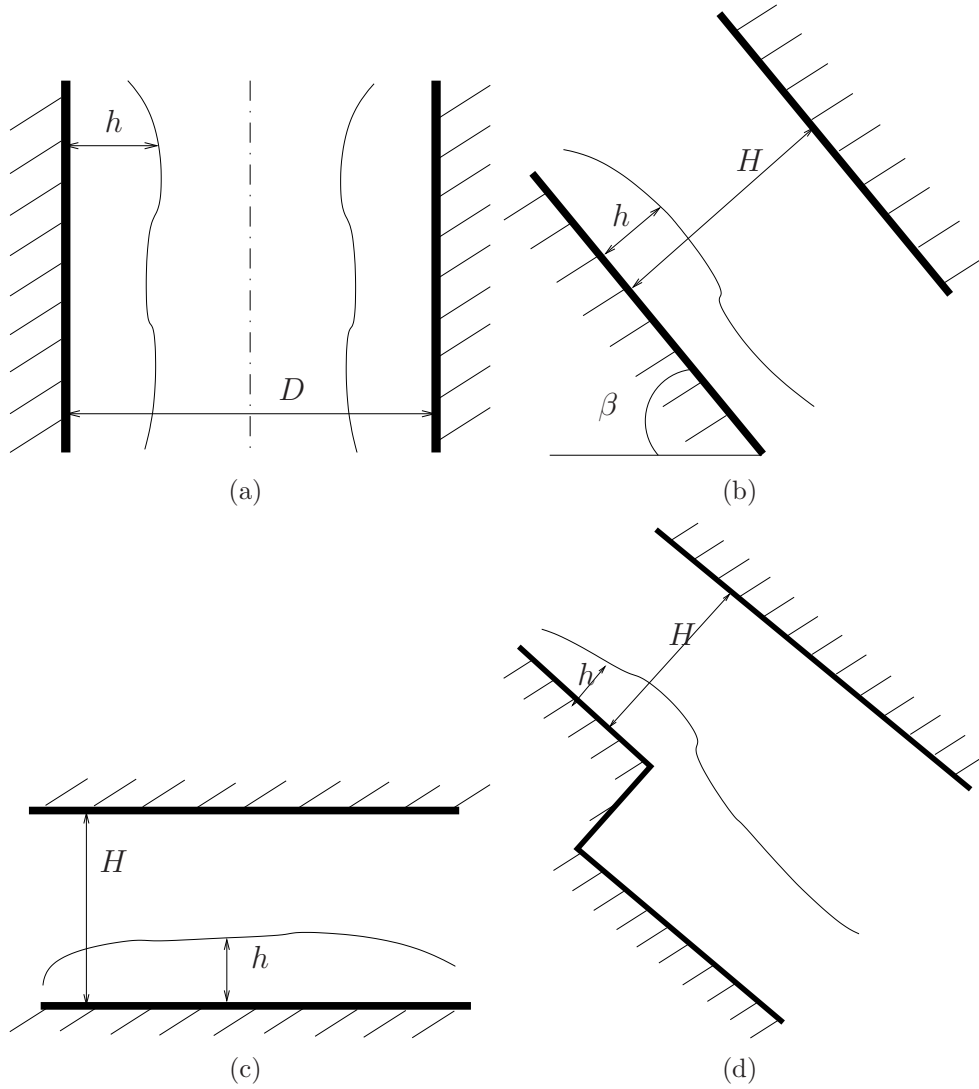


FIG. 3 – (a) Écoulement d'un film liquide à l'intérieur d'un tube en présence d'un co- ou contre-courant gazeux; (b) écoulement d'un film sur un plan incliné avec un co- ou contre-courant gazeux; (c) film liquide dans un canal horizontal en présence d'un co- ou contre-courant gazeux; (d) film liquide avec décrochement (singularité géométrique)

6.3.2 Film liquide dans un canal avec écoulement de gaz (Tab. 10)

Une configuration complémentaire de la précédente (§ 6.3.1) est celle correspondant à la compétition entre l'entraînement d'un film par gravité et par le cisaillement d'un écoulement gazeux sur un plan incliné dans un canal (cf. figure 3(b)). L'écoulement d'un film vertical a fait l'objet d'études visant à la compréhension du phénomène d'engorgement [11]. Comme pour la géométrie cylindrique, on s'attachera à définir des points de référence permettant une comparaison fine entre approches.

6.3.3 Film cisailé sur un plan horizontal (Tab. 11)

L'écoulement d'un film entraîné par un écoulement turbulent de gaz sur un plan horizontal est un problème typique de film liquide cisailé par un gaz qui a été étudié dans le cadre de l'atomisation (conception d'injecteurs) [9, 10] (cf. figure 3(c)). Cette configuration constitue un point de référence pour la comparaison des approches, notamment la comparaison entre simulations numériques directes et expériences.

6.3.4 Film avec décrochement (Tab. 12)

La présence d'une singularité géométrique peut modifier la dynamique du film et le couplage avec l'écoulement turbulent du gaz. Elle peut également provoquer un décrochement du film liquide de la paroi que l'on aimerait pouvoir prévoir (notamment dans la conception de pare-brise automobile).

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
CSTB	expériences	J.-P. Bouchet, S. Aguinaga	constitution de bases de données expérimentales (arrachement)	souffleries, anémométrie
IMT	analytiques	J.-P. Vila	analyse asymptotique (théorie des systèmes hyperboliques) et développement de modèles type Saint-Venant couplés à un modèle d'écoulements turbulents dans la phase gazeuse	
IMFT	simulations	J. Magnaudet	DNS à co- ou contre-courant avec modélisation de la turbulence aux petites échelles et grandes déformations d'interface	code JADIM
IVK	expériences, simulations	J.-M. Buchlin	caractérisation de la turbulence à l' interface liquide-gaz ; mise en œuvre de modèle traduisant le couplage entre écoulement turbulent du gaz et laminaire du liquide	PIV 2-phases, LEDAR, codes Fluent et AQUILON
LET	analytiques	F. Plourde	couplage modèle de film à un code CFD (phase gazeuse)	code interne
LME	expériences	L. Labraga	étude du phénomène d' "overspray" (arrachement et redéposition de gouttelettes)	LDA, vélocimétrie (PIV et ultrasonique), polarographie
ONERA	expériences, analyses, simulations	P. Berthoumieu, C. Laurent	dynamique d'entraînement, instabilités de films cisailés, développement de modèles de films cisailés	LDA, caméras rapides, code CEDRE
PSA	expériences, simulations	S. Depardon	constitution de bases de données expérimentales (arrachement et entraînement de films d'eau) ; modélisation sous code FLUENT	PIV, LEDAR, LDV, fil chaud, caméra rapide, FLUENT
Renault	expériences, simulations	E. Andrès	caractérisation de l'arrachement, coalescence et entraînement de gouttes. Corrélation essais/calculs pour validation de logiciels modélisation	PIV, LDV, fil chaud, caméra rapide

TAB. 10 – Écoulements cisailés – Canal : actions envisagées

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
IJLRA	simulations	J. Hoepffner	étude de la dynamique d'arrachage (systèmes tourbillonnaires et dynamique de "langues liquides")	code GERRIS
IRPHE	expériences	E. Villermaux	étude de l'assèchement d'une paroi mouillée par un vent (mécanismes de dé mouillage avec arrachage et formation de spray)	caméra rapide, PIV
LEGI	expériences	A. Cartellier	études de l'instabilité du film cisailé, dynamique d'entraînement et arrachage	LIF, PIV, sondes optiques et analyse de spray
TREFLE	simulations	J.-P. Caltagirone	simulation d'un écoulement turbulent (LES) d'un gaz en présence de film d'eau ou d'huile	code Aquilon

TAB. 11 – Écoulements cisailés – Plan horizontal : actions envisagées

Labo.	App.	Resp.	Action	Moyens
ONERA	expériences, simulations	P. Berthoumieu, C. Laurent	étude de la séparation du film liquide (pas dans l'immédiat)	à définir
PSA	expériences, simulations	S. Depardon	étude des conditions d'arrachage du film en présence d'un décrochement	PIV, LEDAR, LDV, fil chaud, caméra rapide

TAB. 12 – Écoulements cisailés – Décrochement : actions envisagées

7 Objectifs, attentes et retombées

Les objectifs de ce GdR sont :

- (i) faire progresser la science en créant une synergie sur la thématique des films liquides,
- (ii) assurer la constitution d'une communauté de chercheurs venant des laboratoires ST2I avec une sensibilité allant de la physique des liquides, de la mécanique au génie chimique et aux mathématiques appliquées,
- (iii) impliquer les partenaires industriels en assurant un transfert de connaissances du CNRS vers l'industrie.
- (iv) répondre aux questions ouvertes ("verrous technologiques") exposées au § 2.

Bien qu'il soit difficile de mesurer l'accomplissement de ces objectifs à la fin de ce GdR, on peut citer un certain nombre d'attentes. Le futur GdR sera un succès si :

- La compréhension des mécanismes physiques a progressé (rôle du mouillage, effet de la géométrie sur la dynamique du film, sur l'arrachage et sur les instabilités, effet du cisaillement par le gaz sur la dynamique du film etc.).
- Les techniques de mesure, les codes numériques et les outils analytiques ont progressé.
- L'échange d'informations, le travail en commun sont la règle et non l'exception.
- L'implication des industriels a été assurée en termes de d'application des travaux mais aussi en termes de renouvellement des thèmes de recherche (Notons qu'il y a une réelle volonté de la part des partenaires industriels de ce projet de s'appuyer sur le futur GdR pour monter des projets coopératifs de type ANR ou européens impliquant le plus grand nombre d'équipes du CNRS).

De manière concrète, on peut évaluer la réalisation de ces attentes par :

- le nombre et la qualité des publications issues des travaux du GdR,
- le nombre d'articles de revue écrits en commun et signés par le GdR,
- la synthèse des communications effectuées dans le cadre du GdR sous forme d'un CD ou d'un ouvrage,
- le nombre de collaborations entre laboratoires créées dans le cadre du GdR (projets ANR, par exemple),
- le nombre de "configurations" définies et étudiées dans le cadre du GdR,
- le nombre d'outils numériques ou expérimentaux développés dans le cadre du GdR et utilisés par les industriels partenaires.

8 Annexe : Présentation de chaque équipe

Dans cette section sont présentées les équipes et laboratoires participants à ce projet de GdR. Les projets de recherche détaillés ci-dessous ont fourni la matière à la rédaction du présent document.

Nota Bene : le contenu de cette annexe est déjà rasémblé et synthétisé dans les différents tableaux du présent document. Les projets de recherche détaillés ci-dessous sont rasémblés et mis en perspective dans les tableaux 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12.

8.1 CORIA

Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (UMR 6614)
Refs. [12–15]

Personnels impliqués

A. Berlemont DR2 CNRS, L. Danaila Pr, T. Ménard MdC, F. Thiesset Doctorant

Moyens

Les calculs sont effectués au CRIHAN (Centre de Ressources Informatiques de Haute Normandie) ou à l’IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique).

Ensemble de compétences

Les innovations apportées aux méthodes numériques dédiées à la simulation directe d’écoulements en présence d’interface (Level Set, Ghost Fluid, VOF), permettent aujourd’hui au CORIA de proposer des outils numériques d’investigation de première importance. D’un point de vue expérimental, les recherches actuelles sont menées dans un jet de gaz débouchant dans un milieu calme de viscosité beaucoup plus importante (rapport de 5 et plus). L’ensemble des techniques expérimentales mises en place permettent une description fine des processus physiques mises en jeu.

Projets

Le CORIA contribuera avec de doubles compétences, d’une part, une approche visant la description numérique des interfaces (Alain Berlemont); et d’autre part une prise en compte de la physique fine qui se développe près d’une interface (Luminita Danaila).

Simulation des interfaces Nous avons développé un code 3D ARCHER où la méthode Level Set est utilisée pour décrire finement l’interface, la méthode Ghost Fluid pour prendre en compte les sauts à l’interface, un solveur pour les équations de Navier Stokes incompressible, et un couplage avec la méthode VOF pour assurer la conservation en masse. Ces études se poursuivent actuellement par le développement d’une méthode de raffinement de maillage (AMR). Nous utiliserons donc ce nouvel outil afin d’étudier le

comportement de films liquides en présence de tourbillons dans l'écoulement gazeux ou liquide afin de comprendre la formation d'instabilités à la surface et le détachement de paquets liquides (ligaments, gouttes)

Écoulement en présence d'interface On considère ici un (seul) milieu monophasique (soit en milieu liquide, soit en milieu mono-gazeux), en présence d'une interface (solide, ou liquide). En particulier, les propriétés de l'écoulement turbulent (spectre d'énergie, type de tourbillons présents, type de cascade énergétique : directe ou inverse, etc.) sont à prendre en compte lors de l'étude de l'interaction entre deux milieux différents liquide-gaz. Le fort cisaillement des milieux est également à considérer. Les interactions de deux milieux de propriétés (viscosités) très différentes sont en train d'être étudiées analytiquement et expérimentalement (par fil chaud, ADL, diffusion Rayleigh) au Coria (thèse B. Talbot) et leur extension à des milieux liquide/gaz sont à considérer prochainement.

8.2 FAST

Fluides Automatique et Systèmes Thermiques (UMR 7608)

Refs. [20–25]

Personnels impliqués

Christian Ruyer-Quil MdC. Possible implication de l'équipe "Écoulements et Transferts" (Frédéric Doumenc, MdC, Béatrice Guerrier, D.R., Éric Sultan, MdC)

Moyens

Accès au CCRE : centre de calcul de l'UPMC (RS/6000 Système Regatta).

code AUTO07p de continuation (logiciel libre).

Équipe "Écoulements et Transferts" : caméra infrarouge, moyens de mesure optique, rhéomètres.

Ensemble de compétences

Une approche de la modélisation des films liquides tombants à été développée en combinant développement du champ de vitesse sur un ensemble de fonctions tests et développement en ondes longues (approche aux résidus pondérés) [20]. Cette approche s'étend à différentes géométries (écoulement le long d'un cylindre [21]), et différentes rhéologies (rhéologie en loi de puissance par exemple).

D'autre part l'équipe Écoulements et Transferts développe une approche expérimentale et numérique sur l'étude des instabilités Rayleigh-Bénard-Marangoni en régime transitoire [24], ainsi que sur la formation de dépôt par évaporation et démouillage contrôlés pour des fluides complexes (solutions polymères ou suspensions colloïdales).

Projet

Un des problèmes actuels de la modélisation des films liquides est la détection de zones de recirculation dans la région capillaire précédant les fronts solitaires. Des résultats

récents [16] suggèrent que ces zones de recirculation ont une influence importante sur le taux de cisaillement à la paroi et donc sur les transferts de masse ou de chaleur à l'interface liquide-solide. Les modèles actuels ne représentent pas avec suffisamment de précision le champ de vitesse proche paroi, une difficulté à résoudre étant qu'une meilleure précision s'accompagne généralement d'une réduction de la gamme de paramètres pour lesquels les résultats du modèle sont valides (c'est à dire pour lesquels les simulations en temps et en espace ne divergent pas). Deux pistes seront explorées pour résoudre cette difficulté : (i) amélioration du choix des fonctions tests afin de limiter le degré des non-linéarités introduites dans les équations, (ii) écriture d'une équation bilan moyennée décrivant l'évolution du taux de cisaillement à la paroi.

8.3 IEMN

Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (UMR 8520)
Refs. [17–19]

Personnels impliqués

Philippe Brunet, CR, Alain Merlen, Pr, Farzam Zouesthiagh. MdC

Moyens

- caméra rapide Photron SA3,
- banc d'acquisition ultrarapide (plate-forme Métrologie Optique de Lille) pour visualisation d'effets compressibles dans les écoulements,
- salle blanche de l'IEMN : microfabrication, microgravures, croissance chimique (nanofils,...), fonctionnalisation et traitement de surfaces, réalisation de microactionneurs (MEMS, transducteurs SAW,...),
- bancs expérimentaux : impacts de gouttes, visualisation d'écoulements de suspensions de particules en microcanaux sous microscope, visualisation de déplacements de gouttes par ondes de surfaces ultrasonores.

Ensemble de compétences

Par son implantation récente à l'IEMN, l'équipe FILMS possède à la fois la culture dynamique des fluides/instabilités interfaciales, et bénéficie de moyens technologiques d'une salle blanche avec peu d'équivalent sur le plan national. Les axes de recherche du groupe visent ainsi à mettre les micro-systèmes et la fonctionnalisation de surfaces à l'échelle nanométrique, au service de la fluidique dans des écoulements dont les échelles varient de la dizaine de microns à quelques centimètres.

Projet

La participation de l'équipe Fluides Interfaces Liquides et Micro Systèmes (FILMS) au GdR se justifie à la fois par ses activités autour de la micromanipulation de gouttes par ondes ultrasonores de surfaces (SAW), ainsi que par ses activités autour des instabilités

interfaciales produites par l'impact de gouttes. Les transducteurs ultrasonores SAW disponibles dans l'équipe permettent à la fois d'induire un écoulement complexe dans une goutte propice au mélange, mais aussi peuvent induire le déplacement de cette goutte voire son atomisation. Alors que cette technique est déjà utilisée par plusieurs groupes dans le monde, il reste à comprendre les ingrédients physiques à l'origine de ces phénomènes (couplant vraisemblablement l'acoustique non-linéaire et la dynamique de la surface libre et de la ligne de contact de la goutte). L'activité 'impacts de gouttes' s'est focalisée sur les surfaces superhydrophobes, et sur l'empalement de liquide sur des surfaces texturées (tapis de nanofils, grilles, surfaces multi-échelles micropiliers+nanofils). Ces problèmes sont à la fois adressés des points de vues expérimental et théorique.

8.4 IJLRA

Institut Jean-Le-Rond d'Alembert (UMR 7190)
Refs. [26–28]

Personnels impliqués

Stéphane Zaleski Prof, Jérôme Hoepffner MdC

Moyens

Un cluster à 128 coeurs opteron 265, et serveur de stockage 8.4 TeraOctets

Ensemble de compétences

Le code de simulation numérique que nous utilisons pour la simulation des écoulements diphasiques, "Gerris", à été développé initialement au sein de l'institut. Il constitue un outil central de nos investigations.

Projet

Nous cherchons à cartographier l'anatomie des ondes et vagues dans les écoulements diphasiques cisailés, avec un attrait marqué pour les grandes déformations. Les instabilités de l'interface en mouvement donnent naissance à des langues liquides arrachées qui sont advectées par le flux gazeux. Ces langues sont accompagnées dans leur évolution par un système volatile de tourbillons en amont et en aval qui vont interagir et influencer sur la masse liquide en accélération. Pour ceci nous mettons en œuvre les outils de l'expérimentation numérique : variation des paramètres de densité, viscosité, moment cinétique, tension de surface, recherche de solution auto-entretenu, recherche des bifurcations et solutions périodiques, transition vers le régime chaotique. Nous considérerons plus particulièrement le cas de langues liquides sur des films minces, cas limite pour lequel le liquide disponible à l'arrachement est en faible quantité et soumis aux effets de la viscosité. Dans ce contexte, nous nous attendons à ce que système tourbillonnaire soit prépondérant dans la dynamique.

8.5 IMT

Institut de Mathématiques de Toulouse (UMR 5219)

Personnels impliqués

F Chazel (MdC INSA recruté 09/ 2009), K. Domelevo (MdC UPS, HdR), J Monnier (Pr INSA) Un IR CNRS (recrute au 12/2009), J.-P. Vila (Pr INSA) à rajouter : P. Noble (Mdc Lyon I) en collaboration directe avec J.-P. Vila

Moyens

Une ANR Jeune Chercheur portée par P. Noble débutera en septembre 2009 (SWEFCF : "Shallow Water Equations for Complex Fluids") et porte sur les aspects dérivation et justification mathématique et numérique des modèles de Saint Venant. Une ANR (ADAGE) dont le porteur est J. Monnier a été acceptée porte sur les problématiques liées à la glaciologie. Un Ingénieur Recherche rejoindra l'IMT dont l'une des missions sera de développer des codes de type Navier Stokes à surface libre et de valider numériquement les modèles obtenus.

Ensemble de compétences

Jean-Paul Vila développe à l'IMT des approches rigoureuses et originales des écoulements à surface libre dans le cadre de la théorie des équations hyperboliques.

Projet

Dans le cadre du "GdR ruissellement", nous proposons d'aborder la thématique "instabilité d'un film liquide cisailé" au moyen de modèles d'équations aux dérivées partielles de type Saint Venant. Il est en effet bien connu que pour décrire les instabilités de surface d'un film fluide, les équations de lubrification de type Burgers ou Benney sont insuffisantes. Nous analyserons deux types de situations : Écoulement laminaire de fluides minces. Nous étudierons d'abord l'influence de la topographie sur l'écoulement d'un fluide entraîné par un gaz ou simplement soumis à la gravité en dérivant des modèles de type Saint Venant à partir des équations de Navier-Stokes à surface libre par une analyse asymptotique. On étudiera mathématiquement les modèles proposés : caractère bien posé du problème de Cauchy, existence globale et stabilité asymptotique, transition vers l'instabilité via l'existence d'ondes non linéaires ("roll waves"). Les techniques utilisées sont celle issues de la théorie des systèmes hyperboliques. On étendra alors cette analyse au cas d'un écoulement diphasique liquide/gaz en modélisant cette situation par la superposition de deux fluides : un film fluide et un gaz dans un régime turbulent. Le point de départ de cette étude est la thèse de Marc Boutounet [76] qui a déjà étudié le cas de deux fluides en régime laminaire. Nous souhaitons valider mathématiquement ces modèles en justifiant rigoureusement les asymptotiques menées et dans les cas les plus complexes en comparant numériquement les modèles de Saint Venant avec les modèles complets de Navier-Stokes. Cette approche est en plein développement dans le domaine de l'océanographie où les différentes asymptotiques dans les équations d'Euler ont été justifiées (entre autre par D. Lannes dans le

cas monocouche et J.-C. Saut dans le cas multicouche) alors qu'il y a encore très peu de résultats pour ce type d'asymptotique dans les équations de Navier-Stokes.

8.6 IMFT

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (UMR 5502)

Refs. [29–33]

Personnels impliqués

Projet numérique : D. Legendre, Pr., J. Magnaudet, DR, A. Pedrono, IE

Projet expérimental : F. Charru Pr., P. Ern CR, S. Cazin IR, G. Ehses AI et J.-P. Escafit (technicien)

Moyens

Projet numérique : Le moyen d'investigation privilégié sera le code JADIM qui permet de simuler les écoulements diphasiques incompressibles tridimensionnels avec tension de surface, soit à partir d'une approche de type Volume Of Fluid, soit par suivi lagrangien de l'interface. Un couplage avec une modélisation de la turbulence de petite échelle par modèle dynamique est en cours.

Projet expérimental : L'équipe dispose d'une installation d'écoulement gaz-liquide de 10 mètres de longueur, permettant d'atteindre des vitesses 30 m/s pour le gaz et de 3 m/s pour le liquide, de moyens d'imagerie rapide (jusqu'à 6000 fps avec une durée d'exposition inférieure à la microseconde), et de vélocimétrie par imagerie de particule (PIV) rapide.

Ensemble de compétences

L'IMFT dispose d'un fort potentiel humain autour de la thématique des écoulements diphasiques gaz/liquide et liquide/liquide (une douzaine de chercheurs permanents) couvrant l'ensemble des approches méthodologiques : théorie, expérience, simulation. Des approches originales ont été développées depuis près de vingt ans pour la simulation numérique et l'étude expérimentale des écoulements diphasiques. L'équipe a par ailleurs une bonne culture sur les instabilités d'interface et la turbulence d'interface et de paroi.

Projet

La contribution numérique de l'IMFT visera à bâtir une approche fiable et prédictive de l'évolution de films liquide cisailés (à co- ou contre-courant) par un gaz, généralement en présence de turbulence, notamment dans le gaz. Les transferts de masse et de chaleur à l'interface, avec ou sans réaction chimique, seront également considérés. Cette approche, déjà engagée dans le cadre de quatre thèses, s'appuiera sur les développements récents réalisés dans le code JADIM de l'IMFT. L'objectif visé est d'obtenir des simulations réalistes dans des situations de grande déformation de l'interface, voire d'arrachage de gouttes et de démouillage partiel de la paroi. On se limitera à des géométries simples

(canal plan, tube cylindrique...) afin de privilégier la compréhension des mécanismes physiques. Techniquement, les points durs sur lesquels des avancées nous paraissent devoir être réalisées concernent en particulier quatre points : (i) la modélisation de la turbulence dans les régions diphasiques de l'écoulement (notamment le couplage turbulence de petite échelle/déformation), (ii) la modélisation de l'angle de contact dynamique, (iii) le transport de quantités concentrées sur l'interface (tensioactifs, espèces réactives) et (iv) l'amélioration des techniques numériques de suivi d'interface.

En parallèle aux activités numériques, une étude expérimentale sera menée sur les phénomènes d'arrachement et de redéposition de gouttelettes en écoulement gaz-liquide stratifié. L'objectif est d'approfondir notre connaissance de ces phénomènes, afin d'aboutir à une modélisation pertinente capable d'estimer en particulier leur impact sur les bilans de quantité de mouvement du liquide et du gaz. Cette thématique a été initiée à l'IMFT il y a trois ans, dans le cadre d'une thèse de doctorat menée en collaboration avec l'entreprise TOTAL. Cette thèse a donné lieu à la mise au point d'un outil expérimental d'envergure, en ce qui concerne aussi bien le montage expérimental (un écoulement eau-air en tube) que les techniques de mesure (imagerie haute cadence) et le traitement des données (e.g., la détection et le suivi des gouttelettes). L'analyse portera sur l'identification des échelles caractéristiques et des mécanismes pertinents pouvant permettre de prédire, à partir des conditions expérimentales (vitesses des fluides, propriétés physiques du gaz et du liquide...), les propriétés des distributions statistiques observées pour la taille et la vitesse des gouttelettes.

8.7 IRPHE

Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre (UMR 6594)

Refs. [34-38]

Personnels impliqués

2 enseignants-chercheurs (Villermaux, Vandenberghe), 2 chercheurs (Branger, Le Bars), doctorants 2, techniciens 2. Possible implication d'autres composantes du laboratoire : équipes "structure-océan-atmosphère" (H.Branger), "écoulements tournants" (Le Bars et Le Gal) et "aérodynamique" (T.Leweke).

Moyens

Caméra rapide, diagnostics optiques divers, PIV, outils de visualisations et 2 salles d'essais

Ensemble de compétences

Les précédents travaux de E.Villermaux sur la déstabilisation des interfaces gaz-liquide cisailées ont traité du cas des jets, des nappes et des films, incluant la description des premières instabilités, de la formation de ligaments, jusqu'à l'arrachage et la pulvérisation en gouttes. On dispose en particulier maintenant d'une représentation complète de la distribution des tailles de gouttes dans plusieurs situations différentes.

Projet

Assèchement d'une surface solide mouillée par un vent.

Le cas d'un film liquide reposant sur une surface solide et balayé par un vent est, du point de vue des instabilités de base, plus simple que celui d'un film aux interfaces libres, pris en 'sandwich' dans un co-courant gazeux. Cependant, cette configuration pose le problème original de l'assèchement de la surface solide, et des mécanismes de démoillage du liquide assisté par le vent. Combien de temps faut-il pour entraîner une couche de liquide d'épaisseur donnée ? A quoi ressemble le spray résultant ? Quelle est la taille et la morphologie des régions asséchées ? C'est sur ces aspects que nous souhaiterions apporter une contribution dans le cadre de ce GdR.

8.8 LadHyX

Laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique (UMR 7646)

Refs. [39, 40]

Personnels impliqués

Paul Manneville DR

Moyens

Moyens de Calcul locaux et IDRIS

Projet

Développement de modèles visant à abaisser la dimensionalité des problèmes d'écoulement de films dans une approximation de lubrification traitant la surface libre du film à part entière, notamment en présence d'effet Marangoni, et la dynamique en volume du fluide par des approximations contrôlées qui prennent pleinement en compte la compétition entre effets inertiels et effets visqueux dans la limite mathématiquement manipulable de variations lentes dans l'espace et dans le temps. Application de ces modèles à des situations intéressant les applications.

8.9 LEGI

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (UMR 5519)

Refs. [41–49]

Personnels impliqués

Alain Cartellier DR, Jean-Paul Thibault CR, Christophe Corre Prof. Jean-Philippe Matas MdC, Benjamin Cross MdC, Guillaume Balarac MdC

Moyens

- banc d’atomisation assistée plane, banc d’atomisation assistée axisymétrique
- banc de mesure et de visualisation pour tuyère diphasique d’atomisation effervescente.
- banc de mesure d’angle de contact de liquide sur substrat solide, expérience d’électromouillage, suivi de l’étalement de microgouttelettes par mesure électrique capacitive.
- microscopie optique, granulomètre à diffraction laser, vélocimètre-granulomètre, interféromètre à phase Doppler (PDI, Artium), caméra rapide, PIV et PTV rapides, techniques LIF pour le suivi d’interfaces, sondes optiques pour écoulements multiphasiques et analyse de sprays
- Serveur de calcul du LEGI

Ensemble de compétences

Mouillage : mouillage, électromouillage, microfluidique, micro/nano fabrication [41–43]

Atomisation : atomisation effervescente en tuyère diphasique à jet de brouillard, atomisation sous pression, atomisation assistée [44–46]

Simulation numérique : DNS et simulations grandes échelles, DNS avec suivi d’interface, couplage simulations grandes échelles et suivi d’interface avec transfert de masse en cours de développement [47–49]

Projets

Instabilités d’un film liquide cisailé, dynamique de l’entraînement et d’arrachage d’un liquide par un gaz et influence de la géométrie sur la dynamique d’un film

Les études passées (Thèses de M. Hong, F. Ben Rayana) et en cours (M. Descamps post-Doc + 1 Master) au LEGI ont porté et portent sur l’arrachement de gouttes par un fort vent gazeux co-courant (gamme de vitesse gaz de qq m/s à 100m/s) sur un film liquide épais courant sur une paroi plane. Ces études ont combiné analyse expérimentale et théorique des instabilités interfaciales, modélisation phénoménologique pour prédire la taille moyenne des gouttes arrachées et leur flux, analyse du développement du brouillard (quantification de la coalescence/brisure, analyse de la dispersion, caractérisation du champ gaz...).

Des expériences conjointes ONERA-LEGI (Thèse de M. Lalo) ont montré qu’une faible épaisseur du film liquide modifie très sensiblement les caractéristiques des instabilités et la taille des gouttes formées. Nous proposons, dans le cadre de ce GdR, de poursuivre cette étude dans le cas de films minces (mm) et très minces (typ. 0,1 mm). Les questions à examiner concernent notamment les conditions critiques d’arrachement, la taille et le flux de gouttes ainsi formées ainsi que le développement du spray. Un simple aménagement de l’une de nos expériences permettrait aussi d’examiner la production de gouttes en un point de décrochement de la paroi. Par ailleurs, nous sommes prêts à contribuer au développement de simulations directes ou moyennées au travers de comparaisons fines exp/simul.

Interaction de jets de spray avec une paroi

Les expériences et simulations menées au LEGI (thèse de T. Bourrilhon), en collaboration avec la DGA et SIEMENS, ont montré que la détente directe en tuyère d'un écoulement diphasique pré-mélangé produit des jets de brouillards présentant une grande dynamique (vitesse d'éjection jusqu'à 150 m/s) et une granulométrie très fine (quelques 100 μm). Nous proposons de poursuivre cette étude en se concentrant sur le développement des jets de spray dense, l'interaction de jets multiples et l'impact des jets sur des parois. Ces aspects pourraient être développés dans le cadre du GDR en concentrant l'analyse sur l'interaction d'un brouillard haute vitesse avec une paroi : impact, formation de film et ré-arrachement. Les expériences pourront être réalisées en aménageant le banc de mesure et de visualisation pour tuyère diphasiques à jet de brouillard.

Simulations de systèmes turbulents à interfaces localisées

Le LEGI développe actuellement des outils de simulation de systèmes multiphasiques de topologie complexe avec interfaces déformables et prise en compte de transferts thermiques et de changement de phase. Ces outils doivent permettre au Laboratoire de mettre en place une stratégie plus systématique de confrontation calcul/expérience et de disposer d'un support de test pour de nouvelles idées de modélisation. L'outil développé s'appuie sur le code NGA initialement développé au Center for Turbulence Research (Stanford). Ses ingrédients essentiels sont une technique de type "level-set" pour le suivi d'interface, une approche de type "ghost fluid" pour l'écriture des conditions aux interfaces.

L'outil numérique disponible est d'ores et déjà appliqué à la simulation numérique diphasique d'un jet plan liquide entouré de jets plans gazeux plus rapides (atomisation assistée). Nous proposons, dans le cadre du GDR-Ruissellement, d'utiliser l'outil numérique en cours de développement — mais d'ores et déjà disponible avec une gamme importante de fonctionnalités d'intérêt pour les thématiques du GDR — à la fois en complément d'expériences qui pourraient être menées sur des géométries simples représentables par le code NGA et comme support de développement pour des choix de modélisation innovants. L'outil développé pourrait également être appliqué à la simulation exploratoire de configurations originales du type écoulement d'un film liquide sur une marche descendante afin d'exploiter le potentiel de modélisation qu'il offre. Des conditions de paroi chauffée pourront être simulées si besoin.

8.10 LEMTA

Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (CNRS UMR 7563)

Refs. [50–52]

Personnels impliqués

Fabrice Lemoine, Pr, Denis Maillet, Pr, Guillaume Castanet, CR, Alexandre Labergue, MdC, Michel Gradeck, MdC.

Moyens

1 caméra IR, 1 caméra rapide 750000 FPS, 1 chaîne LIF, 2 chaînes granulométriques (PDA et dispositif d'interférométrie en diffusion avant), 1 chaîne PIV 3D, 1 dispositif de chauffage par induction.

Ensemble de compétences

- Thermographie infrarouge
- Diagnostics optiques
- Transferts thermiques film/paroi

Projets

Notre objectif est d'étudier le film ruisselant formé par l'impact périodique de gouttelettes sur une surface chauffée à une température inférieure au point d'ébullition du liquide. Les transferts thermiques à la paroi seront analysés par un ensemble de techniques de mesure optiques complémentaires. La plaque sera maintenue en température par induction électromagnétique, ce qui a pour avantage de laisser libre les deux faces de la plaque pour la mise en œuvre des techniques optiques. Ces dernières sont notamment :

- 1) La thermographie infrarouge en face arrière, combinée à des modèles d'inversion pour restituer le flux de chaleur à la paroi.
- 2) La mesure de température du film en face avant par fluorescence induite par laser à deux couleurs.

Le flux thermique extrait à la paroi est corrélé à divers paramètres tels que :

- la taille des gouttes, leur vitesse
- la fréquence des impacts de goutte
- la température de la paroi
- l'épaisseur et la morphologie du film.

Une mesure de l'épaisseur du film fondée sur la fluorescence induite par laser sera également développée. La morphologie du film et des gouttes en interaction avec la paroi sera observée par vidéo ultra-rapide.

Ces activités s'inscrivent dans le cadre d'un programme blanc de l'ANR intitulé "ID-HEAS" (Interaction of Droplets with HEATED Surfaces). Dans ce cadre, les données expérimentales doivent notamment servir à alimenter le solveur "film" développé par l'ONERA/DMAE.

8.11 LET

Laboratoire d'Études Thermiques (UMR 6608)

Refs. [53–55]

Personnels impliqués

Frédéric Plourde CR, 1 PostDoc

Moyens

Calculateur parallèle à disposition de l'équipe.

Le code de calcul développé au sein de l'équipe convection du LET permet de résoudre les équations de Navier Stokes en faiblement compressible avec comme objectif de traiter des écoulements turbulents au sein d'échangeurs. La prise en compte des écoulements

turbulents s'effectuent par calcul direct (DNS) ou bien par calcul LES. Le code est basé sur une discrétisation cartésienne et la prise en compte de surface complexe s'effectue par l'intermédiaire de frontière immergée. Des calculs sur des échangeurs industriels ont permis de souligner la très bonne prédiction des calculs vis - à - vis des résultats expérimentaux, avec une prédiction à 5% près des performances de l'échangeur.

Projets

L'équipe de convection du LET développe des travaux de recherche sur les transferts thermiques turbulents au sein d'échangeur de chaleur monophasique. La prédiction quantitative des transferts impose de prendre en compte finement la turbulence et une modélisation LES classique, dynamique et lagrangienne permet d'estimer les coefficients de transfert de chaleur et de masse (ces valeurs sont prédites à moins de 5%). Cependant la présence d'un film au sein d'échangeur diphasique modifie significativement ces coefficients. L'idée a donc constitué à modéliser le film pour le coupler aux calculs de la phase gaz. Le modèle de film basé sur les techniques de fonctions tests avec résidus pondérés est en cours de développement afin de prendre en compte des géométries complexes et nous envisageons de coupler ce modèle avec le code CFD dédié aux échangeurs.

8.12 LSGC

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique de Nancy (UPR 6811)
Refs. [56–58]

Personnels impliqués

Huai Zhi Li, Pr., Denis Funfschilling CR, Souhila Poncin MdC, Noël Midoux Pr., Patrick Carre AI

Moyens

Bancs expérimentaux : Différentes installations pour des écoulements polyphasiques à différentes échelles : de 50 μm à 1 m.

Outils de mesure : 1 PIV 3D, 1 micro-PIV 2D, 1 LDA 2D, 1 caméra rapide (10000 fps), 1 tensiomètre dynamique Tracker, 1 rhéomètre

Outils numériques : Fluent, Lattice Boltzmann

Ensemble de compétences

De formation en Génie des Procédés, notre équipe travaille dans le domaine des écoulements polyphasiques avec phénomènes interfaciaux. L'objectif de nos travaux est de combiner les approches expérimentale et numérique à différentes échelles afin de comprendre et modéliser les procédés industriels impliquant les systèmes dispersés tels que gaz-liquide, liquide-liquide et solide-liquide.

Projet

Nous avons travaillé sur l'écoulement d'un film liquide ruisselant le long d'une surface inclinée, à l'aide de μ -PIV et de caméra rapide, dans le cadre d'une colonne à garnissage pour l'absorption d'un gaz. Il est possible de poursuivre cette étude avec des surfaces de différents matériaux et géométries avec une considération pour la dynamique d'une ligne triple de contact. Nous avons aussi développé des travaux sur des écoulements diphasiques à l'échelle microscopique. Un écoulement co- ou contre-courant pourra se réaliser dans des microcanaux entre un liquide et un gaz sous différentes conditions opératoires : rapports de débit des deux phases, viscosité du liquide, taille variable des microcanaux, etc. Le profil de vitesse dans le film liquide ainsi que l'instabilité à l'interface pourront être déterminés par μ -PIV et caméra rapide, afin de valider une approche numérique telle que VOF.

8.13 MSC

Matière et Systèmes Complexes (UMR 7057)
Refs. [59–61]

Personnels impliqués

Laurent Limat, DR, Luc Lebon, CR, Adrian Daerr, MdC, Julien Sébilleau, doctorant, Guillaume Berteloot, doctorant, Mehdi Banaha, doctorant, Mathieu Receveur, IR, Chi-Tuong Pham (collaboration au LIMSI, MdC LIMSI)

Moyens

- différents bancs d'expérience hydrodynamique,
- systèmes d'acquisition et de traitement d'images,
- accès à deux caméras rapides, et à des microscopes (dont un AFM).

Ensemble de compétences

Le groupe est connu pour son activité hydrodynamique à surface libre, avec des compétences dans des domaines variés : instabilités, physique non-linéaire, dynamique du mouillage, singularités aux interfaces, physico-chimie, etc. . . Il a une double culture fondamentale (singularités aux interfaces, dynamique non linéaire) et appliquée (contrats avec différentes sociétés comme Saint-Gobain, Veolia. . .). Il combine aussi la construction d'expériences légères (visualisation, traitement d'image) avec la construction de modèles quand c'est possible (collaborations avec C.T. Pham au Limsi, H. Stone à Harvard, J. Snoeijer à Twente, J. Eggers à Bristol, F. Lequeux à l'ESPCI).

Projet

Nous nous intéressons, par des expériences et des constructions de modèles, à plusieurs situations mettant en jeu des écoulements en films, gouttes ou ruisselets liquides : démouillage d'un film ruisselant sur une surface inclinée avec formation de zones sèches stationnaires, conditions et dynamique du remouillage, écoulements en gouttes ou ruisselets

liquides avec ou sans méandrage, ressauts, nappes ou cloches liquides obtenues par impact d'un jet sur une cible, atomisation. . Plus complexe encore, nous regardons également les problèmes de dynamique de nappes flottantes obtenues par impact ou déversement d'un liquide sur un autre liquide en mouvement. Ces diverses situations posent des questions fondamentales (morphogenèse aux interfaces, instabilités, chocs, singularités), mais sont aussi rencontrées dans plusieurs collaborations industrielles. Par exemple, le démouillage de films en écoulement est important pour les échangeurs de chaleur à film et le dessalement de l'eau de mer, tandis que la dynamique de nappes flottantes a des applications dans la fabrication du verre ou dans plusieurs problèmes d'environnement. Dans un registre plus "physico-chimie", nous nous intéressons aussi au mouillage à la surface de gels et au dépôt contrôlé de suspensions colloïdales sur des substrats solides par évaporation et démouillage simultanés (applications aux traitements de surfaces et à la synthèse de cristaux photoniques).

8.14 TREFLE

Transferts Écoulements Fluides Énergétique (UMR 8508)
Refs. [62–64]

Personnels impliqués

Jean-Paul Caltagirone, Pr., Stéphane Vincent, MdC.

Moyens

un supercalculateur parallèle : cluster Altix ICE 8200 de Silicon Graphics (SGI) d'une puissance théorique de 3 Tflops.

code Aquilon (maintenant appelé Thétis).

banc expérimental (fin 2009)

Ensemble de compétences

Les compétences du groupe MFN du laboratoire TREFLE sont centrées sur la modélisation physique des écoulements diphasiques et à leur simulation numérique. Les écoulements à surfaces libres incompressibles ou compressibles, turbulents, anisothermes sont appréhendés à partir de modèles spécifiques élaborées dans le cadre de collaborations universitaires ou industrielles. Des méthodologies existantes ou originales ont été développées pour l'occasion : des méthodes de suivi d'interfaces eulériennes ou lagrangiennes comme la méthode VOF-SM ou des méthodes de pénalisation au second ordre permettant de représenter des géométries complexes en mouvement avec des maillages eulériens structurés. Nous travaillons également au développement de modèles pour les effets capillaires.

Projet

Les modèles et méthodes mis en œuvre ont permis de simuler des écoulements à surfaces libres dans des situations complexes : remplissage de cavités en turbulent, aquaplaning, procédés métallurgiques etc. Ces méthodologies sont entièrement applicables au cas de ruissellement de liquides sur des surfaces en échangeant de chaleur par convection. Un des projets concerne l'impact d'un jet d'huile sur un obstacle plan ou hémisphérique avec transferts thermiques – comparaison à des expériences (les expériences vont être réalisées au TREFLE à partir de fin 2009).

L'autre projet vise à simuler l'écoulement turbulent d'un gaz dans un conduit en présence d'un film liquide d'huile ou d'eau. Une attention toute particulière sera portée sur l'introduction de conditions aux limites synthétiques dans le cadre d'une approche Simulation des grandes Échelles. Les simulations visées comporteront plusieurs dizaines (voire plusieurs centaines) de millions de degrés de liberté. Plusieurs configurations caractérisées par un nombre de Reynolds et un nombre de Weber seront définies. L'objectif est de déterminer les caractéristiques moyennes de l'écoulement ainsi que les coefficients de frottement et les coefficients d'échange de chaleur pour plusieurs régimes d'écoulement. Nous sommes aussi intéressés par la comparaison de résultats d'expériences et de simulations sur des configurations communes exposées plus haut.

8.15 Air Liquide

Centre de Recherche Claude Delorme (CRCD)
1, chemin de la Porte des Loges- BP 126
Les Loges-en-Josas - 78354 Jouy-en-Josas Cedex

Personnels impliqués

Guillaume Mougins et Frédéric Camy-Peyret (chercheurs) et Golo Zick (coordinateur de projet), 1 technicien
Air Liquide co-encadre 2 doctorants et 1 PostDoc.

Moyens

bancs d'essai de garnissages en conditions cryogéniques (performance et efficacité), cluster de calcul

Ensemble de compétences

Simulation numérique des écoulements diphasiques et des transferts. Installations expérimentales en conditions cryogéniques.

Projet

Air Liquide exploite des colonnes de distillation depuis plus d'un siècle pour produire les gaz de l'air (oxygène, azote, argon, gaz rares). A l'intérieur de ces colonnes, la séparation des constituants nécessite de larges surfaces d'échange entre une phase liquide et une

phase vapeur. La technologie des garnissages structurés est actuellement la plus utilisée pour assurer la fonction d'échange, il s'agit de contacteurs constitués de plaques verticales assemblées, entre lesquelles circulent à contre-courant des films liquides aux parois et une phase vapeur au centre. Les garnissages occupent une partie importante du volume des colonnes et leur géométrie conditionne l'efficacité du transfert et le débit maximum qu'il est possible de soumettre.

Pour contribuer à l'innovation dans ce domaine, le projet scientifique d'Air Liquide consiste à caractériser par les moyens actuels de mesure expérimentale et de simulation numérique, les écoulements de films minces sur des surfaces complexes, l'effet du cisaillement par un gaz turbulent à contre-courant et les transferts de matière.

8.16 ArcelorMittal

ArcelorMittal Research Voie Romaine – B.P. 30320
57283 Maizières Lès Metz Cedex

Personnels impliqués

Jean-Luc Borean, Makhlof Hamide, Pascal Gardin

Moyens

- Pilote expérimental de refroidissement des aciers, à l'échelle un par rapport aux phénomènes physiques, avec possibilité de défilement du produit,
- Chauffage du produit soit dans un four à flamme soit par induction pour avoir un chauffage massif sur des temps courts ; T° max : 700-800°C ;
- Mesure thermique par thermographie infrarouge ou thermocouple revêtu d'une couche électrodéposée de nickel.
- Différents systèmes de refroidissement peuvent être testés : jets cohérents d'eau ou système diphasique eau/air.
- Dans le domaine de la simulation numérique, le centre de recherche dispose, en plus du logiciel commercial Fluent, des logiciels Thétis et Jadim.

Ensemble de compétences

Les refroidissements métallurgiques au laminage sont un des cœurs de métier de la sidérurgie. De ce fait, le personnel impliqué a acquis une grande expérience depuis une quinzaine d'années dans la caractérisation des systèmes de refroidissement industriels des produits sidérurgiques à haute température (jusqu'à 1000°C), soit sur des installations prototypes installées dans les locaux du site de Maizières, soit sur site industriel avec des méthodes originales d'investigation des cycles de chauffage/refroidissement des produits sidérurgiques. Le dépouillement des mesures se fait par méthode inverse instationnaire. Des simulations numériques sont développées en parallèle, avec une forte interaction avec certains laboratoires académiques (dont LEMTA). Ces simulations sont fondées sur des logiciels commerciaux de mécanique des fluides multiphasique, complétés par des modèles spécifiques.

Projet

Notre objectif consiste à définir des conditions de refroidissements qui garantissent l'homogénéité transverse du refroidissement, en minimisant la quantité d'eau injectée. Différents points doivent être élucidés pour progresser dans la conception des procédés de refroidissement industriel : identification des régimes d'ébullition les plus favorables à un refroidissement homogène, effet de la vitesse d'impact de l'eau et de la vitesse de défilement du produit sur les flux thermiques extraits... ; dans le cadre de ce GdR, nous proposons de mieux comprendre l'influence du film d'eau sur le refroidissement et de quantifier son effet (positif ou négatif) sur la distribution de température dans le produit. Expérimentalement, il sera possible d'acquérir des données sur pilote, et de contribuer à la compréhension des mécanismes par utilisation de la simulation numérique ; celle-ci aura pour objectif de décrire l'interface eau/vapeur pour définir les conditions les plus favorables à sa déstabilisation et donc à l'augmentation des flux extraits. Le modèle de suivi d'interface sera de type VOF, avec une première approche en 2D puis extension en 3D, avec des vitesses de défilement du produit constantes, mais avec des températures initiales variables pour simuler les différentes étapes du refroidissement du produit.

8.17 PSA Peugeot Citroën

DRIA/DSTF

Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée

Direction Scientifique

Section Mécanique des Fluides, Thermique et Aéroacoustique

Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex

Refs. [65–68]

Personnels impliqués

Vincent Herbert et Sébastien Depardon (chercheurs), un doctorant, un technicien mesure.

Moyens

PIV 2 composantes (air/eau), Caméra rapide, LEDAR, LDV, fil chaud

Ensemble de compétences

Mécanique des fluides (stationnaire/instationnaire) et aérodynamique automobile. Métrologie aérodynamique. Modélisation numérique mono/diphasique.

Projet

Constitution de bases de données expérimentales de référence servant à comprendre et hiérarchiser les phénomènes d'entraînement d'eau par un écoulement aérodynamique et d'arrachement de film liquide. Développements de modèles numériques propres de film liquide (ex : Modélisation de film liquide soumis à un écoulement aérodynamique sous le code Fluent) et analyse des modèles VOF.

Analyse des phénomènes de transferts de quantité de mouvement entre un écoulement aéro turbulent et une nappe d'eau.

8.18 Renault

Technocentre Renault
Direction de la Recherche des Études Avancées et des Matériaux
Direction des Technologies Automobiles Avancées
DREAM/DTAA - Groupe Mécanique des Fluides & Aérodynamique
Service 68260, Code API : TCR AVA 058
1, Avenue du Golf
78288 GUYANCOURT Cedex
Refs. [69–71]

Personnels impliqués

Patrick Gilliéron et Emmanuelle Andrès (chercheurs) un doctorant, un technicien maquettage et un technicien mesure

Moyens

PIV 2 composantes et stéréo, caméra rapide, fil chaud, LDV

Ensemble de compétences

Mécanique des fluides et aérodynamique automobile. Mesure d'écoulements instationnaires.

Projet

- Modélisation de l'écoulement d'un film liquide sur un plan incliné soumis à un écoulement d'air à contre-courant. Compréhension des phénomènes physiques par une approche expérimentale et analytique et à terme numérique. Développement de modèles diphasiques. Constitution de bases de données expérimentales.
- Caractérisation des phénomènes d'entraînement, de coalescence et d'arrachement de gouttes.
- Modélisation des instabilités locales : décrochements de gouttes, bourrelets, vague et ondes.
- Impacts liés aux arrachements et redéposition de gouttes.
- Corrélation essais/calculs pour validation de logiciels.

La thématique de recherche concerne l'écoulement d'eau sous forme de films à l'extérieur du véhicule et également les intrusions de gouttes à l'intérieur (étanchéité habitacle, boîte à eau, compartiment moteur). Les impacts sur la sécurité (visibilité) et l'image de marque (étanchéité, salissures) justifient l'intérêt de la recherche déjà engagée.

8.19 CSTB

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
Climatologie, Aérodynamique, Pollution, Épuration
11 rue Henri Picherit, BP 82341, 44323 Nantes Cedex 3
Refs. [65, 67, 68]

Personnels impliqués

J.-P.Bouchet et S. Aguinaga (chercheurs), 3 techniciens (mesures physiques, conception et maquetages)

Moyens

- Souffleries de tailles diverses dont soufflerie climatique automobile échelle 1 (Jules VERNE)
- Moyens de mesure variés (anémométrie, granulométrie, acquisition et traitement d’images)
- Licences Fluent et code de calcul ”Open source”

Ensemble de compétences

Le département CAPE du CSTB mène des travaux depuis plus de 10 ans sur les problèmes de roulage des véhicules par temps de pluie. Des méthodes originales de traitement d’images appliquées à l’analyse des écoulements d’eau ont été développées et sont aujourd’hui régulièrement mises en œuvre pour les constructeurs (cartographie d’épaisseur de film et quantification de dépôt de gouttelettes). Une étude expérimentale des phénomènes d’arrachement de film a déjà été réalisée (travaux confidentiels). Deux thèses ont été réalisées sur ce type d’écoulements diphasiques (partenariat PSA).

Projet

La participation du département CAPE du CSTB au GDR est motivée par les collaborations déjà engagées avec les constructeurs automobiles sur la problématique générale du roulage par temps de pluie (écoulements sur carrosserie, vitrages et sous-capot) et par les travaux réalisés dans le domaine du Bâtiment (pluie battante, ruissellement et étanchéité des éléments de couverture notamment).

Nous proposons d’étendre ces travaux en contribuant à l’analyse physique et au développement de modèles de calcul des écoulements diphasiques de type film par, notamment, le développement d’une base de données expérimentale sur le comportement de films liquides en présence d’écoulements cisailés dans diverses configurations géométriques pouvant inclure les phénomènes d’arrachement. La conception de cette base de données repose sur les capacités du CSTB à concevoir et réaliser un banc expérimental adapté et évolutif et à mettre en œuvre de multiples techniques de mesure dont :

- anémométrie pour la caractérisation de l’écoulement d’air supérieur
- fluorescence et imagerie pour des mesures non-intrusives des épaisseurs de film et l’analyse des phénomènes d’instabilités et d’arrachement

– granulométrie pour l’analyse des ”globules” et/ou gouttes arrachées

Cette base de données expérimentale concernerait les films d’eau en présence d’écoulement d’air supérieur à co-courant ou contre-courant. L’influence de la mouillabilité de la surface serait également étudiée.

8.20 LME

Laboratoire de Mécanique et Énergétique (EA 2447)

Université de Valenciennes

59313 Valenciennes cedex 9

Refs. [72–74]

Personnels impliqués

L. Labraga, professeur, L. Keirsbulck, maître de conférences, M. Lippert, Ingénieur d’études

Moyens

Visualisation d’écoulements par tomographie laser, anémométrie à fils/films chauds, anémométrie laser Doppler, vélocimétrie (PIV et SPIV et ultrasonique), mesures de pression instationnaire (KULITE), mesures du frottement instationnaire par polarographie, mesures d’efforts à l’aide de la balance aérodynamique 6 composantes du LME. 2 souffleries subsoniques et 2 canaux hydrauliques polarographiques.

Ensemble de compétences

Le Laboratoire de Mécanique et d’Énergétique exerce son activité de recherche dans les domaines de l’aérodynamique, de l’hydrodynamique et des transferts thermiques. Le LME bénéficie de moyens de simulation numérique performants ainsi que d’installations d’essais dont les plus importantes sont des souffleries et des tunnels hydrodynamiques. Ces différents axes de recherche ont permis de développer des compétences fortes autour de :

- L’identification et le contrôle des structures organisées au sein des écoulements turbulents avec prise en compte de la géométrie de surface.
- La métrologie pariétale : technique polarographique de mesure du frottement pariétal.
- La simulation de la turbulence en mécanique des fluides : développement d’un code de recherche de haute précision en Fortran (méthodes hermitiennes, LES, DNS), utilisation avancée de progiciels de CFD.

Projet

Le projet que le LME compte mener dans le cadre de ce GDR s’inscrit dans une collaboration entre le LME et l’IVK. Ce projet expérimental vise à une meilleure compréhension du comportement des films liquides cisailés. Les applications concernent en particulier le phénomène d’“overspray” qui se produit lorsque des gouttelettes d’eau émises à partir de certaines parties d’un essuie glace, viennent “impacter” le pare-brise du véhicule. La

problématique consiste alors à identifier et à contrôler les zones de stagnation des gouttes et de leur arrachement. Cette étude fait l'objet d'une thèse dont la co-direction a été confiée à J.-M. Buchlin (IVK) et à L. Labraga (LME).

8.21 ONERA

ONERA-DMAE,
Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique
BP 4025 F-31055 TOULOUSE CEDEX 4
Refs. [10, 75, 76]

Personnels impliqués

Chercheurs ONERA : Pierre Berthoumieu, Claire Laurent

Moyens

Moyens expérimentaux : Écoulement d'un film liquide sur plan incliné en présence d'un écoulement gazeux laminaire. Création du film liquide à partir d'une fente et/ou par impact d'un spray. Un décrochement pourra être rajouté sur la géométrie pour étudier la séparation du film. Techniques de visualisation rapide et de traitement d'images pour caractériser les instabilités.

- Technique LDA pour caractériser l'écoulement gazeux. Il est également envisagé de développer la technique LIF pour la mesure de l'épaisseur.

Moyens de simulation numérique : Les modèles sont intégrés dans une plateforme de calcul multiphysique, le code CEDRE de l'ONERA, dans lequel un solveur FILM est dédié à la modélisation des films liquides minces en paroi pour des simulations numériques de type industrielles. Le couplage avec les autres solveurs de CEDRE permet la modélisation des phénomènes associés. L'entraînement du film est modélisé grâce au couplage avec le solveur CHARME (solveur volumes-finis pour le gaz) et l'impact des gouttes est pris en compte par le couplage avec le solveur SPARTE (solveur lagrangien pour la phase dispersée). La méthode numérique utilisée pour les films est une méthode eulérienne de volumes finis surfaciques. La modélisation du film est bidimensionnelle avec une hauteur de film calculée. Le modèle implémenté dans un premier temps est un modèle à une équation (résolution de l'équation sur la hauteur et calcul de la vitesse en fonction de la hauteur). Un modèle à trois équations sera ensuite implémentés pour modéliser les instabilités (résolution de l'équation de quantité de mouvement intégrée suivant l'épaisseur).

Ensemble de compétences

Les écoulements diphasiques à phase dispersée et interface sont au cœur du métier de l'unité Multiphasique-Hétérogène. L'unité a développé ses compétences à travers une approche à la fois expérimentale et numérique de ces phénomènes. Les expériences réalisées vont de l'expérimentation de base pour la validation des modèles (études sur le jet mono-disperse par exemple) aux grandes installations pour étudier les phénomènes en conditions

réalistes (étude des écoulements diphasiques dans des foyers aéronautiques à haute pression par exemple).

Projet

Dans le cadre de ce groupe de travail, l'unité Multiphasique-Hétérogène de l'ONERA-DMAE propose de mettre en œuvre la complémentarité des approches numériques et expérimentales au service de l'étude des films liquides. Une expérience générique servira de support à l'étude des différents phénomènes : formation des films liquides par impact de spray, dynamique de l'entraînement, instabilités du film cisailé avec également la possibilité d'étudier la séparation du film liquide. Cette expérience sera instrumentée de manière à mesurer les paramètres importants pour la validation des modèles implémentés dans le solveur FILM du code CEDRE.

8.22 IVK

Département de la dynamique des fluides appliquée et de l'environnement
Chaussée de Waterloo, 72
B-1640 Rhode-St-Genèse
Belgique
Refs. [77–80]

Personnels impliqués

3 professeurs (temps partiel), 1 ingénieur de recherche (temps partiel) ; 2 doctorants (temps complet), 1 ingénieur de Laboratoire (temps partiel), 2 techniciens (temps partiel)

Moyens

L'IVK possède quatre installations totalement dédiées aux thématiques citées, des moyens optiques (lasers continus et mini Yag pulsé avec composante UV, caméra rapide 100000 Im/s, matériel optique, PIV, codes parallèles et grappes de calculateurs). L'IVK utilise des codes de calcul tels que Fluent (ANSYS), Aquilon (TREFLE de l'Université de Bordeaux, CFD-ACE (ESI) et StarCCM+ (CD-Adapco) pour simuler des configurations où l'interaction flux gazeux-liquide domine.

Projet

Modélisation expérimentale et numérique des phénomènes liés aux thématiques suivantes :
– Mise en œuvre de modèles traduisant le couplage entre un écoulement turbulent d'un gaz et l'écoulement d'un film liquide [77, 78]. la dynamique de l'entraînement et l'arrachage de film liquide par un flux gazeux normal ou tangent à l'interface [77, 79]. Les instabilités d'un film liquide cisailé [80]

L'IVK développe des techniques expérimentales de caractérisation de la turbulence à l'interface gaz-liquide :

- Cartographie de l'épaisseur instantanée d'un film instable : longueur d'onde et amplitudes des instabilités de surface [80]
- La technique LEDAR : suivi instantané de la déformée d'une tranche de l'interface
- La PIV deux-phases : champ de vitesse instantané dans le gaz et le liquide en simultané ou dissocié.

8.23 ULB

TIPs - Physique des Fluides

Transferts, Interfaces et Procédés - Physique des Fluides

Faculté des Sciences appliquées/école polytechnique - Chimie et Science des matériaux (unité ULB699)

Campus du Solbosch, Solbosch, square groupe G, bâtiment U, porte B, 5ème et 6ème étages, CP165/67, avenue F.D. Roosevelt 50, 1050 Bruxelles, Belgique

Refs. [81–83]

Personnels impliqués

P. Colinet, chercheur FNRS, B. Scheid Docteur, A. Rednikov Docteur, Sam Dehaeck Docteur, Juthamas Kamrak Doctorante + 2 Doctorants sur contrat européen (réseau ITN Marie Curie “Multiflow” No 214919).

Moyens

Moyens actuels : Interféromètres, tensiomètre, spin coater, serveur de calcul, Fluent, Comsol

Moyens prévus pour 2010 : Salle blanche, caméra infrarouge, banc d'essai pour film tombants, banc d'essai pour film ultra-mince

L'Unité de Physique des Fluides fait partie de plusieurs réseaux financés par la Commission Européenne et par l'Agence Spatiale Européenne.

Projet

Dynamique des films liquides minces :

Nous nous intéresserons à la stabilité et la rupture de films minces et ultra-minces sur des substrats solides et éventuellement chauffés. Outre la recherche théorique et numérique, des expériences seront réalisées au sol et éventuellement en microgravité, notamment en ce qui concerne la stabilité de films minces sur des surfaces structurées. Au sol, nous développerons un banc d'essai permettant de caractériser les structures d'onde à la surface de films liquides s'écoulant sous l'action de la gravité; le substrat étant par ailleurs chauffé et la phase gazeuse confinée afin de contrôler le coefficient de transfert de chaleur et éventuellement l'évaporation. Nous nous intéresserons également à un écoulement autour d'une ligne de contact en modifiant localement (à l'aide d'un anti-mouillant ou de nanostructures) la surface solide.

Références

- [1] Document de prospectives du Conseil scientifique du département ST2I, <http://www.cnrs.fr/inst2i/presentation/conseil.htm>
- [2] Spiegel, L., Meier, W., Distillation columns with structured packings in the next decade. *Trans IChemE* **80**, part A, January 2003.
- [3] Argyriadi, K., Vlachogiannis, M. and Bontozoglou, V. Experimental study of inclined film flow along periodic corrugations : The effect of wall steepness. *Phys. Fluids* **18**, 012102, 2006.
- [4] Trifonov, Y.Y., Stability of a viscous liquid film flowing down a periodic surface. *Int. J. Multiphase Flow* **33**, 1186-1204, 2007.
- [5] Wierschem, A., Lepski, C. and Aksel, N. Effect of long undulated bottoms on thin gravity driven films. *Acta Mech.* **179**, 41-66, 2005.
- [6] Wittig, S., Himmelsbach, J., Noll, B., Feld, H.J. and Samenfink, W. Motion and evaporation of shear-driven liquid films in turbulent gases. *J. Eng. for Gas Turbines and Power* **114**, 395-400, 1992.
- [7] Jayanti, J., Tokarz, A. and Hewitt, G.F. Theoretical investigation of the diameter effect on flooding in countercurrent flow. *Int. J. Multiphase Flow.* **22**(2), 307-344, 1996.
- [8] Mouza, A.A., Pantzali, M.N. and Paras, S.V. Falling film and flooding phenomena in small diameter vertical tubes : The influence of liquid properties. *Chem. Engin. Sci.* **60**, 4981-4991, 2005.
- [9] Wittig, S., Himmelsbach, J., Noll, B., Feld, H.J. and Samenfink, W. Motion and evaporation of shear-driven liquid films in turbulent gases. *J. Engin. Gas Turbines and Power* **114**, 395-400, 1992.
- [10] Lalo, M., Cartellier, A., Gajan, P. and Strzelecki, A. Use of Faraday Instabilities to Enhance Fuel Pulverization in Airblast Atomizers, ICLASS 2006, Kyoto.
- [11] Drosos, E.I.P., Paras, S.V. and Karabelas, A.J. Counter-current gas-liquid flow in a vertical narrow channel — Liquid film characteristics and flooding phenomena. *Int. J. Multiphase Flow* **32**, 51-81, 2006.
- [12] Tanguy, S., Ménard, T and Berlemont, A. A Level Set Method for vaporizing two-phase flows *J. Comp. Phys.*, **221**(2), 837-853, 2007
- [13] Ménard, T, Tanguy, S. and Berlemont A. Coupling Level Set VOF Ghost fluid methods : Validation and application to 3D simulation of jet primary break up *Int. J. Multiphase Flows*, **33**, 510-524, 2007
- [14] Danaïla, L., Antonia, R.A. and Burattini P. Progress in studying small scale turbulence using “exact” two point equations *New J. of Phys.* **6**, 128, 2004
- [15] Burattini P., Antonia R.A. and Danaïla L. Similarity in the far field of a turbulent jet *Phys. of Fluids* **17**, 025101, 2005.
- [16] Dietze, G.F., Leefken, A. and Kneer, R. Investigation of the backflow phenomenon in falling liquid films *J. Fluid Mech.* **595**, 435-459, 2007.
- [17] Renaudin, A., Galopin, E., Thomy, V., Druon C. and Zoueshtiagh., F. Creeping, walking and jumping drops *Phys. of Fluids* **19**, 091111, 2007.

- [18] Brunet, P., Eggers J. and Deegan. R.D. Vibration-induced climbing drops. *Phys. Rev. Lett.* **99**, 144501, 2007.
- [19] Brunet, P., Lapierre, F., Thomy, V., Coffinier, Y. and Boukherroub, R. Extreme resistance of super hydrophobic surfaces to impalement : reversible electrowetting related to the impacting/bouncing drop test. *Langmuir* **24**, 11203-11208, 2008.
- [20] Ruyer-Quil, C. and Manneville, P. Improved Modeling of flows down inclined planes. *Eur. Phys. J. B* **6**, 277-292, 2000.
- [21] Ruyer-Quil, C., Treveleyan, P., Giorgiutti-Dauphiné, F., Duprat, C. and Kalliadasis, S. Modelling film flows down a fibre. *J. Fluid Mech.* **603**, 431-462, 2008.
- [22] Ruyer-Quil, C. and Manneville, P. On the speed of solitary waves running down a vertical wall. *J. Fluid Mech.* **531**, 181-190, 2005
- [23] Toussaint, G., Bodiguel, H. , Doumenc, F., Guerrier, B. and Allain, C. Experimental characterization of buoyancy- and surface tension-driven convection during the drying of a polymer solution, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **51**, 17-18, pp.4228-4237, 2008.
- [24] Doumenc, F., Boeck, T., Guerrier, B. and Rossi, M. Transient Rayleigh-Bénard-Marangoni Convection due to Evaporation : a Linear Non-normal Stability Analysis, soumis à *J Fluid Mech.*
- [25] Bodiguel, H., Doumenc, F. and Guerrier, B. Patterns formation during the drying of a colloidal suspension ; pinning of a receding contact line, *Eur. Phys. J.–Special Topics* **166**, pp.29-32, 2009.
- [26] Yecko, P. and Zaleski, S. Transient growth in two-phase mixing layers. *J. Fluid Mech.* **528**, 43-52, 2005.
- [27] Yecko, P., Zaleski, S. and Fullana, J.M. Viscous modes in two-phase mixing layers. *Phys. Fluids* **14**, 4115-4122, 2002.
- [28] Boeck, T. and Zaleski, S. Viscous versus inviscid instability of two-phase mixing layers with continuous velocity profile. *Phys. Fluids* **17**, 032106, 2005.
- [29] Bonometti T. and Magnaudet J. A front-capturing technique for the computation of incompressible two-phase flows. Validation and application to bubbly flows. *Int. J. Multiphase Flow* **33**, 109-133, 2007.
- [30] Calmet I. and Magnaudet J. Statistical structure of high-Reynolds-number turbulence close to the free surface of an open channel. *J. Fluid Mech.* **474**, 355-378, 2003.
- [31] Duval, M, Astruc, D. and Legendre D., Two-phase flow modelling of breaking waves without interface reconstruction, Proc. 14th Int. Offshore and Polar Engng. Conf. **3**, 270-275, 2004.
- [32] Boulesteix, S., Ern, P. And Charru, F. Characterization of droplets entrainment in gas-liquid horizontal pipe flow, 7th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, 14-18 Sept. 2008, Manchester, UK.
- [33] Boulesteix, S., Ern, P. And Charru, F. Atomization in an air-water pipe flow, 61st Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, 23-25 Nov. 2008, San Antonio, Texas, USA.

- [34] Eggers, J. and Villermaux, E., Physics of Liquid Jets. *Rep. Prog. Physics* **71**, 036601, 2008.
- [35] Villermaux, E., Fragmentation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **39**, 419–446, 2007.
- [36] Bremond, N. Clanet, C. and Villermaux, E. Atomization of undulated liquid sheets. *J. Fluid Mech.* **585**, 421-456, 2006.
- [37] Bremond, N. and Villermaux, E. Atomization by jet impact. *J. Fluid Mech.* **549**, 273-306, 2006.
- [38] Bremond, N. and Villermaux, E. Bursting thin liquid films. *J. Fluid Mech.* **524**, 121-130, 2005.
- [39] Ruyer-Quil, C. and Manneville, P. Further accuracy and convergence results on the modeling of flows down inclined planes by weighted-residual approximations, *Phys. Fluids* **14** 170-183, 2002.
- [40] Manneville, P., Dollet, B. and Ruyer-Quil, C. Stability of the meniscus of an evaporating fluid along an inclined plane, Abstract KM3, Bull. Am. Phys. Soc. **47** 173. APS DFD02 Dallas 24–26 Novembre 2002.
- [41] Kumar, A., Pluntke, M., Cross, B., Baret, J.C. and Mugele, F. ; Finite conductivity effects and apparent contact angle saturation in AC electrowetting Proc. of the Materials Research Society Fall Meeting, Boston, U.S.A., Nov. 2005, *Mater.Res.Soc.Symp.Proc* **899**-N06-01.1
- [42] Cottin-Bizonne, C., Cross, B., Steinberger A. and Charlaix E. Boundary slip on smooth hydrophobic surfaces : intrinsic effects and possible artifacts *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 056102, 2005.
- [43] Cross, B., Steinberger, A., Cottin-Bizonne, C., Rieu J.-P. and Charlaix, E. Boundary flow of water on supported phospholipid films *Europhys. Lett.* , **73** , 390-39, 2005
- [44] Cartellier A. and Matas, J-Ph. Air assisted atomisation : interfacial instabilities and drop formation mechanisms, 46th European Two-Phase Flow Group Meeting, Pisa, Italy, May 28-30, 2008.
- [45] Ben Rayana F., Cartellier A., and Hopfinger E. Assisted atomization of a liquid layer : investigation of the parameters affecting the mean drop size prediction, (paper ICLASS06-190), CD Proc. ICLASS 2006, Aug. 27 Sept. 1, Kyoto, Japan, ISBN 4 9902774 1 4, Publ. Academic Publication and Printings Co, 2006.
- [46] Hong, M., Cartellier A., Hopfinger E. and Matas, J. Ph. Spray development in the near field of two-phase coaxial injectors. in CD Proc. 11th Workshop on Two-Phase Flow Predictions, April 5 8, 2005, Halle Wittenberg, Merseburg, Germany, ISBN 3 86010 767 4, M. Sommerfeld Editor, 2005.
- [47] Balarac, G., Desjardins, O. and Pitsch, H. Numerical simulation of atomization assisted by a high velocity coaxial air stream : effect of swirl, Thermal and Fluid Sciences Affiliates and Sponsors Conference, Stanford University, USA, 2008.
- [48] Desjardins, O., Blanquart, G., Balarac, G. and Pitsch, H. High order conservative finite difference scheme for variable density low Mach number turbulent flows, *J Comp. Phys.* **227**(15), 2008.

- [49] Balarac, G., Pitsch, H. and Raman, V. Development of a dynamic model for the subfilter scalar variance using the concept of optimal estimators, *Phys. Fluids* **20**(3), 2008.
- [50] Testu, A., Didierjean, S., Maillet, D., Moyne, C., Metzger, T. and Niass, T. Thermal dispersion coefficients for water or air flow through a bed of glass beads, *Int. J. Heat Mass Transfer* **50** 1469-1484, 2007.
- [51] Girault, M., Maillet, D., Bonthoux, F., Galland, B., Martin, P., Braconnier, R. and Fontaine, J.-R. Estimation of time-varying pollutant emission rates in a ventilated enclosure : inversion of a reduced model obtained by experimental application of the Modal Identification Method, *Inverse Problems* **24**(1) 015021, 2008.
- [52] Volle, F., Maillet, D., Kouachi, A., Gradeck, M. and Lebouché, M. Practical application of inverse conduction for wall condition estimation on a rotating cylinder, *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** 210-221, 2009.
- [53] Plourde, F., Pham, M.V. and Doan-Kim, S. , Direct and Large eddy simulations of a pure thermal plume, *Phys. Fluids*, **19**(12), 125103-125103, 2007.
- [54] Pham, M.V., Plourde, F. and Doan-Kim, S. Turbulent heat and mass transfer in sinusoidal wavy channels, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **29**, 1240-1257, 2008.
- [55] Plourde, F., Pham, M.V., Doan-Kim, S. and Balachandar S., Direct numerical simulations of a pure thermal plume : structure and entrainment interaction, *J. Fluid Mech.*, **604**, 99-123, 2008.
- [56] Frank, X. and Li, H.Z. Negative wake behind a sphere rising in viscoelastic fluids : a lattice Boltzmann investigation, *Phys. Rev. E*, **74**, 056307, 2006.
- [57] Kemiha, M., Olmos, E., Fei, W., Poncin, S. and Li, H. Z. Passage of a gas bubble through a liquid-liquid interface, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **46**, 6099-6104, 2007.
- [58] Dietrich, N., Poncin, S., Midoux, N. and Li, H.Z. Bubble formation dynamics in various flow-focusing micro-devices, *Langmuir*, **24**, 13904-13911, 2008.
- [59] Sebilleau J., Lebon L. and Limat L. Stability of a dry patch in a viscous flowing film, *Eur. Phys. J. Special Topics*, **166**, 139-142, 2009.
- [60] Berteloot, G., Pham, C.-T., Daerr, A., Lequeux, F. and Limat, L. Evaporation-induced flow near a contact line : Consequences on coating and contact angle, *Europhys. Lett.*, **83** 14003, 2008.
- [61] Snoeijer, J., Le grand-Piteira, N., Limat, L., Stone, H. A. and Eggers, J. Cornered drops and rivulets, *Phys. of Fluids*, **19** 042104, 2007.
- [62] Vincent, S. and Caltagirone, J.-P. Efficient solving method for unsteady incompressible interfacial flow problems. *Int. J. Num.Methods Fluids*, **30**, 795-811, 1999.
- [63] Vincent, S., Lubin, P., Caltagirone, J.-P. and Randrianarivelo, N. An adaptive augmented lagrangian method for three-dimensional multimaterial flows. *Comput. Fluids*, **33**(10), 1273-1289, 2004
- [64] Labourasse, E., Lacanette, D., Toutant, A., Lubin, P., Vincent, S., Lebaigne, O., Caltagirone, J.-P. and Sagaut, P. Towards large eddy simulation of isothermal two-phase flows : Governing equations and a priori tests. *Int. J. Multiphase flow*, **33**, 1-39, 2007.

- [65] Ribes, C., Carrega, S., Scotto d'Apollonia, A., Bouchet, J.-P. and Borée, J. Mesure d'épaisseur de films liquides - Caractérisation des débordements d'eau de pluie sur les vitres latérales d'un véhicule automobile en soufflerie - FLUVISU 11, 5-7 Juin 2005, Lyon
- [66] Berger, R., Depardon, S., Rambaud, P. and Buchlin, J.-M. Experimental investigation of a 2d impinging jet on a liquid surface - Multiphase Flow 2009 15-17 June 2009, The New Forest, UK
- [67] Aguinaga, S. Dispersion turbulente et déposition de gouttes d'eau (expérimentation et modélisation numérique), Thèse, décembre 2008
- [68] Aguinaga, S., Borée, J., Simonin, O., Bouchet, J.-P. and Herbert, V. Droplets dispersion and deposition in a sudden expansion flow in 14th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, July 2008
- [69] Foucart, H. and Blain, E. Water-flow Simulation on Vehicle panels by taking into account the calculated aerodynamic field. SAE 2005-01-3572.
- [70] Njifenju, K., Andrès, E., Bobillier, P., Fermigier, M., Bico, J. and Jenffer, P., Experimental investigation of a countercurrent gas-liquid flow on an inclined glass substrate : longitudinal characteristics of liquid film gravity-driven flow. ISFV 13, FLUVISU 12, July 1-4, 2008.
- [71] Njifenju, K., Fermigier, M., Bico, J. and Andrès, E. Étude expérimentale d'un écoulement gaz-liquide à contre courant sur un plan incliné. CFM Marseille, 24-28 aout 2009.
- [72] Zidouh, H., Labraga, L. and William-Louis, M. Unsteady wall shear stress in transient flow using electrochemical method. *J. Fluids Engin.* **131**(5) DOI :10.1115/1.3112387, 2009.
- [73] Keirsbulck, L., Labraga, L. and Mazouz, A. Influence of blowing on the anisotropy of the Reynolds stress tensor in a turbulent channel. *Exp. Fluids* **40**, 654-662, 2006.
- [74] Lagraa, B., Labraga, L. and Mazouz A. Characterization of low-speed streaks in the near-wall region of a turbulent boundary layer. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, **23**, 587-599, 2004.
- [75] Garcia-Rosa, N., Villedieu, P., Dewitte, J. and Lavergne, G. A New Droplet Wall Interaction Model, ICLASS 2006, Kyoto.
- [76] Boutounet, M., Chupin, L. and Vila, J.-P. Shallow Water Flows for Arbitrary Topography, *Comm. Math. Sci.*, **6**(1), 29-55, 2008.
- [77] Lacanette, D., Gosset, A., Vincent, S., Buchlin, J.M., Arquis, E. Macroscopic analysis of gas-jet wiping : numerical simulation and experimental approach. *Phys. of Fluids*. **18**(4) 2006.
- [78] Myrillas, K., Gosset, A., Rambaud, P. and Buchlin, J.M. CFD simulation of gas-jet wiping process. *Eur. Phys. J.- Special Topics*. **106**, 93-97, 2009.
- [79] Gosset, A., Buchlin, J.M. Jet wiping in hot dip galvanization, *J. Fluids Eng.* **18** (4), 466-475, 2007.

- [80] Gosset, A., Buchlin, J.M. Comparison of experimental techniques for the measurement of unstable film flow. ECS2003, 5th European Coating Symposium on Advances in Liquid Film Coating Technology, Switzerland, September 17-19, 2003.
- [81] Colinet P., Kaya H., Rossomme S. and Scheid B. Some advances in lubrication-type theories, *Eur. Phys. J. Special Topics* **146**, 377-389, 2007.
- [82] Scheid, B., Kalliadasis, S., Ruyer-Quil, C. and Colinet, P. Spontaneous channeling of solitary pulses in heated film flows, *Europhys. Lett.* **84**, 64002, 2008.
- [83] Haut, B. and Colinet, P. Surface-tension-driven instabilities of a pure liquid layer evaporating into an inert gas, *J. Colloid Interface Sci.* **285**, 296-305, 2005.