

# Dossier scientifique en vue du renouvellement du GdR No 3373 “Ruissellement et films en écoulements cisailés” (GdR FILMS)

Christian Ruyer-Quil \*

26 mars 2013

## Résumé

L’objet du présent document est le renouvellement du GdR FILMS 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,...), la sidérurgie, le génie rural (ruissellement, imbibition des sols, risques liés aux avalanches et coulées de boues) et motivent une recherche importante tant fondamentale qu’appliquée. Partant de ce constat, les objectifs de ce projet sont de continuer de fédérer une communauté scientifique autour de la thématique des films liquides, et d’assurer l’implication de partenaires industriels et d’organismes extérieurs au CNRS (ONERA, IRSTEA et INRA). Ce projet propose de regrouper 23 équipes (13 issues des laboratoires rattachés à l’INSIS, 1 rattachée à l’ISMI et 9 non rattachées dont 4 industriels et 2 équipes venues de Belgique) avec des sensibilités allant de la physico-chimie des interfaces au génie chimique en passant par la mécanique, la géophysique, 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 (arrachage/impact et formation d’un film, écoulements gravitaires, cisailé, mouillage et transferts).

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Thématiques et problématiques physiques</b>	<b>4</b>

---

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

<b>3</b>	<b>Laboratoires impliqués</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Activités</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Bilan des travaux du GdR sur la période 2010-2012</b>	<b>9</b>
5.1	Écoulements gravitaires . . . . .	9
5.2	Écoulements de films cisailés . . . . .	11
5.3	Arrachage et formation de films . . . . .	13
5.4	Mouillage . . . . .	15
5.5	Transferts . . . . .	18
5.6	Bilan général . . . . .	19
<b>6</b>	<b>Missions</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>Annexe : Présentation de chaque équipe</b>	<b>21</b>
7.1	CORIA . . . . .	21
7.2	DALEMBERT . . . . .	22
7.3	FAST . . . . .	23
7.4	IMT . . . . .	24
7.5	IMFT . . . . .	25
7.6	IRPHE . . . . .	27
7.7	I2M - TREFLE . . . . .	27
7.8	LadHyX . . . . .	28
7.9	LEGI . . . . .	29
7.10	LEMETA . . . . .	30
7.11	LMFA . . . . .	31
7.12	LRGP . . . . .	32
7.13	MSC . . . . .	33
7.14	PPRIME . . . . .	36
7.15	Airbus . . . . .	36
7.16	Air Liquide . . . . .	37
7.17	ArcelorMittal . . . . .	37
7.18	EmmaH . . . . .	39
7.19	IRSTEA-ETNA . . . . .	40
7.20	ONERA . . . . .	41
7.21	Vallourec . . . . .	42
7.22	IVK . . . . .	43
7.23	ULB . . . . .	44

## 1 Introduction

Au sein de l'INSIS, 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), du transport aérien (avec notamment le problème du givrage des ailes d'avions) 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.

Le GdR FILMS est né en 2010 de ce constat et s'est efforcé de fédérer les activités de recherche au sein de l'INSIS mais aussi au sein d'autres instituts (INSMI). À cette fédération s'ajoutait la participation d'industriels (PSA, Renault, Air Liquide, Arcelor-Mittal). Le cadre du GdR FILMS déborde de l'hexagone puisque deux partenaires Belges (ULB et IVK) y participent régulièrement.

En terme de positionnement scientifique, il est important de noter l'existence de deux GdRs ayant un périmètre thématique proche de celui du GdR FILMS :

- le GdR Transport Solide Naturel (No 3276) rattaché à l'INSIS et qui rassemble les physiciens de la matière granulaire d'une part et les chercheurs de sciences de la terre (<http://transnat.univ-rennes1.fr/>)
- le GdR EGRIN (Écoulements Gravitaires et Risques Naturels) rattaché à l'INSMI et qui rassemble les mathématiciens travaillant sur les équations de Saint-Venant en approximation "eau peu-profonde" et application aux risques géophysiques (laves torrentielles etc.) (<http://gdr-egrin.math.cnrs.fr/>)

Une des thématiques du GdR FILMS est celle des écoulements gravitaires de films liquides (voir section 2) qui peuvent être vus comme une limite des écoulements en eau peu profonde lorsque la profondeur devient inférieur au millimètre. Pourtant, à la différence des situations considérées par les GdRs TSN et EGRIN, aux échelles d'un film liquide, les effets visqueux (forme du profil de vitesse et dispersion des ondes) et de tension de surface (amortissement des ondes courtes et prévention du déferlement) deviennent prépondérants. Le GdR FILMS se distingue également quant aux applications (les retombées industrielles attendues en génie chimique, métallurgie, construction aéronautique etc. sont très éloignées des risques naturels et des écoulements granulaires qui constituent les missions des GdR TSN et EGRIN) ce qui explique un contenu thématique différent (avec notamment la prise en compte des transferts de masse et de chaleur au cœur des problèmes industriels).

En terme de communauté scientifique, le GdR FILMS se distingue également des GdRs TSN et EGRIN en rassemblant universitaires (physiciens, mécaniciens, chercheurs en génie des procédés, mathématiciens appliqués) et industriels travaillant sur les écoulements diphasiques, le mouillage, les écoulements à surface libre et les instabilités, le génie des procédés et les transferts de chaleur et de masse, communauté en grande partie différente de celle de la physique de la terre et des milieux granulaires et des mathématiciens travaillant sur les équations de Saint-Venant (Il y a très peu de recouvrement entre listes de diffusion.)

## 2 Thématiques et problématiques physiques

Les domaines d'étude du GdR sont les écoulements de films liquides entraînés 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, le contenu scientifique du GdR a été développé en termes de 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** : Atomisation, 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 entre le film et son substrat ou à la surface libre. Couplage entre changement de phases et écoulement (par exemple en présence de déplacement de lignes triples, effet Leidenfrost etc.).

## 3 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.

Les compétences des partenaires de ce projet (détaillées en annexe section 7) sont complémentaires et permettent de développer pour chacune des thématiques du GdR l'ensemble des approches (expérimentale, numérique ou analytique).

Par rapport au dossier de création du GdR FILMS, une partie des acteurs industriels et académiques sont partis tandis que d'autres sont arrivés, le nombre total d'équipes impliquées restant stable. (les nouveaux acteurs sont indiqués par un **surlignement en**

jaune dans les différents tableaux).

Ainsi, les constructeurs automobiles (Renault et PSA) ne souhaitent pas renouveler leur participation au GdR FILMS. Cette décision s'explique en grande partie par un contexte économique difficile. Toutefois, PSA reste intéressé par les activités du GdR FILMS portant sur les outils numériques (VOF, Level Set, SPH), les modèles de film (ligne triple, front, ruisselet et arrachement) et les moyens de mesure expérimentaux en diphasique.

Deux nouveaux industriels : Airbus Industries (construction aéronautique) et Valloirec (leader mondial des tubes en acier sans soudure) sont partenaires de ce projet de renouvellement.

Les laboratoires IEMN (Lille), LME (Valenciennes) et le CSTB (Nantes) ne participent pas au présent projet de renouvellement, tandis que le LMFA (Lyon), l'IRSTEA (Grenoble) et EmmaH (Avignon) se sont joints à ce projet.

<b>Labo.</b>	code CNRS	<b>Responsable</b>	<b>Moyens</b>	<b>Problématiques</b>
CORIA	UMR 6614	Alain Berlemont	1 DR, 1 MdC, 2 IRs, 1 doctorant, calculs au CRIHAN et IDRIS, code ARCHER	cisaillement, arrachage
DALEMBERT	UMR 7190	Stéphane Zaleski	2 EC, 1 cluster de calcul, code GERRIS	cisaillement, arrachage
FAST	UMR 7608	Christian Ruyer-Quil	3 EC, 1 CR et 1 DR, caméra IR, outils de visualisation, rhéomètres	gravité, cisaillement, transferts
IMT	UMR 5219	Jean-Paul Vila	7 EC, 1 IR, 3 doctorants, 1 Postdoc	gravité, cisaillement
IMFT	UMR 5502	François Charru	3 DR, 5 Pr., 3 MdC, 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 7342	Uwe Ehrenstein	3 ECs, caméra rapide, diagnostics optiques divers, PIV, outils de visualisations et 2 salles d'essais	cisaillement, arrachage
I2M	UMR 5295	Jean-Paul Caltagirone	2 EC, 1 supercalculateur scalaire parallèle, code AQUILON	cisaillement, arrachage, mouillage, transferts

TABLE 1 – Laboratoires rattachés au CNRS (INSIS sauf IMT rattaché à l'ISMI) (EC : enseignant-chercheurs)

<b>Labo.</b>	<b>code CNRS</b>	<b>Responsable</b>	<b>Moyens</b>	<b>Problématiques</b>
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
LEMETA	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
<b>LMFA</b>	UMR 5509	Valéry Botton	1 DR et 3 ECs et 1 doctorant, banc exp., PIV, codes E. Finis + continuation	gravité
LRGP	UMR 7274	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, 2 CR, 2 EC, 3 doctorants, 1 Postdoc, 1 IR, bancs d'expériences hydrodynamiques, systèmes d'acquisition et de traitement d'images, deux caméras rapides, microscopes (dont un AFM).	gravité, mouillage, arrachage
PPRIME	UPR 3346	Frédéric Plourde	1 DR et 1 doctorant, Calculateur parallèle	gravité, cisaillement

TABLE 2 – Laboratoires rattachés au CNRS (INSIS) (suite)

<b>Labo.</b>	<b>Responsable</b>	<b>Moyens</b>	<b>Problématiques</b>
<b>Airbus</b>	Fabien Dezitter	2 chercheurs	cisaillement
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
<b>EMMAH</b> (UMR 1114)	Philippe Beltrame	1 MdC, pool informatique de l'INRA	gravité
<b>IRSTEA</b>	Mohamed Naim	6 chercheurs et 3 doctorants, canaux instrumentés, rhéomètres, ferme de calcul	gravité
ONERA	Pierre Berthoumieu Claire Laurent	2 chercheurs, 1 banc d'essai, caméras rapides, LIF, LDA, code CEDRE	formation, gravité, cisaillement
<b>Vallourec</b>	Thierry Bénard	3 chercheurs et 1 doctorant, bancs de mesure industriels	transferts

TABLE 3 – Laboratoires industriels ou non rattachés au CNRS

<b>Labo.</b>	<b>Responsable</b>	<b>Moyens</b>	<b>Problématiques</b>
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

TABLE 4 – Laboratoires européens partenaires



## 4 Activités

Le GdR FILMS a été créé en janvier 2010. Sur les trois ans de vie du GdR, celui-ci s'est réuni 7 fois. Une première réunion d'organisation ayant eu lieu le 6 juillet 2010, 6 colloques sur 14 journées au total ont été organisés. Le nombre des participants varie entre 20 et 30 par réunion. Le détail se trouve sur la page :

<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer//gdr.php>.

Les réunions du GdR ont été l'occasion d'inviter des chercheurs de renommée internationale :

- Marc Pradas (postdoc. Imperial College London, 14-16/09/11)  
<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/Aussois.php>
- Serafim Kalliadasis (Imperial College London, 9/03/12)  
<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/journees-0809-03-12.php>
- Ranga Narayanan (University of Florida, 25-27/09/12)  
<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/journees-2628-09-12.php>

En particulier, Ranga Narayanan a donné une série de cours (6h au total) sur les instabilités interfaciales en relation avec des problématiques industrielles. L'invitation du professeur Narayanan a été rendue possible avec l'aide du réseau européen de formation Multiflow (Marie Curie ITN No 214919).

Elles ont été aussi l'occasion de visites d'installations expérimentales à la fois académiques (IMFT) et industrielles (ONERA) lors des journées organisées à Toulouse :  
<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/journees-1819-06-12.php>

Le format de ces journées a bénéficié d'un retour très favorable de la part des participants. En 2013, nous envisageons donc d'organiser un colloque sur deux jours à Nancy avec visite des installations expérimentales du LEMTA.

Enfin, le GdR s'est efforcé de favoriser la formation des doctorants en payant les missions des doctorants participants (de 4 à 5 missions par rencontre).

Pour l'année 2013 qui s'amorce deux réunions du GdR FILMS sont prévues. L'une à Aussois du 27 au 29 mars et l'autre à Nancy (septembre). Les professeurs Yuri Trifonov et Dimitri Tseluiko seront les invités du GdR FILMS au cours du colloque d'Aussois.

## 5 Bilan des travaux du GdR sur la période 2010-2012

Dans cette section est présenté un compte-rendu des travaux effectués par les différents acteurs du GdR FILMS depuis sa création. Cette présentation est sommaire et synthétique et s'attache à mettre en avant les travaux collaboratifs qui ont bénéficié du cadre offert par le GdR.

### 5.1 Écoulements gravitaires

Les écoulements gravitaires de films tombants ont été l'objet de nombreuses discussions et interactions au sein du GdR. En effet, l'écoulement d'un film mince sur une paroi plane et inclinée est la situation académique la plus simple permettant d'étudier la stabilité des films et les différentes approches de modélisation (formulation de modèles de

basses dimensionalités par élimination de la coordonnée normale au plan, i.e. la variable “rapide”).

Les équipes impliquées sont le FAST, l’IMT, l’IMFT, le LET, le LMFA, le LRGP et l’ULB.

Au point de vue expérimental, deux montages d’écoulements de films sur plan incliné ont été réalisés, l’un au LMFA (V. Botton) et l’autre au FAST (S. Mergui et thèse de N. Kofman débutée en octobre 2011). Les études aux LMFA ont essentiellement porté sur les effets de la rhéologie sur la stabilité primaire du film (fluide rhéofluidifiant). Au FAST, les études expérimentales ont principalement porté sur la stabilité secondaire 3D des trains d’ondes primaires et l’influence de l’inclinaison du plan sur cette stabilité secondaire. Enfin, les effets d’une géométrie complexe (granissage) sur la dynamique du film ont été étudié expérimentalement au LRGP avec application aux réacteurs chimique (absorption du CO<sub>2</sub>) à l’aide de PIV et de caméras rapides [95].

D’un point de vue théorique, différentes approches de réduction de la dimensionnalité du problème initial ont été proposées : méthode des résidus pondérés (FAST, LET) et approche Saint-Venant consistante (IMT). Les différentes approches conduisent à des modèles équivalents d’un point de vue asymptotique lorsqu’ils sont consistants. Les développements ont concernés, les effets d’un substrat poreux [16, 17], d’une topographie variable [51, 91], d’une rhéologie complexe [18, 52], les problèmes de stabilité [53]. Notons également le développement de modèles dit multirégimes permettant de capturer les différents régimes d’écoulement géophysique avec application à la glaciologie. Pour ce dernier cas correspondant à des écoulements à très faibles nombres de Reynolds ( $Re \sim 10^{-10}$ ), les modèles à une équation ont probablement un intérêt applicatif [56, 57].

Enfin, à une échelle plus petite où les effets de surface jouent un rôle prépondérants, citons les travaux de l’ULB (B. Scheid) portant sur l’influence de la viscosité de surface lors des phénomènes de drainage de films minces. Dans le procédé d’enduction par immersion, la viscosité de surface joue un rôle sur l’épaisseur résultante [145]. Une loi d’échelle a été obtenue et validée expérimentalement [146]. Les résultats expérimentaux sur les temps de vie des antibulles s’expliquent en tenant compte de la viscosité de surface [147]. La rhéologie de surface joue un rôle majeur par exemple dans la stabilité des mousses.

Parmi les questions qui restent ouvertes, citons :

i) le nombre minimum de variables/équations nécessaires à la représentation de la dynamique du film pour des nombres des Reynolds modérés, typiquement  $Re \in [1, 200]$  (deux, i.e. épaisseur  $h$  et débit  $q$ , semble un minimum) et avec quelle précision, ii) les critères de fermeture des modèles, par exemple, le critère d’invariance galiléenne des flux introduit par Vila ou la forme conservative des équations, iii) comment assurer le bon comportement des modèles pour tous paramètres (et notamment la divergence en temps fini caractéristique de la perte de solutions de type onde solitaires). Il reste encore à étudier la sensibilité des modèles aux différents choix de paramètres et de fermetures en utilisant par exemple les outils de l’analyse de sensibilité variationnelle [57, 58].

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire d’avoir des données expérimentales et numériques à disposition dont une partie pourra être obtenu avec les codes VOF : Gerris (IJLRA), Thétis (TREFLE), JADIM (IMFT), ainsi qu’OpenFOAM (<http://www.openfoam.com/>). Quelques résultats concernant les ondes solitaires sur paroi verticale ont été documentés par Didier Chasseur avec le code Gerris [19].

La thématique des écoulements gravitaires de films a fait l'objet d'un montage de projet ANR déposé en 2011 et 2012 dans le cadre du programme blanc et impliquant le LMFA, FAST, IMT et IRSTEA Grenoble (projet SWIFTnNEW, porteur Valery Botton, LMFA). L'application visée était les laves torrentielles de boue et la prévision des risques inhérents (écoulements de films et de fronts avec rhéologie complexe).

*Autres projet*

- ANR “Des films liquides vers les mousses solides”. Coordinateur : Emmanuelle Rio, Laboratoire du Solide (LPS), Orsay, Paris (ULB)
- BELSPO PAI micro-MAST “Microscale Applications of Surface Tension : Microfluidics and Micromanipulation” Coordinateur : Pierre Lambert, Université Libre de Bruxelles, Belgique Website : [www.micromast.be](http://www.micromast.be) (ULB)

## 5.2 Ecoulements de films cisailés

Les écoulements de films liquides —et plus généralement de nappes liquides— en présence de co- ou contre-écoulement gazeux ont une grande importance d'un point de vue applicatif et ont motivé de nombreuses études au sein du GDR (CORIA, CSTB, FAST, DALEMBERT, IMFT, IMT, LEGI, ONERA). Ceux-ci ont déjà fait l'objet d'un grand nombre de travaux par le passé et présentent une très riche phénoménologie (instabilités courtes ou longues ondes, ondes interfaciales, arrachement de gouttes et atomisation, engorgement etc.) Un point a d'abord été fait sur l'état de l'art par G. Dietze (FAST, [http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/Dietze\\_GDR\\_aout\\_2011\\_POSTULTIMATE.pdf](http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/Dietze_GDR_aout_2011_POSTULTIMATE.pdf)).

Les effets d'un écoulement gazeux et turbulent sur une interface liquide ont été étudiés expérimentalement au LEGI (étude de l'instabilité de cisaillement d'une couche de mélange, thèse de Sylvain Mary) et à l'ONERA (épluchage d'une nappe liquide, P. Berthoumieu), et numériquement à l'IMFT (thèse de Serge Adjoua) [50]. D'un point de vue expérimental, des études ont été conduites au CSTB et au PPMH (thèse de K. Njifenju financée par Renault [112]) en soufflerie (film liquide sur véhicules automobiles et sur plans inclinés). Un montage expérimental et des campagnes de mesure ont été réalisés dans le cadre du projet CARNOT à l'ONERA. Le LEGI a étudié l'influence de la plaque séparatrice sur l'atomisation d'une nappe liquide par un jet gaz rapide. L'épaisseur de la plaque séparatrice modifie la fréquence du mode instable, et modifie également la nature du spectre des perturbations de surface. De façon plus générale, les spectres de perturbations montrent clairement l'apparition de deux régimes, compatibles avec une transition convectif/absolu de l'instabilité.

Les travaux du LEGI se poursuivent avec la conception d'un nouveau dispositif expérimental afin de pouvoir varier l'épaisseur du film liquide : les mesures effectuées pour des épaisseurs variables montrent contre toute attente que la fréquence de l'instabilité axiale diminue quand l'épaisseur du film liquide diminue. Pour répondre au besoin d'expériences contrôlées, une expérience de film cisailée en contre-écoulement est également en cours de montage au FAST (S. Mergui et thèse de N. Kofman) permettant le contrôle de l'écoulement par un forçage du film à l'admission dans des conditions proches du seuil de stabilité.

D'un point de vue numérique, la modélisation de la turbulence dans les régions diphasiques (petites échelles, couplage avec les déformations de l'interface) demeure un

point dur. Un autre point dur est la prise en compte d'un cisaillement fort entre phase liquide gazeuse et liquide.

Dans ce contexte, l'I2M (eq. TEFLE) a développé une série de modèles numériques adaptés

- (i) modèle compressible diphasique en formulation non conservative fondé sur l'intégration de contraintes multiples dans l'équation de Navier-Stokes (conservation de la masse, énergie et autres potentiels). Ce modèle permet de représenter des écoulements à petites ou grandes vitesses avec ou sans choc, la propagation d'ondes et le couplage monolithique fluide-structure.
- (ii) un modèle de tension capillaire basé sur la décomposition de Hodge-Helmholtz avec l'intégration de discontinuités dans l'équation de Navier-Stokes qui permet l'élimination de tout courant parasite.
- (iii) utilisation de la méthode VOF-SM étendue à un certain nombre de phénomènes physiques : écoulements de plusieurs phases, effets capillaires par des potentiels de type Lennard-Jones, diffusion de masse aux interfaces, etc.

Ces développements ont été soumis à des sollicitations importantes telles que celles issues de problèmes industriels proposées par nos collègues et partenaires d'entreprises associées au GDR (contrats avec AL et Arcelor-mittal notamment).

En parallèle, A. Berlemont (CORIA) a développé des approches mêlant méthodes VOF, Ghost Fluid et Level Set afin de traiter les écoulement liquide-gaz en présence d'un fort cisaillement et d'un grand rapport de densité. En effet, lorsque le cisaillement entre la phase liquide et la phase gazeuse est relativement faible, le rapport de densité entre le liquide et le gaz n'est pas un paramètre contraignant pour la stabilité des simulations. Ce n'est plus vrai si le cisaillement entre la phase gazeuse et la phase liquide est important, et généré par une vitesse du gaz beaucoup plus importante que celle du liquide. Des calculs préliminaires d'une injection assistée font aussi état d'instabilités numériques dès que le rapport de densité dépasse 50 environ. Les spécificités des développements numériques effectués au CORIA permettent ces comportements parasites. La figure 1 illustre les instabilités d'une nappe plane cisailée obtenues dans une simulation faite au CORIA.

Du point de vue de la modélisation des films liquides, deux approches ont été suivies. L'une consiste à partir d'un écoulement en géométrie confinée (canal plan ou incliné) soit un bicouche liquide-gaz et laminaire. Elle a été développée dans la thèse de Marc Boutounet [54] à l'IMT et au cours du postdoc de Georg Dietze [30] (FAST). La deuxième approche consiste à considérer l'interaction d'une couche limite avec le film liquide (Marc Boutounet, IMT). Enfin, une suite logique est la prise en compte de la turbulence dans la phase gazeuse, l'objectif étant de s'affranchir des limitations des approches de Miles (influence de la turbulence limitée au profil de vitesse) et faibles déformations de l'interface, qui conduisent à une modélisation à une phase (travaux de Kalliadasis et Tseluiko (<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/resume-Kalliadasis-090312.php>)). Les travaux de Jean-Paul Vila et Amélie Rambaud (postdoc IMT débutée en février 2012) vont dans ce sens. Une thèse a débuté à l'ONERA (G. Lavalles sous la direction de C. Laurent et F. Charru) et vise à développer une modélisation à deux-moments de type Saint-Venant prenant en compte la turbulence du gaz. Toujours à l'ONERA, des travaux plus spécifiques ont été menés pour des applications industrielles dans le cadre du projet CRESCENDO. Le travail a consisté à implémenter dans le solveur FILM, développé par

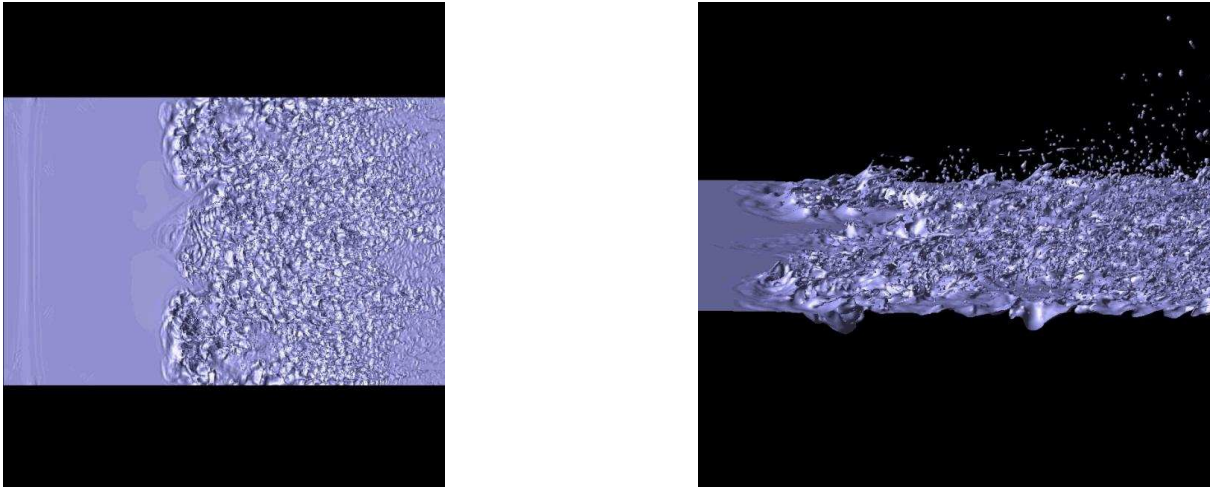


FIGURE 1 – Nappe d’eau ( $U = 0.25\text{m/s}$ ) cisailée par un écoulement d’air ( $U = 25\text{ m/s}$ ) (Vue de dessus et de côté).

l’ONERA, les fonctionnalités nécessaires à la simulation du ruissellement sur les aubes lors de l’ingestion d’eau dans les turbomachines.

*projets réalisés*

- Projet CARNOT (2009-2012, ONERA) : étude des films cisailés (études expérimentales et implémentation de nouveaux modèles dans le solveur FILM du code CEDRE)
- Projet européen CRESCENDO(2009-2012, ONERA) : implémentation dans le solveur FILM de fonctionnalités spécifiques aux turbomachines pour la simulation du ruissellement sur les aubes
- ANR MODEMI, MODélisation Multiéchelle d’Interfaces. (I2M-TREFLE)
- ANR PLAYER, Particle Layer, interactions de particules non sphériques avec des couches limites turbulentes. (I2M-TREFLE)
- Contrats ARCELORMITTAL sur l’essorage pneumatique de films de zinc sur des tôles d’acier (I2M-TREFLE)
- Contrat AIR LIQUIDE sur l’écoulements de films dans les assemblages de liquéfaction de gaz. (I2M-TREFLE)
- Thèse CIFRE de Nicolas Kofman (début sept. 2011) portant sur les phénomènes d’engorgement en partenariat avec Air Liquide
- Contrat GEOSERVICES-SCHLUMBERGER sur le transport en pipe de gaz par et d’huile en films et gouttelettes. (I2M-TREFLE)
- ANR “Modèles Numériques” MODEMI (MODElisation Multiechelle des Interfaces 2011- 2014) (CORIA, DALEMBERT)

### 5.3 Arrachage et formation de films

La thématique de l’arrachage d’un film est fortement liée à celle de l’atomisation et du cisaillement d’une interface. Elle concerne CORIA, DALEMBERT, IRPHE, IVK, LEGI.

Les processus d'atomisation et de dynamique de goutte (splash) ont été très étudiés par voie numérique (GERRIS) à DALEMBERT (Ch.Josserand, Daniel Fuster, J.Hoepfner, S.Zaleski). Ils sont aussi l'objet de travaux au CORIA dans le contexte des injecteurs et au LEGI dans le contexte des jets liquide avec co-courant gazeux (une thèse en cours). La simulation instationnaire de l'écoulement diphasique dans un injecteur "triples disques" a été menée au CORIA. Les champs de vitesse instantanés sont les conditions d'injection pour la simulation. Les résultats montrent un très bon accord entre les simulations et les expériences. En particulier, l'angle d'ouverture du jet obtenue par la DNS est de  $26^\circ$ , très proche de la valeur expérimentale,  $24^\circ$  (les simulations ne prenant pas en compte l'écoulement interne instationnaire conduisaient à un angle de  $41^\circ$ ).

L'activité du LEGI concernant la simulation d'écoulements multiphasiques s'est recentrée dans le cadre du groupement d'intérêt scientifique (GIS) "SUCCES" du CNRS. L'objectif de ce GIS est de promouvoir la simulation numérique de haute performance et de mettre en commun les efforts de développements. Des développements méthodologiques ont été menées en collaboration avec le LJK (Grenoble) pour développer une approche hybride pour le transport d'un scalaire à faible diffusivité [78]. Cette approche va être étendue au cas diphasique, où la "level-set" transportée pour identifier la position de l'interface est le cas limite d'un scalaire de diffusivité nulle.

Notons le travail commun de C. Josserand (DALEMBERT) et Laurent Duchemin (IRPHE) portant sur les instants courts de l'impact d'une goutte sur une surface solide lisse avec pour enjeu la compréhension de la disparition de la corolle habituellement observée lors de ces impacts lorsqu'on diminue d'environ deux tiers la pression ambiante. Cette étude [39, 62] prend en compte les effets de lubrification de la couche d'air sous la goutte au moment de l'impact et tendent à montrer que cette couche d'air atteint une épaisseur tellement faible – de l'ordre du libre parcours moyen dans le gaz – que le liquide mouille le solide aux temps courts et ainsi, que l'étude pertinente pour comprendre la disparition de la corolle aux temps longs est celle d'une lame de liquide très fine s'étalant à grande vitesse sur un solide, tout en restant en contact avec ce dernier. L'apparition de la corolle est due aux effets inertiels au bord de cette nappe de liquide et sa dynamique dépend de la densité du gaz et donc de la pression ambiante. Maurice Rossi (DALEMBERT) a étudié les processus d'atomisation à partir d'une étude exhaustive des propriétés de stabilité d'un écoulement de couche de mélange diphasique.

À l'IVK, une série d'études ont porté sur l'interaction entre un film liquide et un jet et/ou en présence de cisaillement. L'étude des instabilités et apparition de l'éclaboussement d'un film liquide impacté par un jet d'air (thèse K. Myrillas) s'inscrit dans la problématique de l'essorage par jet d'air lors du revêtement d'une surface mobile par un fin film liquide. Lors de cette interaction des instabilités de surface se forment sur le film liquide. Elles peuvent engendrer le détachement de gouttelettes qui dégrade la qualité du produit fini. L'objectif de l'étude est de comprendre les mécanismes physiques qui gouvernent le comportement du film liquide et de trouver des techniques pour retarder l'apparition de l'éclaboussement. Les deux approches, expérimentale et simulation numérique sont suivies. Une solution impliquant un design original de la tuyère d'essorage est proposée. Un deuxième problème traité à l'IVK concerne la naissance de l'atomisation d'un film liquide cisailé au voisinage d'une marche descendante (thèse de E. Bacharoudis).

Enfin au LEGI, l'atomisation d'une nappe liquide cisailée est étudiée

expérimentalement (thèse de S. Marty, cf. section 5.2). Des mesures de tailles/vitesses de gouttes ont été entreprises sur le dispositif expérimental du LEGI par une méthode de type ILIDS (interférométrie défocalisée) : cette méthode s'est avérée inadaptée à proximité de l'interface. Un nouveau dispositif expérimental a été construit au LEGI dans lequel l'écoulement est plus uniforme. Ce nouveau dispositif permettra de tester les moyens de mesure disponibles (PDI, sonde optique) dans des conditions plus favorables, afin d'évaluer leurs performances en particulier sur la mesure du flux liquide au sein d'un spray.

*projets réalisés ou en cours*

- DARI program 2011/12 : Demande d'Attribution de Ressources Informatiques (Daniel Fuster)
- Contrat de recherche avec PSA (Christophe Josserand José-Maria Fullana DALEMBERT)
- Contrat de recherche avec Air Liquide (Stéphane Zaleski DALEMBERT)
- ANR VAA (Stéphane Zaleski, Jerome Hoepffner, Daniel Fuster DALEMBERT)
- ANR "Modèles Numériques" MODEMI (MODElisation Multiechelle des Interfaces 2011- 2014) (CORIA, DALEMBERT)
- ANR blanche "VAA" (Atomisation Assistée Virtuelle 2010-2013) (CORIA, LEGI)
- Projet Européen FIRST (Fuel Injector Research for Sustainable Technology 2010-2013) (CORIA).
- projet PRACE "X-VAMPA" (LEGI)

## 5.4 Mouillage

Le problème du mouillage est le problème du déplacement d'un film présentant des zones sèches, d'un front envahissant un substrat sec et, en général, de tout déplacement de lignes de contact (étalement de gouttes, gouttes glissant sur un plan incliné etc.). Dans cette thématique rentre également les problèmes de rupture de film et de changement de topologie Cette thématique du mouillage a grandi en importance au fil des réunions du GdR. FAST, IMT, MSC, ULB et LRGP ont principalement contribué à cette thématique. Les journées des 8 et 9 mars 2012 regroupent un ensemble important de contributions (<http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/journees-0809-03-12.php>).

Les travaux ont portés sur les gouttes en mouillage partiel et glissant sur substrat solide (Adrian Daerr et Laurent Limat MSC). Les études expérimentales montrent que des lois de fronts de type Cox-Voinov, fournissant l'angle de contact apparent en fonction du nombre capillaire, étaient en bon accord avec les données expérimentales. La formation de singularités en pointe à l'arrière de gouttes en mouvement (Daerr, Limat MSC) a été comparée à des expériences menées à l'université de Twente (Snoeijer, Peters, Winkel) sur une expérience reproduisant la technique de lithographie laser assistée par mouillage (gravage laser de substrats par un faisceau mobile focalisé par une goutte liquide entraînée par l'optique de gravage). Des similitudes étonnantes ont été relevées, qui ouvrent ces études fondamentales de singularité vers des applications techniques (société ASML) [104]. Une retombée fondamentale de ces travaux est également la possibilité (pour les nanosciences) de caractériser à l'échelle nanométrique le mouillage par des observations de formes d'interfaces faites à des échelles micro ou millimétriques.

La dynamique de ruisselets liquides a été l'objet d'étude par le MSC (A. Daerr,

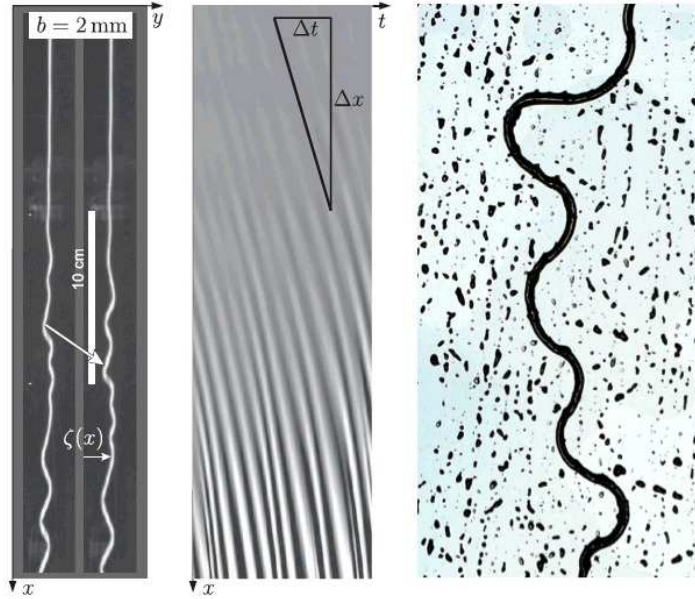


FIGURE 2 – A gauche, les méandres d’un ruisseau confiné entre deux plaques parallèles en situation de mouillage total présentent une vitesse de phase non nulle dirigée vers l’aval. Au centre, les niveaux de gris proportionnels à l’excursion latérale permettent de visualiser cette vitesse de phase. A droite, méandres stationnaires formés en mouillage partiel sur une plaque inclinée. La ligne blanche au centre du ruisseau, qui représente la ligne de plus forte épaisseur, permet de visualiser l’asymétrie du ruisseau et de la corrélérer aux méandres (Images A. Daerr, S. Couvreur et al.)

cf. figure 2). L’existence d’un mécanisme universel, qui combine friction des lignes de contact et accélération du liquide dans les courbes, a été établie [104]. Ce mécanisme serait responsable de l’instabilité de méandrage, et expliquerait sa disparition en l’absence de friction de ligne sur un substrat super-hydrophobe (avec P. Brunet) et clarifierait l’influence du bruit de la surface solide sur la genèse de l’instabilité (avec S. Couvreur) [106]. Le déplacement de lignes de contact en présence d’évaporation, que ce soit en mouillage partiel ou total, en présence de fluides complexes (e.g. solutions polymères) a généré un fort intérêt tant expérimental que théorique (FAST, MSC et ULB). Une phénoménologie intéressante a été observée avec des phénomènes de stick-slip. Il semble possible d’étendre les lois de front de type Cox-Voinov à ce cas de figure (C.-T. Pham, MSC). Ces travaux sont utiles pour les problèmes de transferts en présence de films.

Enfin, dans le cadre de la modélisation et des approches numériques des déplacements de films en présence de lignes de contact, il n’existe pas à ce jour d’approches réellement satisfaisantes. La plupart des études numériques introduisent une régularisation à la ligne de contact sous la forme d’un glissement, un film précurseur et/ou une pression de disjonction. Si chacune de ces régularisations a un sens physique, en pratique elles sont très surestimées (par exemple, l’épaisseur des films précurseurs utilisés par les approches numériques est grossièrement surestimée). Par ailleurs, les hypothèses de la lubrification classique sont en défaut pour les grands angles de contact. Une première



réponse à ce problème a été apportée par Snoeijer (MSC) [107]. Les travaux de Marthe Roux (IMT) [54] ont visé à poser rigoureusement les lois de fronts de type Cox-Voinov dans le cadre général en faisant seulement l’hypothèse d’un glissement microscopique à la ligne de contact. Le but affiché est de construire des modèles de films s’étendant jusqu’à la ligne de contact. Bien qu’inparfaite, cette étude montre qu’un modèle de films de type Saint-Venant avec glissement macroscopique peut être raccordé avec une loi de fronts même dans le cas des angles de contacts importants.

Enfin, notons les travaux du LRGP portant sur les écoulements diphasiques à différentes échelles, tels la formation de bulles et de gouttelettes présentant une dynamique d’amincissement d’un film avant la rupture. L’instabilité interfaciale entre deux liquides immiscibles en écoulement dans un microcanal a aussi été étudiée.

Dans une autre direction, un effort important a été fait au MSC sur le mouillage de substrats liquides (Lebon, Limat, Boniface, Sébilleau, procédé float, avec Saint Gobain), où l’impact d’un liquide très visqueux sur un bain en mouvement conduit à des formes de ligne de contact non triviales. Le dépôt de particules par séchage et retrait simultané de liquides a été étudié sur des gouttes posées (Berteloot), des plaques tirées hors d’un bain (Berteloot et Daerr), et plus récemment sur des substrats microtexturés (Brunet).

Pour conclure, citons les travaux menés au FAST et à l’ULB portant sur la dynamique de lignes de contact en présence d’évaporation ou de condensation. Au FAST, ont été menés plusieurs travaux expérimentaux et théoriques pour des processus où l’évaporation a lieu dans un gaz inerte (transferts limités par la diffusion dans le gaz). Un modèle prenant en compte explicitement le couplage entre liquide et gaz (“1.5 sided model”), sans hypothèse a priori sur la forme du ménisque ou le flux d’évaporation, a été développé.

Dans le cas d’un fluide pur, la configuration étudiée est celle d’un ménisque en mouillage total, l’épaisseur du film précurseur étant déterminée par la pression de disjonction. Ce modèle a permis de décrire le profil local du ménisque et du flux d’évaporation. Une analyse en loi d’échelles a permis de déterminer le comportement de l’angle de contact apparent et de le comparer à des modèles antérieurs (A.M.Cazabat et L.Limat) [27].

Les résultats récents obtenus à l’ULB concernent l’effet de la courbure macroscopique [148], la compétition entre régimes de films ultra-minces au voisinage de la ligne de contact [149], l’analyse des avantages et limitations du “paradigme de de Gennes” fondé sur la pression de disjonction pour la relaxation des singularités de ligne de contact mobile [150], le rôle des fluctuations de pressions en phase vapeur [151], et le rôle fondamental de l’effet Kelvin, qui permet le mouvement de lignes de contact sans aucune singularité que ce soit en mouillage total ou en mouillage partiel [152]. En parallèle, une méthode de type “interfaces diffuses” (équation de Cahn-Hilliard) a été utilisée afin de simuler le mouvement d’un ménisque dans un microcanal en présence d’hétérogénéités chimiques, ce qui a permis de lier l’hystérésis d’angle de contact à l’amplitude des hétérogénéités.

#### *Projets*

- ANR Freeflow (programme blanc 2011-2014) avec MSC sur la dynamique du non-mouillage (mouvement presque sans parois, dynamique de liquides presque sans frottement).
- projet ANR Compwet (MSC) sur le mouillage de fluides ou substrats complexes avec effets de déformation du substrat ou d’élasticité de la surface liquide, chargée en

surfactants.

- contrats avec Saint-Gobain Recherches (MSC) sur la dynamique d’une feuille liquide à la surface d’un bain en écoulement (2006-2009, 2010-2013), et sur la stabilité de rideaux liquides verticaux (2012-2013).

## 5.5 Transferts

La thématique des transferts a été relativement peu abordée au cours des travaux du GdR. Cependant ce point revêt un intérêt applicatif fort pour l’industrie (Air-Liquide, Arcelor-Mittal et Onera). Cependant, un nombre important de travaux ont concernés les effets thermocapillaires (Marangoni et Bénard-Marangoni) et l’effet Leidenfrost tant expérimentaux (Arcelor-Mittal, LEMTA, ULB) que numérique et théorique (IMFT, ULB). Notons également les travaux d’Adrien Aubert (IRPHE) dont la thèse de doctorat a porté sur les transferts thermique dans un film soumis à un transfert radiatif, ainsi que l’exposé par Georg Dietze des problématiques liés au transfert dans les films ([http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/Dietze\\_GDR\\_Frejus\\_2012.pdf](http://www.fast.u-psud.fr/~ruyer/Dietze_GDR_Frejus_2012.pdf)) où les mécanismes d’intensification du transfert sont encore mal connus.

À l’ULB, les travaux de l’équipe TIPs ont principalement portés sur l’influence des effets thermocapillaires concernant a) la formation d’ondes thermiques et les instabilités de type Bénard-Marangoni à la surface d’un liquide volatil et b) la formation de films libres assistée par effet thermocapillaire. Dans le cas a) des ondes thermiques ont été mises en évidence expérimentalement et en condition de microgravité à l’interface entre un liquide volatil et un gaz en écoulement à débit et pression variables. Un seuil entre un régime quasi-périodique et un régime chaotique a été décelé [137]. Ces ondes trouvent leur origine dans l’effet thermocapillaire et peuvent avoir une influence non négligeable sur les transferts de masse et de matière aux interfaces. En parallèle, le seuil d’apparition de la convection de Bénard-Marangoni dans les couches de liquide qui s’évaporent a été analysé en détail et de manière quantitative. Un excellent accord entre théorie et expérience a été obtenu [138]. L’analyse des transitions entre régimes non-linéaires a permis d’identifier les mécanismes grâce auxquels le motif de convection cellulaire s’adapte lors de la diminution de l’épaisseur engendrée par l’évaporation [139]. L’étude de l’évaporation de liquides binaires a également permis de démontrer l’importance de la convection de Marangoni solutale [140], et démontré que des modèles simples fondés sur une approche “one-sided” peuvent être mis au point tout en tenant compte des processus prenant place en phase gazeuse [141], comme dans le cas des liquides purs [142]. Dans le cas b), la formation d’un film liquide tiré à partir d’un bain et stabilisé par les effets thermocapillaires a été étudié théoriquement. Une loi d’échelle régit l’épaisseur du film obtenu [143]. L’influence des effets secondaires comme l’inertie, la gravité et les transferts thermiques ont été étudié [144]. Ce projet trouve son application dans la fabrication de feuilles de silicium utilisés dans les panneaux solaires.

Dans le même registre, une autre série de travaux menés au FAST (B. Guerrier et F. Doumenc) a concerné le séchage de fluides complexes (un solvant volatile plus un soluté) en présence d’un ménisque. Expérimentalement, le régime évaporatif à faible nombre capillaire (en deça du régime de Landau-Levich) a été exploré [22]. Les travaux ont porté plus particulièrement sur le régime périodique apparaissant dans certaines configurations

(stick-slip) et conduisant à un dépôt sec régulièrement structuré [25, 29]. Un modèle hydrodynamique prenant en compte le couplage film/gaz et les variations des propriétés de la solution en fonction de la concentration en soluté (notamment viscosité et pression de vapeur saturante) a été développé. Il permet à l’heure actuelle de rendre compte de l’évolution de l’épaisseur du dépôt en fonction du flux d’évaporation et de la vitesse du substrat [20].

Enfin, une thèse (LEMETA et ArcelorMittal) a commencé pour comprendre le rôle de l’état de surface des aciers ArcelorMittal sur la transition ébullition en film-ébullition de transition lors du refroidissement par eau (thèse cofinancée par la région Lorraine et ArcelorMittal et débutée en septembre 2012. Doctorant : Guillaume Maigrat). Différents états de surface observés sur les lignes de production ArcelorMittal sont reproduits en laboratoire puis l’épaisseur de la couche de vapeur est mesurée en fonction de la température du substrat.

#### *Projets en cours*

- projet ANR IDHEAS (Interaction of Droplets with HEATED Surfaces). (LEMETA, IMFT, ONERA et ArcelorMittal) qui s’intéresse au refroidissement des plaques d’acier par impact de spray (effet Ledenfrost).
- Une thèse cofinancée par la région Lorraine et ArcelorMittal a débuté en septembre 2012 (Doctorant, Guillaume Maigrat) sur la thématique du “remouillage des aciers à hautes températures” (LEMETA, ArcelorMittal).
- Une thèse financée par Vallourec sur la thématique de l’ “Étude et la simulation des processus de trempe à l’eau de tubes en acier sans soudure” (LEMETA, Vallourec).

#### *Projets à venir*

- Collaboration avec l’Institut Jean Lamour (IJL UMR 7198) a été initiée sur “l’influence de la microstructuration des parois sur le mouillage et les transferts” (LEMETA)

## **5.6 Bilan général**

Les objectifs du GdR FILMS à sa création étaient de i) fédérer la communauté scientifique travaillant sur les films liquides, les interfaces, les transferts etc. ii) répondre aux différents verrous technologiques rencontrés (déplacement d’une ligne triple, modèles de films en présence d’une géométrie complexes, d’une rhéologie complexe, en présence de cisaillement, prise en compte des transferts, du changement de phase, du décollement d’un film d’une paroi, impacts/interactions films/parois, atomisation etc.), iii) augmenter la porosité entre milieux industriel et universitaire. A ces trois objectifs, s’est rapidement greffé le besoin de contribuer à la formation des doctorants.

La bonne participation aux différentes réunions du GdR et le bon retour de la part des participants indiquent un résultat satisfaisant quant à l’objectif (i). Quant à l’objectif (ii), il serait vain de penser que celui est rempli en 3 ans de travail. Cependant, le compte-rendu d’activité présenté ci-dessus indique que des pistes ont été ouvertes et qu’un certains nombres de questions sont en passe d’être répondues.

Comme souvent, les travaux entrepris ouvrent des perspectives nouvelles et de nouveaux questionnements dont une partie se trouve exposée dans les différents projets de

recherche accompagnant la présentation de chaque partenaire et rassemblés en annexe (§ 7). Les thématiques du GdR FILMS qui vont prendre le plus d'importance en cas de renouvellement sont probablement celles liées au cisaillement, à l'arrachement et aux transferts. En particulier, les problèmes liés à la prise en compte des changements de phase sont cruciaux pour les applications industrielles (par exemple pour le traitement des aciers et le problème du givrage en aéronautique). Nul doute que les prochaines réunions du GdR seront porteuses d'échanges fructueux dans cette direction.

Quant à l'objectif (iii), le bilan du GdR FILMS est mitigé. Les industriels PSA et Renault n'ont pas trouvé leur compte dans le fonctionnement du GdR. Pourtant, Arcelor-Mittal et Air Liquide ont apprécié le caractère "amont" des travaux présentés et conduits au sein du GdR. Enfin, l'intérêt porté au projet par deux nouveaux industriels (Airbus et Vallourec) est un point positif.

## 6 Missions

Le GdR FILMS n'a pas vocation à se substituer aux laboratoires d'accueil mais se doit de faciliter les échanges et d'orienter les débats de la communauté scientifiques afin de répondre au mieux aux objectifs décrits ci-dessus (§ 5.6).

Le GdR s'efforcera donc de multiplier les réunions de travail (au moins deux par an sur quatre jours minimum) afin de permettre à chaque partenaire de participer au moins une fois par an. Le GdR FILMS participera au montage d'au moins une école d'été au cours des 4 ans qui viennent. Le GdR pourra participer également à la formation doctorale en participant à des frais d'inscription à des congrès.

Enfin, la mobilité entre équipes de recherche sera encouragée par une participation financière aux frais engagés.

## 7 Annexe : Présentation de chaque équipe

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

### 7.1 CORIA

Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (UMR 6614)  
Refs. [11–14]

#### Personnels impliqués

A. Berlemont DR2 CNRS, T. Ménard MdC, 1 Doctorant, 2 ingénieurs de recherche contractuels

#### 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.

## 7.2 DALEMBERT

Institut Jean-Le-Rond d'Alembert (UMR 7190)

Refs. [33–44]

### Personnels impliqués

Daniel Fuster (CR CNRS), Christophe Josserand (DR CNRS), Maurice Rossi (DR CNRS), Stéphane Zaleski (Prof UPMC), Jérôme Hoepffner (MdC UPMC)

### 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

L'accroissement des ressources informatiques permet de simuler des cas complexes. Une partie importante des efforts de recherche sur l'atomisation sera focalisée sur l'étude détaillée du couplage entre atomisation et turbulence comme l'étude de la rupture de ligaments et gouttes dans un champ turbulent en vue de prédire la distribution des gouttes. Toutes ces études visent à améliorer la compréhension physique de l'atomisation ainsi qu'à développer des méthodes LES et RANS. Un axe important de recherches récentes concerne le couplage entre le gaz extérieur et le film en mouvement. Un autre axe concerne la vérification numérique de la théorie de turbulence d'ondes. Un dernier sujet qui sera initié a trait aux problèmes de transferts thermiques dans des configurations similaires à Rayleigh-Bénard mais avec évaporation et cisaillement.

## 7.3 FAST

Fluides Automatique et Systèmes Thermiques (UMR 7608)

Refs. [16–32]

### Personnels impliqués

Georg Dietze (CR CNRS), Frédéric Doumenc (MdC UPMC), Béatrice Guerrier (DR CNRS), Nicolas Kofman (doctorant), Sophie Mergui (MdC UPMC), Christian Ruyer-Quil (MdC UPMC), Éric Sultan, (MdC UPMC)

### 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) [16]. Cette approche s'étend à différentes géométries (écoulement le long d'un cylindre [17]), et différentes rhéologies (rhéologie en loi de puissance [30]).

D'autre part l'équipe Écoulements et Transferts (B. Guerrier et F. Doumenc) développe une approche expérimentale et numérique sur l'étude des instabilités Rayleigh-Bénard-Marangoni en régime transitoire [20, 21], ainsi que sur la formation de dépôt par évaporation et démouillage contrôlés pour des fluides complexes (solutions polymères ou suspensions colloïdales).

### Projet

L'étude des écoulements de films liquides en présence d'un co ou contre-écoulement gazeux est un point clef dans l'optimisation des échangeurs ou réacteurs en génie chimique. Une thèse CIFFRE financée par Air Liquide (Nicolas Kofman) a commencé en octobre 2011, avec pour objectif la compréhension des phénomènes d'engorgement. Un dispositif expérimental (Sophie Mergui) a été réalisé, tout d'abord dans le cadre d'un écoulement de films liquides par gravité. Ce dispositif expérimental est en cours de complétion afin de contrôler un contre-écoulement gazeux. Une méthode optique développée au laboratoire par F. Moisy and M. Rabaud (Schlieren synthétique [32]) a été adaptée au problème étudié. Cet effort expérimental est complété par une approche de modélisation fondée sur la méthode aux résidus pondérés [30]. Les calculs numériques semblent indiquer que l'apparition du phénomène d'engorgement puisse être repoussé en contrôlant l'excitation du film liquide.

Un autre axe de recherche important est celui des écoulements gravitaires de fluides non-Newtoniens avec pour application les laves torrentielles. Le travail de Symphony

Chakraborty (thèse soutenue le 2 juillet 2012) se poursuit avec l'étude des films de fluides élasto-visco-plastiques. Nous participons au montage d'un projet ANR (SWIFtnNEW, porteur V. Botton).

Enfin, dans la thématique du déplacement de lignes de contact en présence de changement de phases, nous (B. Guerrier et F. Doumenc) poursuivrons des travaux portant sur l'évaporation au voisinage d'une ligne de contact ou d'un ménisque : dans le cas d'un liquide pur, modélisation avec couplage film/gaz et introduction des effets thermiques en configuration de mouillage total ou partiel ; dans le cas du séchage de fluides complexes, approche expérimentale et théorique pour la compréhension du phénomène d'auto-structuration du dépôt.

## 7.4 IMT

Institut de Mathématiques de Toulouse (UMR 5219) [51–58]

### Personnels impliqués

F Chazel (MdC INSA), K. Domelevo (MdC UPS, HdR), J Monnier (Pr INSA) Un IR CNRS , J.-P. Vila (Pr INSA), P. Noble (Mdc Lyon I, HdR) en collaboration directe avec J.-P. Vila, Philippe Poncet (Mdc INSA) et David Sanchez (Mdc INSA), R. Chatelin (doctorant).

### Moyens

Code Dassflow (<http://www-gmm.insa-toulouse.fr/~monnier/DassFlow/>) : "Data Assimilation for Free Surface Flow" (J. Monnier) ; Codes Navier Stokes à surface libre (interface diffuse).

### 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. Jérôme Monnier travaille aux interfaces modélisation mathématique (asymptotiques) – algorithmique numérique – calcul, avec un intérêt particulier pour l'assimilation de données – analyses de sensibilité pour des écoulements géophysiques (hydraulique, glaciologie).

### Projet

Dans le cadre du GDR FILMS, nous proposons de poursuivre nos travaux sur 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 analysons deux types de situations : Écoulement laminaire de fluides minces. 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 [54] 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.

Les dérivations asymptotiques originales décrites ci-dessus sont et seront par ailleurs développées dans un contexte géophysique multi-régimes et avec changements de conditions aux limites au fond. L'application particulièrement visée sont les écoulements multi-échelles de glaciers (calottes polaires ou glaciaires), et la recherche d'un modèle unifié multi-régime calotte posée – fleuves de glaces – plate-formes flottantes. Mieux comprendre ces écoulements multi-échelles et quantifier à terme un bilan de masse (“Sea Level Rise”) passent par une modélisation globalement consistante et par la prise en compte de la singularité à la ligne d'échouage (singularité semblable à la ligne triple en micro-fluidique). Aussi, les analyses de sensibilité permettent tant de mieux comprendre nos nouveaux modèles que la dynamique même des écoulements.

## 7.5 IMFT

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (UMR 5502)

Refs. [45–49]

### Personnels impliqués

Projet numérique : D. Legendre, Pr., J. Magnaudet, DR, S. Tanguy MdC, D. Fabre MdC, A. Pedrono, IE

Projet expérimental : F. Charru Pr., C. Colin Pr., V. Roigt Pr., P. Ern DR, J. Sebilliau mdC, P. Tordjeman MdC, 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, dans le cadre d'une thèse de doctorat menée en collaboration avec l'entreprise TOTAL en 2006, se poursuit actuellement. 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.

## 7.6 IRPHE

Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre (UMR 7342)  
Refs. [59–62]

### Personnels impliqués

3 enseignants-chercheurs (Laurent Duchemin, Emmanuel Villiermaux, Nicloas Vandenberghe) (équipe “Fragmentation, Mélange et Combustion”). 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 précédent travaux de E.Villiermaux 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 démouillage 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.

## 7.7 I2M - TREFLE

Intitut de Mécanique et Ingénierie Mécanique, Dpt. Transferts Écoulements Fluides Énergétique (UMR 5295)  
Refs. [63–66]

### Personnels impliqués

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

## Moyens

un supercalculateur parallèle : cluster 256 processeurs Altix ICE 8200 de Silicon Graphics (SGI) d'une puissance théorique de 3 Tflops.  
code Aquilon (maintenant appelé Thétis).

## Ensemble de compétences

Les compétences du groupe MFN du laboratoire TREFLE sont centrées sur la modélisation physique des écoulements diphasiques compressibles ou incompressibles 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 structurées. Des modèles de représentation des effets capillaires ont été élaborés à partir de la seule connaissance de l'angle de contact statique ; ces modèles ont été testés en présence d'effets inertiels importants.

## Projet

Les modèles et méthodes mis en oeuvre 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.

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 Echelles. 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 ont été 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. Les résultats de simulations ont pu être comparés à des expériences disponibles auprès de partenaires industriels, à des cas tests utilisés par la communauté scientifique du domaine des écoulements à surfaces libres.

## 7.8 LadHyX

Laboratoire d'hydrodynamique de l'École polytechnique (UMR 7646)  
Refs. [67, 68]

## Personnels impliqués

Paul Manneville DR

## Moyens

Moyens de Calcul locaux et IDRIS

## Projet

Développement de modèles visant à abaisser la dimensionnalité 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.

## 7.9 LEGI

Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (UMR 5519)  
Refs. [69–79]

### Personnels impliqués

Guillaume Balarac MdC, Mickaël Bourgoïn CR, Alain Cartellier DR, Christophe Corre Pr, Jean-Philippe Matas MdC

### Moyens

- banc d'atomisation assistée plane, banc d'atomisation assistée axisymétrique
- dispositif expérimental "roue tournante"
- 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

**Atomisation** : atomisation effervescente en tuyère diphasique à jet de brouillard, atomisation sous pression, atomisation assistée

**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

### Projets

**Instabilité d'un film cisailé, arrachement de gouttes :**

Nous souhaitons varier de façon systématique l'épaisseur du film liquide, afin de tester

l'influence de ce paramètre sur la fréquence de l'instabilité de cisaillement et sur le flux de gouttes arrachées. Nous étudierons également les changements de spectre des positions d'interface, afin de déterminer comment la transition convectif/absolu identifiée à grande épaisseur liquide est affectée. Concernant l'arrachement de gouttes, un nouveau dispositif expérimental a été construit dans lequel l'écoulement est plus uniforme que dans le dispositif couche de mélange : ce nouveau dispositif permettra de tester les appareils de mesure disponibles au laboratoire (PDI, sonde optique) dans des conditions plus favorables, afin d'évaluer leurs performances en particulier sur la mesure du flux liquide au sein d'un spray.

#### **Éclaboussures générées par une roue tournante :**

Nous débutons actuellement un projet de recherche (en partenariat avec PSA) sur la caractérisation des mécanismes d'éclaboussures résultants de la rotation d'une roue semi-immersée. Ce travail, essentiellement expérimental, vise à identifier les mécanismes en jeu (entraînement du film d'eau, création de ligaments par instabilité de Rayleigh-Taylor, fragmentation par instabilité Rayleigh-Plateau, effets de sol, effets aérodynamiques, etc.) ainsi que leur enchaînement et les paramètres à prendre en compte en vue de proposer in fine des stratégies de modélisation pertinentes, notamment pour des applications automobiles.

#### **Simulation d'écoulements multiphasiques (Balarac & Corre) :**

Le LEGI va entamer une collaboration de recherche avec un partenaire industriel portant sur la simulation d'un dispositif de séparation air/huile. Ce dispositif, de type séparateur centrifuge à débit entrant axial, fait notamment apparaître un film d'huile sur paroi mobile, à évacuer de façon optimale. Des expériences sont programmées dans le cadre de ce projet de recherche (projet de thèse CIFRE) qui va donc constituer pour l'équipe MoST du LEGI le support privilégié de ses activités futures au sein du GdR FILMS. En particulier, les interactions scientifiques au sein du GdR seront utiles pour définir les choix de modélisation qui devront être opérés dans l'outil de dimensionnement prévu ; des confrontations calcul/expérience permettront de valider ces choix et de calibrer les modèles développés et mis en œuvre.

## **7.10 LEMTA**

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

Refs. [80–82]

### **Personnels impliqués**

Fabrice Lemoine, Pr, Guillaume Castanet, CR, Alexandre Labergue, MdC, Michel Gradeck, MdC, Ophélie Caballina MdC, Nicolas Rimbart, MdC, Guillaume Maigrat, doctorant.

### **Moyens**

1 caméra IR (Cedip Jade III), 1 caméra rapide Phantom V70, 1 chaîne LIF, 2 chaînes granulométriques (PDA et dispositif d'interférométrie en diffusion avant), 1 chaîne PIV

3D, 2 dispositifs de chauffage par induction.

### **Ensemble de compétences**

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

### **Projets**

Nos objectifs sont d'étudier la formation d'un film liquide sur une paroi chaude et ce lors de l'impact périodique d'un ou de plusieurs trains de gouttes monodispersées, de mesurer les transferts de chaleur associés ainsi que d'autres grandeurs qui permettront la modélisation de ces interactions film/paroi (épaisseur de film liquide et vapeur, température du liquide, granulométrie et température des gouttes réfléchies). Une collaboration avec l'Institut Jean Lamour (IJL UMR 7198) de Nancy permettra de faire ces mesures sur des parois dont la structure pariétale sera contrôlée et calibrée, permettant de faire évoluer les propriétés de mouillage de la paroi.

### **7.11 LMFA**

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (UMR 5509) Refs. [83–90]

### **Personnels impliqués**

Valéry Botton MdC, Séverine Millet MdC, Hamda Ben Hadid Pr, Daniel Henry DR, Hatem Allouche Doctorant. Collaboration avec R. Usha (IIT, Madras, Inde) et J. Hu (IAPCM, Beijing, Chine).

### **Moyens**

- plan incliné,
- diagnostics optiques divers (visualisation, PIV, Schlieren synthétique/BOS),
- fluides modèles transparents,
- rhéomètres,
- codes StarCCM+ et Comsol,
- codes de stabilité et continuation

### **Ensemble de compétences**

L'équipe dispose d'un dispositif expérimental correspondant à un plan incliné en verre de deux mètres de longueur, d'inclinaison variable, supporté par un châssis en rails d'aluminium, qui permet de créer un écoulement uniforme. Cet écoulement de faible épaisseur (de l'ordre de 2mm) peut être excité par des perturbations de fréquence variable, de façon à étudier ses propriétés de stabilité.

Différentes techniques optiques sont disponibles pour ces études : mesure en deux points de la déflexion d'un faisceau laser par l'interface pour caractériser l'évolution de

l'onde, mesure plus globale de l'onde en analysant la déformation apparente d'un motif tracé sur le fond observé à travers l'interface, mesures de vitesse par PIV.

La mesure de la viscosité des fluides rhéofluidifiants utilisés est possible, soit par l'utilisation de rhéomètres classiques, soit par une mesure d'atténuation d'onde en bassin.

L'équipe dispose de codes de stabilité permettant de calculer la stabilité d'écoulements à une ou plusieurs couches. Ces codes sont basés sur le développement des variables sous la forme de polynômes de Chebyshev. Elle dispose aussi de codes de simulation commerciaux (StarCCM+, Comsol) et de codes de continuation maison de type éléments spectraux.

## Projets

Nous cherchons à étudier expérimentalement la déstabilisation d'un écoulement sur plan incliné d'un fluide non-newtonien de type rhéofluidifiant. Nous utilisons du CMC (carboxyméthylcellulose), fluide transparent, utilisé en agro-alimentaire, soluble dans l'eau (chimie simple), qui a un comportement purement visqueux à faible concentration, et sa viscosité peut être modifiée en changeant sa dilution. La caractérisation par méthodes optiques de l'évolution des ondes générées par des perturbations de faible amplitude et faible fréquence doit permettre la détermination des seuils de déclenchement des instabilités (amplification de ces ondes), mais pour certains paramètres, l'évolution non linéaire de l'instabilité pourra aussi être observée dans la partie aval du plan incliné.

Les résultats expérimentaux seront comparés aux résultats issus des études de stabilité. Ces études de stabilité, réalisées en collaboration avec R. Usha et J. Hu, pourront prendre en compte des conditions plus variées, telles que la présence d'un fond poreux, la présence de deux couches liquides ou d'une couche poreuse et d'une couche liquide. La réalisation de simulations numériques ciblées pourra aussi être envisagée grâce aux codes commerciaux et aux méthodes de suivi d'interface développées dans l'équipe.

## 7.12 LRGP

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (UMR 7274)

Refs. [94–101]

### Personnels impliqués

Huai Zhi Li, Pr., Denis Funfschilling CR, Souhila Poncin MdC, Noël Midoux Pr., Oduile Carrier (doctorante) et Yining Wu (doctorant)

### Moyens

Bancs expérimentaux : Différentes installations pour des écoulements polyphasiques à différentes échelles : de 50  $\mu\text{m}$  à 1 m.

Outils de mesure : 1 PIV 3D, 1 micro-PIV 2D, 1 LDA 2D, 2 caméra rapides, 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

*Films ruisselants* Nous avons travaillé sur l'écoulement d'un film liquide ruisselant le long d'une surface inclinée, à l'aide de  $\mu$ -PIV et de caméra rapide, dans le cadre d'une colonne à garnissage pour l'absorption d'un gaz. Il est envisagé de poursuivre cette étude avec des surfaces de différents matériaux et géométries avec une considération pour la dynamique d'une ligne triple de contact.

*Microfluidique : rupture d'un jet* Nous avons aussi développé des travaux sur des écoulements diphasiques à différentes échelles. Notamment, Un écoulement co- ou contre-courant pourra se réaliser dans des microcanaux entre un liquide et un gaz ou un autre liquide immiscible 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  $\mu$ -PIV et caméra rapide, afin de valider une approche numérique telle que VOF. Nous envisageons d'étudier par exemple la rupture d'un jet en microfluidique. La rupture d'un jet liquide dans un autre liquide se fait par un mécanisme d'instabilité de Rayleigh-Plateau [96]. Cette rupture s'accompagne souvent de la formation d'une ou plusieurs gouttelettes satellites. De récents progrès en microfluidique permettent de mesurer le champ de vitesses dans le jet liquide dans des géométries microfluidiques aux conditions très bien contrôlées. Nos travaux préliminaires (cf. figure 3) ont montré que la force de tension de surface était le mécanisme dominant la dernière phase de rupture dans les conditions de l'expérience.

## 7.13 MSC

Matière et Systèmes Complexes (UMR 7057)

Refs. [102–108]

## Personnels impliqués

Laurent Limat, DR, Luc Lebon, CR, Adrian Daerr, MdC, Philippe Brunet, CR, Laurent Royon, MdC, Alexis Duchesne, doctorant, Stéphanie Couvreur, doctorante, Maxime Costalonga, doctorant, Tadashi Kajiya, postdoc, 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,

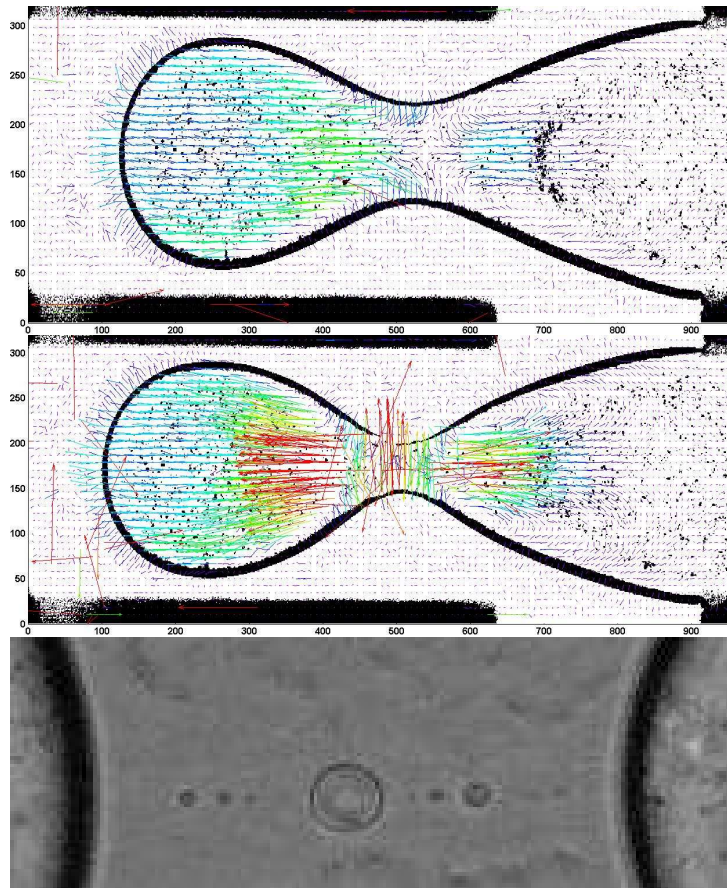


FIGURE 3 – Jet d'eau dans de l'huile de silicone de viscosité 5 mPa.s. Canal de section carrée de  $250 \mu\text{m}$ . a) et b) Champ de vitesse mesuré par PIV. c) nombreuses gouttelettes satellites formées après la rupture.

- accès à deux caméras rapides, et à des microscopes (dont un AFM).
- accès à une salle blanche, permettant la réalisation de substrats micro ou nano-texturés.

## 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 ou déformables par évaporation et démouillage simultanés (applications aux traitements de surfaces et à la synthèse de cristaux photoniques). Des effets subtils comme le gonflement du substrat, sa tension de surface, ses propriétés viscoélastiques modifient profondément la dynamique en menant à des comportements parfois inattendus [107] : stick-slip de la ligne de contact, comportement instationnaire avec transition dépendant du temps entre mouillage partiel et total, etc. . Enfin, nous explorons également, en collaboration avec des chimistes (C. Mangeney, ITODYS) le mouillage de surfaces fonctionnalisées avec pour objectif la mise au point de surfaces aux propriétés et applications nouvelles : surfaces à très faible hystérésis du mouillage, surfaces permettant le captage de la rosée, ou la climatisation passive (avec Daniel Beysens, PMMH ESPCI et LIED).

Récemment, nous avons entrepris également d'étudier la dynamique de liquides en situation de "non-mouillage" : lévitation sur film de vapeur, sur de l'air comprimé ou sur des films d'air entraînés par le liquide en mouvement lui-même, avec des effets parfois surprenants : mouvement orbital avec ou sans inversions de gouttes piégées dans un ressaut

circulaire (Duchesne et Lebon), formation d’anneaux liquides facettés par lévitation d’un tore [103], observation de gouttes oscillantes en étoile sur coussin d’air [105], etc. . . Ces situations pourraient permettre de développer de nouvelles techniques microfluidiques, surtout en les combinant à l’actuation acoustique d’interfaces qui commence aussi à se développer dans notre équipe (Brunet et Costalonga). Ainsi suite à l’arrivée de Philippe Brunet, nous entreprenons également de nous intéresser à des problèmes de contrôle d’interfaces par acoustique (guidage de gouttes par exemple en microfluidique).

## 7.14 PPRIME

Institut PPRIME (UPR 3346)

Refs. [91–93]

### Personnels impliqués

Frédéric Plourde DR, 1 doctorant

### Moyens

Calculateur parallèle à disposition de l’équipe.

### Projets

À partir d’une modélisation aux résidus pondérés dédiée à la caractérisation de films liquides s’écoulant sur une surface complexe, le modèle étant développé dans un repère curviligne, on s’intéresse aux effets du cisaillement par un écoulement de gaz en couplant le modèle de film liquide avec l’écoulement gazeux. Le code résout les équations de Navier-Stokes côté gaz en formulation faiblement compressible avec un traitement de frontière immergé. La philosophie du couplage est de traiter le film comme une frontière immergée au sein du domaine de calcul et l’interface liquide est donc “vue” comme une frontière sur laquelle les conditions aux limites sont appliquées. Le film liquide est “vu” par le gaz comme une condition à vitesse surfacique imposée tandis que les contraintes gaz à l’interface sont considérées comme conditions aux limites pour le modèle de film liquide. L’objectif est de traiter un tel couplage et de valider son potentiel en dans des cas académiques et des cas d’écoulements de film plus complexes. Un cas de validation avec des modélisations DNS est prévu.

## 7.15 Airbus

Airbus Operation SAS

Aerodynamic Methods & Tools – EGAMT2 (M0131/1)

316 Route de Bayonne

31060 TOULOUSE Cedex 09

## Personnels impliqués

Fabien Dezitter (R&T Technology Product Leader : “Icing Phenomena & Protection Systems”), Julien Cliquet

## 7.16 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, Frédéric Crayssac et Kateryna Voronetska (chercheurs), 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.

## 7.17 ArcelorMittal

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

## Personnels impliqués

Jean-Luc Borean (chef de service), Makhlouf Hamide (ingénieur de recherche), Ségolène Gauthier (ingénieur de recherche), Pascal Gardin (expert ArcelorMittal en mécanique des fluides)

## 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 ;  $T^{\circ}$  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.

## 7.18 EmmaH

Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (UMR 1114 EmmaH rattachée à l'INRA) Refs. [113–116]

### Personnels impliqués

Philippe Beltrame (MdC UAPV)

### Moyens

Pour la modélisation nous disposons du pool informatique de l'UMR sur le site de l'INRA Avignon. De plus, nous avons des logiciels de modélisation tels que Matlab, COMSOL, fluent... Des expériences pourront être menées pour confronter les résultats issus de la modélisation. Nous disposons de nombreux moyens dont la possibilité de réaliser des bancs expérimentaux, la tomographie 3D et temporelle des écoulements dans des colonnes de sol, des mesures *in situ* du transfert, etc...

### Ensemble de compétences

Capturer la dynamique des processus d'écoulements préférentiels notamment des écoulements à surface libre dans un sol hétérogène insaturé et comprendre le lien avec la structure 3D du réseau de macropores est l'un des domaines d'expertise de l'équipe "impacts de pluies intenses" de l'UMR EmmaH [116]. Concernant la modélisation, nous avons développé des algorithmes pour l'analyse de dynamiques issues de l'équation de lubrification [113] appliqués avec succès aux écoulements de films fins sur des substrats hétérogènes [114, 115].

### Projet

Notre projet est motivé par la question environnementale que constitue la recharge des aquifères. Lorsque les pluies intenses suivent des périodes de sécheresse, l'infiltration d'eau est essentiellement sous forme d'écoulements dits préférentiels. Le transfert devient alors très complexe est une riche palette de phénomènes apparaît comme l'instabilité de front, l'intermittence ou l'hystérésis. Les modèles classiques basés sur l'équation de Richards ne peuvent expliquer la diversité de ces phénomènes. Il est nécessaire de prendre en compte des écoulements hors-équilibre et notamment les écoulements à surface libre. Notre but est de mieux comprendre et décrire les comportements du transfert dans les macropores que ce soit sous forme de gouttelettes, de films fins, de ruissellets ou encore de ponts capillaires. Nous nous intéresserons, d'une part, aux ruissellements à la surface du sol et de leur imbibition par la matrice, et d'autre part, aux écoulements sous forme de

films de liquide ou de pont capillaire dans des grands pores cylindriques (macropore) ou plans (fracture). Afin de capturer la richesse des dynamiques nous souhaitons employer les outils des systèmes dynamiques comme dans nos précédents travaux [115]. Le contexte du milieu poreux rend crucial la modélisation des irrégularités du substrat, un effort tout particulier sera entrepris dans cette direction. Nous intégrerons aussi les termes d'inertie dans les modèles, car dans certaines situations d'écoulement rapide, l'inertie n'est plus négligeable.

## **7.19 IRSTEА-ETNA**

Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches  
rue de la Papeterie, BP 76  
38402 St-Martin-d'Hères cedex  
Refs. [117–124]

### **Personnels impliqués**

Guillaume Chambon (CR Irstea), Nicolas Eckert (IPEF), Thierry Faug (CR Irstea), Dominique Laigle (ICPEF), Mohamed Naaim (DR Irstea), Florence Naaim-Bouvet (ICPEF), 3 doctorants.

### **Moyens**

Accès à la ferme de calcul Irstea. Moyens expérimentaux : plusieurs canaux instrumentés dédiés à l'étude des écoulements à surface libre de fluides complexes, rhéomètres de différentes dimensions.

### **Ensemble de compétences**

L'UR ETNA possède une expérience avérée dans la caractérisation du comportement rhéologique des matériaux naturels (neige, boue, grains, eau, . . .) et de leur loi d'écoulement à différentes échelles, du laboratoire au terrain. Elle a également une compétence avérée en modélisation des écoulements gravitaires à surface libre de fluides naturels, par des approches de type Saint-Venant ou fondées sur les équations primitives, et en intégrant les processus d'érosion et de dépôt et les effets des singularités. Les codes développés au sein de l'unité sont mobilisés en appui à la réalisation de zonages des aléas naturels.

### **Projet**

Le rapport entre l'épaisseur et la longueur des écoulements gravitaires rapides (avalanches de neige, coulées de boue, laves torrentielles, . . .) est généralement très petit devant un, ce qui justifie la modélisation de ces écoulements par des modèles de type couches minces. Ces modèles rendent possible l'étude des phénomènes sur l'ensemble d'un site. En fonction de l'écoulement considéré, les questions de recherche auxquelles l'UR s'intéresse se concentrent sur les thématiques suivantes :



1. La prise en compte des accélérations verticales dans les modèles, dans les zones où celles-ci ne peuvent pas être négligées devant la gravité (par exemple au voisinage des fronts, de variations brutales de topographie, . . .)
2. La prise en compte des lois de comportement des fluides non-Newtoniens, et de l'évolution des profils de vitesse et de la contrainte pariétale notamment dans les régimes fortement transitoires et non-établis.
3. La modélisation des échanges de masse entre l'écoulement et le substratum et de ses implications sur la dynamique des écoulements.

Ces thématiques sont portées par Irstea au sein du LabEX TEC21. L'UR ETNA a participé récemment au montage d'un projet ANR sur ces thématiques (projet SWIFTnNEW, porteur : V. Botton, LMFA) avec pour partenaires les équipes FAST, IMT et LMFA participant au GdR FILMS.

## 7.20 ONERA

ONERA-DMAE,  
 Département Modèles pour l'Aérodynamique et l'Énergétique  
 BP 4025 F-31055 TOULOUSE CEDEX 4  
 Refs. [9, 125, 126]

### 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 monodisperse 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 l'attribution d'une nouvelle thématique à notre équipe sur le phénomène du "givrage", l'ONERA-DMAE a prévu d'accentuer ses travaux sur le comportement dynamique et thermique des films liquides cisailés. En effet, la modélisation des échanges de masse et de chaleur pour un film cisailé par un écoulement turbulent est un enjeu très important pour le givrage. Or, ces phénomènes sont très complexes et, avant même de considérer l'aspect thermique, il est nécessaire de modéliser correctement la dynamique des films cisailés pour avoir la bonne surface d'échange. Actuellement, que ce soit pour les aspects dynamiques ou thermiques, seules des corrélations expérimentales (valables uniquement dans certains domaines d'application) ou des méthodes très coûteuses comme la DNS pourraient permettre de modéliser ces phénomènes. C'est pourquoi dans les prochaines années l'ONERA souhaite renforcer son expertise sur ces sujets.

## **7.21 Vallourec**

Vallourec Research Aulnoye (VRA)  
60 route de Leval -BP20149  
59620 Aulnoye-Aymeries, France  
Refs. [127, 128]

## **Personnels impliqués**

Thierry Bénard, responsable du service procédés thermiques au VRA, Marcello Benvivigni, Docteur Ingénieur, Ricardo Junqueira, expert thermique, Sylvain Devynck, doctorant

## **Moyens**

Pilote expérimental permettant des essais en conditions industrielles du refroidissement de tubes en acier, mesures en lignes sur process industriels, moyens de caractérisation des aciers.

## Ensemble de compétences

- Thermométrie et Thermographie IR
- Diagnostics thermiques et métallurgiques
- Transferts thermiques jet impactant/paroi, film/paroi
- Caractérisation métallurgiques

## Projet

Pour les procédés de trempe les plus communément utilisés (trempe dans les fluides vaporisables comme l'eau, l'huile...) les mécanismes de transferts de chaleur pariétales sont d'une telle complexité que leur modélisation complète n'existe pas à ce jour. Pour progresser dans ce domaine, il est nécessaire d'une part de développer des expériences spécifiques permettant de déterminer les flux de chaleurs échangées lors de la trempe. Nos objectifs sont d'étudier, comprendre et résoudre les causes responsables des contraintes résiduelles et des déformations dans une pièce d'acier (i.e. tube) subissant une trempe à l'eau. Dans le cadre du GDR FILMS, nos objectifs sont de mieux comprendre les couplages thermomécaniques entre le ou les films (liquide et/ou vapeur, bouillonnant ou non) et les tubes subissant le refroidissement (i.e. traitement thermique). Une expérience pilote sera mise en place au VRA ; Il sera possible de suivre la cinétique de déformation d'un tube en acier en cours de refroidissement, de corrélérer celle-ci au transfert de chaleur (un suivi de la température en temps réelle du produit sera effectué). L'analyse de la cinétique de transformation de phase permettra de mieux comprendre les couplages entre les régimes d'ébullition en paroi, les transformations de phase métallurgique et les contraintes mécaniques ainsi générées.

## 7.22 IVK

Département de la dynamique des fluides appliquée et de l'environnement  
Chaussée de Waterloo, 72  
B-1640 Rhode-St-Genèse  
Belgique  
Refs. [129–136]

## 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), 1 Research Master à temps complet.

## 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 pour application à la PIV et les méthodes de suivi instantané de la déformée d'interface (technique LEDAR et d'absorption de lumière).

L'IVK utilise des codes de calcul tels que Fluent (ANSYS), Aquilon (TREFLE), CFD-ACE (ESI) et StarCCM+ (CD-Adapco) et de plus en plus OpenFoam pour simuler des configurations où l'interaction flux gazeux-film 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. la dynamique de l'entraînement et l'arrachage de film liquide par un flux gazeux normal ou tangent à l'interface. Les instabilités d'un film liquide cisailé.

L'IVK développe des techniques expérimentales de

- caractérisation de la turbulence à l'interface gaz-liquide (PIV à deux phases)
- Cartographie de l'épaisseur instantanée d'un film instable : longueur d'onde et amplitudes des instabilités de surface (LEDAR, Light absorption)

## 7.23 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. [137–139]

## Personnels impliqués

P. Colinet maître de recherche FNRS, B. Scheid chercheur qualifié FNRS, A. Rednikov chercheur senior, Sam Dehaeck chercheur senior, Juthamas Kamrak doctorant, Wilko Rohlf, doctorant, Benjamin Sobac, post-doctorant, Yannis Tsoumpas, doctorant, Alessia Simonini, doctorante

## Moyens

Interféromètres et autres techniques optiques (ombrographie, Schlieren), tensiomètre, spin coater, serveur de calcul, Fluent, Comsol, salle blanche, caméra IR, caméra rapide, plasma cleaner, microscope 3D laser confocal, stéréomicroscope, microscope droit etc.

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

## Projet

*Dynamique des films liquides minces :*

- a) Films tombants chauffés avec champ électrique :  
 Nous nous intéresserons à la stabilité et la rupture de films minces en écoulement sur une paroi chauffée et soumise à un champ électrique. Ce champ électrique produit une force de surface qui modifie la forme des ondes. Au-delà d'un seuil du champ électrique imposé, les ondes peuvent se briser en gouttelettes, ce qui peut en pratique est favorable ou défavorable selon les applications.
- b) Films tombants d'un mélange binaire avec évaporation d'un des deux constituants :  
 Nous nous intéresserons à l'évaporation d'un des deux constituants d'un liquide s'écoulant sur une paroi chauffée (l'autre constituant étant non-volatile). Cette situation apparaît dans de nombreux procédés industriels (cf. Air Liquide, AGC glass, etc.) où il est important de connaître la longueur nécessaire à l'évaporation d'un des deux constituants, ainsi que l'influence des modifications des propriétés (viscosité, diffusivité thermique) avec la variation de concentration. Un autre aspect est l'étude des instabilités et de la turbulence interfaciale engendrées par l'effet Marangoni dans les liquides binaires s'évaporant, dont nous continuerons également l'étude théorique et expérimentale.
- c) Formation et drainage de film de savon :  
 Nous nous intéresserons à la formation et au drainage d'un film de savon de manière théorique et expérimentale en se concentrant sur les effets viscoélastiques des interfaces dans le cas de différents surfactants à faibles et fortes concentrations, par rapport à la cmc (critical micellar concentration).
- d) Mouillage dynamique et phénomènes impliquant des lignes de contacts :  
 Nous continuerons l'étude théorique et expérimentale des lignes de contacts statiques ou mobiles, en présence ou non d'évaporation/condensation à l'air libre ou dans une atmosphère de vapeur pure, pour le mouillage total et le mouillage partiel. Le but est de proposer des modèles validés pouvant être utilisés comme conditions aux limites généralisées (ou modèles de sous-maille) au voisinage des lignes de contact qui apparaissent dans de nombreux procédés (écoulements et démouillage de films minces, séchage de gouttelettes, imbibition capillaire en milieu confiné, ...). Une nouveauté sera de considérer le rôle du désordre chimique et/ou géométrique sur le mouvement de la ligne de contact, ainsi que l'effet d'un champ électrique (électro-mouillage).

## Références

- [1] Spiegel, L., Meier, W., Distillation columns with structured packings in the next decade. *Trans IChemE* **80**, part A, January 2003.
- [2] 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.
- [3] Trifonov, Y.Y., Stability of a viscous liquid film flowing down a periodic surface. *Int. J. Multiphase Flow* **33**, 1186-1204, 2007.

- [4] Wierschem, A., Lepski, C. and Aksel, N. Effect of long undulated bottoms on thin gravity driven films. *Acta Mech.* **179**, 41-66, 2005.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Lalo, M., Cartellier, A., Gajan, P. and Strzelecki, A. Use of Faraday Instabilities to Enhance Fuel Pulverization in Airblast Atomizers, ICLASS 2006, Kyoto.
- [10] 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.
- [11] Cousin J., Berlemont A., Ménard T. and Grout S. Primary breakup simulation of a liquid jet discharged by a low-pressure compound nozzle *Computers and Fluids*, **63**(30) 165-173, 2012.
- [12] Duret B., Luret G., Menard T., Berlemont A., Reveillon J. and Demoulin F.X., DNS Analysis of turbulent mixing in two-phase flows, *Int. J. Multiphase Flow* **40** 93-105, 2012.
- [13] Berlemont A. Coupling Level Set/VOF/Ghost Fluid methods : Description and Application on Shear Atomization Invited presentation Symposium on Industrial Flows : Multiphase Flow, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 9-15, Houston, USA, 2012
- [14] Noël E., Berlemont A., Cousin J., Ménard T. Application of the immersed boundary method to simulate flows inside and outside the nozzles, ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012.
- [15] Dietze, G.F., Leefken, A. and Kneer, R. Investigation of the backflow phenomenon in falling liquid films *J. Fluid Mech.* **595**, 435-459, 2007.
- [16] Samanta, A., Ruyer-Quil C. and Goyeau B., A falling film down a slippery inclined plane. *J. Fluid Mech.* **684**, 353-383 (2011)
- [17] Samanta, A., and Goyeau B. and Ruyer-Quil C., A falling film on a porous medium. *to appear in J. Fluid Mech.*
- [18] Ruyer-Quil C., Chakraborty S. and Dandapat B.S., Wavy regime of a power-law film flow. *J. Fluid Mech.* **692**, 220-256 (2012)
- [19] Didier Chasseur, Ecoulement de films liquides sur un plan incliné : analyse des phénomènes et optimisation d'un outil de calcul, mémoire de stage CNAM.

- [20] 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.
- [21] Doumenc, F., Boeck, T., Guerrier, B. and Rossi, M. Transient Rayleigh-Bénard-Marangoni Convection due to Evaporation : a Linear Non-normal Stability Analysis, *J Fluid Mech.* **648**, 521-539, 2010.
- [22] 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.
- [23] Jing G., Bodiguel H., Doumenc F., Sultan E. and Guerrier B. : Drying of colloidal and polymer solutions near the contact line : deposit thickness at low capillary number *Langmuir*, **26**, 4, pp.2288-2293, 2010.
- [24] Touazi O., Chenier E., Doumenc F. and B.Guerrier B., Simulation of transient Rayleigh-Bénard-Marangoni convection induced by evaporation, *IJHMT*, **53**, 4, pp.656-664, 2010.
- [25] Bodiguel, H., Doumenc, F. and Guerrier, B., Stick-Slip Patterning at Low Capillary Numbers for an Evaporating Colloidal Suspension, *Langmuir* **26**, 13, pp.10758-10763, 2010.
- [26] Trouette B., Chénier E., Delcarte C. and Guerrier B., Numerical study of convection induced by evaporation in cylindrical geometry, *EPJ-ST "Interfacial Fluid Dynamics and Processes"*, **192**, pp. 83-94, 2011.
- [27] Doumenc F. and Guerrier B. , A model coupling the liquid and gas phases for a totally wetting evaporative meniscus, *EPJ-ST "Discussion and Debate : Wetting and Spreading Science - quo vadis ?"*, **197**, pp. 281-294, 2011.
- [28] Trouette B., Chénier E., Doumenc F., Delcarte C. and Guerrier B., Transient Rayleigh-Bénard-Marangoni solutal convection, *Phys. Fluids*, **24**, 7, 046308, 2012.
- [29] Hsueh C., Moraila-Martinez C., Doumenc F., Rodriguez-Valverde M., Guerrier B., Self-assembly in Drying Complex Fluid at Low Capillary Number, sous presse *CEP*
- [30] Dietze, G. and Ruyer-Quil C. Wavy liquid films in interaction with a confined laminar gas flow *submitted to J. Fluid Mech.*
- [31] Ruyer-Quil, C. and Kalliadasis, S. Wavy regimes of film flow down a fiber, *Phys. Rev. E* **85**, 046302, 2012.
- [32] Moisy, F., Rabaud, M. and Salsac, K. A Synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface. *Exp. in Fluids* **46**, 1021-1036, 2009.
- [33] Fuster, D., Agbaglah, G., Jossierand, C., Popinet, S. and Zaleski, S. Numerical simulation of droplets, bubbles and waves : state of the art. *Fluid Dynamics Research.* **41**, pp 065001-065045, 2009.
- [34] Fuster, D., Bague, A., Boeck, T., Le Moyne, L., Leboissetier, A., Popinet, S., Ray, P., Scardovelli, R. and Zaleski, S. Simulation of primary atomization with an octree adaptive mesh refinement and VOF method. *Int. J. Multiphase Flow.* **35**, pp 550-565, 2009.

- [35] Eggers, J, Fontelos, M.A., Josserand, C. and Zaleski, S. Drop dynamics after impact on a solid wall : Theory and simulations. *Phys. Fluids* **22**, 062101, 2010.
- [36] Tomar, G., Fuster, D., Zaleski, S. and Popinet, S.. Multiscale simulations of primary atomization using Gerris. *Computers and Fluids*. DOI :10.1016/j.compfluid.2010.06.018 (2010)
- [37] Bagué, A. , Fuster, D., Popinet, S., Scardovelli, R. and Zaleski, S. Instability growth rate of two-phase mixing layers from a linear eigenvalue problem and an initial value problem. *Phys. Fluids* **22** 092104, 2010.
- [38] Gordillo, L., Agbaglah, G., Duchemin, L. and Josserand, C. Asymptotic behavior of a retracting two-dimensional fluid sheet, *Phys. Fluids* **23**, 122101, 2011.
- [39] Duchemin, L. and Josserand, C. Curvature singularity and film-skating during drop impact. *Phys. Fluids* **23**, 091701, 2011.
- [40] Otto, T., Rossi, M. and Boeck, T. Viscous Linear Instability of a sheared liquid-gas Interface. Effect of a velocity deficit near interface PAMM Proceedings in applied mathematics and mechanics . **11**, pp. 615-616, 2011.
- [41] Saito, M., Ikenaga, Y., Matsukawa, M., Watanabe, Y., Asada, T. and Lagrée, P.-Y. One-dimensional Propagation Model of Pressure Wave in a Model of Human Arterial Network : Comparative Study of Theory and Experiments, *J. Biomechanical Engng* **133** 121005-1, 2011.
- [42] Agbaglah, G., Delaux, S., Fuster, D., Hoepffner, J., Josserand, C., Popinet, S., Ray, P., Scardovelli, R. and Zaleski, S. Parallel simulation of multiphase flows using octree adaptivity and the volume-of-fluid method. *C. R. Acad. Sci. Paris* **339**, 194-207, doi : 10.1016/j.crme.2010.12.006. (2011)
- [43] Delestre, O. and Lagrée, P.-Y. A "well balanced" finite volume scheme for blood flow simulation. *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, DOI : 10.1002/fld.3736, (2012)
- [44] Fuster, D. An energy preserving formulation for the simulation of multiphase turbulent flows. *J. Comp. Phys.* **235**, 114-128, 2012.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.



- [50] Adjoua, S. Développement d’une méthode de simulation de films liquides cisailés par un courant gazeux, Thèse de doctorat INP Toulouse, soutenue le 13/07/10
- [51] Boutounet M., Chuplin L., Noble P. and Vila J.-P. Shallow water viscous flows for arbitrary topography *Comm. Math. Sci.* **6** (1), 29-55, 2008.
- [52] Fernandez-Nieto E., Noble P. and Vila J.-P. Shallow Water equations for Non-Newtonian fluids *J. non-Newtonian Fluid Mech.* **165**, 712-732, 2010.
- [53] Johnson M.A., Zumbrun K. and Noble P. Nonlinear Stability of Viscous Roll Waves *SIAM J. Math. Anal.*, **43** (2), 577-611, 2011.
- [54] Boutounet, M. Modèles asymptotiques pour la dynamique d’un film liquide mince. thèse IASE Toulouse soutenue le 17/11/11
- [55] Roux, M. Modèles de fronts pour films minces. thèse doctorat université de Toulouse soutenue le 06/12/12
- [56] Martin, N., Monnier, J. Four-field finite element solver for viscoplastic free-surface flows and variational sensitivity analysis Submitted.
- [57] Martin, N., Monnier, J. Some inverse problems for power-law geophysical flows addressed using variational methods. Submitted
- [58] Couderc, F., Madec, N., Monnier, J., Vila J.-P., Dartus, D. Sensitivity analysis and variational data assimilation for geophysical shallow water flows. Under final redaction.
- [59] Eggers, J. and Villermaux, E., Physics of Liquid Jets. *Rep. Prog. Physics* **71**, 036601, 2008.
- [60] Villermaux, E., Fragmentation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **39**, 419–446, 2007.
- [61] Bremond, N. Clanet, C. and Villermaux, E. Atomization of undulated liquid sheets. *J. Fluid Mech.* **585**, 421-456, 2006.
- [62] Duchemin, L. and Josserand, C. Rarefied gas correction for the bubble entrapment singularity in drop impacts *C. R. Mecanique* **340** (797–803), 2012.
- [63] Sarthou, A., Vincent, S., Caltagirone, J.P. A second-order curvilinear to Cartesian transformation of immersed interfaces and boundaries. Application to fictitious domains and multiphase flows, *Comput. Fluids*, **46**, 422-428, 2011.
- [64] Trontin, P., Vincent, S., Estivales, J.L., Caltagirone, J.P. A subgrid computation of the curvature by a particle/level-set method. Application to a front - tracking/ghost fluid method for incompressible flows, *J. Comput. Phys.*, 2012
- [65] Caltagirone, J.P., Vincent, S., Caruyer, C. A multiphase compressible model for the simulation of multiphase flows, *Comput. Fluids* **50** 24-34, 2011.
- [66] Angot, P., Caltagirone, J.P., Fabrie, P. A fast vector penalty-projection method for incompressible non-homogeneous or multiphase Navier-Stokes problems, *Appl. Math. Lett.* **25**(11), 1681-1688, 2012.
- [67] 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.

- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Matas, J.-P., Marty, S., and Cartellier, A. Experimental and analytical study of the shear instability of a gas-liquid mixing layer, *Phys. Fluids*, **23**, 094112, 2011.
- [76] Marty, S., Matas, J.-P., and Cartellier, A. Study of a liquid-gas mixing layer : Shear instability and size of produced drops, *C. R. Mécanique*, *in press*.
- [77] Martel, A. and Cross, B. Handling of artificial membranes using electrowetting-actuated droplets on a microfluidic device combined with integrated pA-measurements, *Biomechanics* **6**, 012813, 2012.
- [78] Lagaert J.-B., Balarac G., Cottet G.-H. and Bégou P. Particle method : an efficient tool for direct numerical simulations of a high Schmidt number passive scalar in turbulent flow, Proceeding of the CTR summer program, Stanford Univ., 2012
- [79] Lagaert J.-B., Balarac G., Cottet G.-H. Numerical evidence of universal scaling for the scalar variance spectrum in forced homogeneous turbulence *submitted to Phys. Fluids*
- [80] 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.
- [81] 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.

- [82] 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.
- [83] Hu, J., Millet, S., Botton, V., Ben Hadid, H. and Henry, D. Inertialess temporal and spatio-temporal stability analysis of the two-layer film flow with density stratification. *Phys. Fluids* **18**, 104101, 2006.
- [84] Rousset, F., Millet, S., Botton, V. and Ben Hadid, H. Temporal stability of Carreau fluid flow down an incline. *J. Fluids Eng.* **129**, 913-920, 2007.
- [85] Hu, J., Ben Hadid, H., Henry, D. and Mojtabi, A. Linear temporal and spatio-temporal stability analysis of binary liquid films flowing down an inclined uniformly heated plate. *J. Fluid Mech.* **599**, 269-298, 2008.
- [86] Hu, J., Yin, X.Y., Ben Hadid, H. and Henry, D. Linear temporal and spatio-temporal stability analysis of two-layer falling films with density stratification. *Phys. Rev. E* **77**, 026302, 2008.
- [87] Millet, S., Botton, V., Rousset, F. and Ben Hadid, H. Wave celerity on a shear-thinning fluid film flowing down an incline. *Phys. Fluids* **20**, 031701, 2008
- [88] Millet, S., Rousset, F., Botton, V. and Ben Hadid, H. Stabilité de l'écoulement à deux couches de films non-newtoniens sur un plan incliné. *C. R. Mec.* **336**, 313-319, 2008
- [89] Millet, S., Rousset, F., Botton, V. and Ben Hadid, H. Stability analysis of stratified coating flow of shear-thinning fluids. *Eur. Phys. J. - Spec. Top.* **166**, 143-146, 2009.
- [90] Usha, R., Millet, S., Ben Hadid, H. and Rousset, F. Shear-thinning film on a porous substrate : Stability analysis of a one-sided model. *Chem. Eng. Sci.* **66**, 5614-5627, 2011.
- [91] Cong N.C. and Plourde F. Wavy wall influence on the hydrodynamic instability of a liquid film flowing along an inclined plane . *Int. J. Heat Fluid Flow* **32** 698-707, 2011.
- [92] 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.
- [93] 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.
- [94] Fu T.T., Ma Y.G., Funfschilling D. and Li H.Z., Bubble formation and breakup mechanism in a microfluidic flow-focusing device, *Chem. Eng. Sci.*, **64** 2392-2400, 2009.
- [95] Luo S.J., Li H.Z., Fei W.Y. and Wang Y.D., Liquid film characteristics on surface of structured packing, *Chinese J. Chem. Eng.*, **17**, 47-52, 2009.
- [96] Funfschilling D., Debas H., Li H.Z. and Mason T., Flow field around a drop in formation in a flow focusing geometry, *Phys. Rev. E*, 015301, 2009.
- [97] Fu T., Funfschilling D., Ma Y.G. and Li H.Z., Scaling the formation of slug bubbles in microfluidic flow-focusing devices, *Microfluidics Nanofluidics*, **8**, 467-475, 2010.
- [98] Fu T., Ma Y., Funfschilling D., Zhu C. and Li H.Z., Squeezing-to-dripping transition for bubble formation in a microfluidic T-junction, *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 3739-3748, 2010.

- [99] Dietrich N., Poncin S. and Li H.Z., Dynamical deformation of a flat liquid-liquid interface, *Exp. in Fluids*, **50**, 1293-1303, 2011.
- [100] Fu T.T., Ma Y.G., Funfschilling D. and Li H.Z., Bubble formation in Non-Newtonian fluids in a microfluidic T-junction, *Chem. Eng. Process.*, **50**, 438-442, 2011.
- [101] Fu T.T., Ma Y.G., Funfschilling D., Zhu C.Y. and Li H.Z., Breakup dynamics of slender bubbles in non-Newtonian fluids in microfluidic flow-focusing devices, *AIChE J.*, **58**, 3560-3567, 2012.
- [102] 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.
- [103] Perrard, S. Couder, Y., Fort, E. and Limat, L. Leidenfrost levitated liquid tori, *Eur. Phys. Lett.* **100**, 54006, 2012.
- [104] Daerr, A., Eggers, J. Limat, L., Valade, N. General Mechanism for the Meandering Instability of Rivulets of Newtonian Fluids. *Phys. Rev. Lett.* **106**, 2011.
- [105] Brunet, P. and Snoeijer, J.H. Star-drops formed by periodic excitation and on an air cushion - A short review, *Eur. Phys. J. Special Topics* **192**, 207-226, 2011.
- [106] Couvreur, S. and Daerr, A. The role of wetting heterogeneities in the meandering instability of a partial wetting rivulet, *Eur. Phys. Lett.* **99**, 24004, 2012.
- [107] Kajiyama, T., Daerr, A., Narita, T., Royon, L., Lequeux, F. and Limat, L. Advancing Liquid Contact Line on Visco-Elastic Gel Substrates : Stick-Slip vs Continuous Motions, *Soft Matter*, **9**, 454-4612, 2013.
- [108] Winkels, K.G., Peters, I.R., Evangelista, F., Riepen, M. Daerr, A., Limat, L. Snoeijer, J.H. Receding contact lines : From sliding drops to immersion lithography. *Eur. Phys. J. Special Topics* **192**, 195, 2011.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] Njifenju, K. Gouttes et films liquides en aérodynamique automobile. thèse doctorat UPMC soutenue le 26/01/10
- [113] Beltrame, Ph. and Thiele, U. Time integration and steady-state continuation for 2d lubrication equations. *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.* **9**, 484-518, 2010
- [114] Beltrame, P., Hänggi, P. and Thiele, U. Depinning of three-dimensional drops from wettability defects. *Europhys. Lett.*, **86**, 24006, 2009.
- [115] Beltrame, P., Knobloch, E., Hänggi, P. and Thiele, U. Rayleigh and depinning instabilities of forced liquid ridges on heterogeneous substrates, *Phys. Rev. E*, **83**, 016305, 2011.

- [116] Sammartino, S., Michel, E. and Capowiez, Y. A novel method to visualize and characterize preferential flow in undisturbed soil cores by using multislice helical CT, *Vadose Zone Journal*, **11**, (1), 2012.
- [117] Chambon, G., Bouvarel, R., Laigle, D. Numerical simulations of granular free-surface flows using smoothed particle hydrodynamics. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **166**, 698-712, 2011.
- [118] Chambon, G., Ghemmour, A., Laigle, D., Gravity-driven surges of a viscoplastic fluid : An experimental study. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **158**, 54-62, 2009.
- [119] Chambon, G., Naaim, M. Scaling relationships for constant-volume snow avalanches. *Annals of Glaciology*, **51**, 129-138, 2010.
- [120] Eckert, N., Naaim, M., Parent, E. Long-term avalanche hazard assessment with a Bayesian depth-averaged propagation model. *J. Glaciology*, **56**, 563-586, 2010.
- [121] Laigle, D., Lachamp, P., Naaim, M. SPH-based numerical investigation of mudflow and other complex fluid flow interactions with structures. *Computational Geosciences*, **11**, 297-306, 2007.
- [122] Naaim, M, Faug, T, Naaim-Bouvet, F. Dry granular flow modelling including erosion and deposition. *Surveys in Geophysics*, **24**, 569-585, 2003.
- [123] Naaim, M., Naaim-Bouvet, F., Faug, T., Bouchet, A. Dense snow avalanche modeling : flow, erosion, deposition and obstacle effects. *Cold Regions Science and Technology*, **39**, 193-204, 2004.
- [124] Naaim, M., Faug, T., Naaim Bouvet, F., Eckert, N. Return period calculation and passive structure design at the Tacconnaz avalanche path (France). *Annals of Glaciology*, **51**, 89-97, 2010.
- [125] Garcia-Rosa, N., Villedieu, P., Dewitte, J. and Lavergne, G. A New Droplet Wall Interaction Model, ICLASS 2006, Kyoto.
- [126] Lavalle, G, Laurent, C, Charru, F. and Vila, J.-P., Study of the dynamics of thin liquid films sheared by turbulent gas flows, submitted to ICMF 2013, Ieju, Korea.
- [127] Devynck S., Gradeck M., Denis S., Bellot J.P., Varlez M., Benard T. Cooling of a rotating cylinder by a subcooled planar jet–Influence of the surface velocity on boiling regime, *Key Engineering Materials Vols 504-506*, 1049-1054, 2012, doi :10, 4028/www.scientific.net/ KEM.504-506,1049
- [128] Devynck S., Gradeck M., Bellot J.P., Denis S., Varlez M., Benard T. Cooling of a rotating cylinder by a subcooled planar jet–Influence of the surface velocity on boiling regime, 15th ESAFORM CONFERENCE, March 14-16 2012, Erlangen (Germany)
- [129] Gosset, A., Buchlin, J.-M. Techniques optiques pour la caractérisation de films liquides instables Congrès Francophone de Techniques Laser, CFTL 2008, Poitiers, France, septembre 16-19, 2008
- [130] Gosset, A., Buchlin, J.-M., Branders, R. Annular jet wiping in wire galvanizing ECS09, 8th European Coating Symposium on Advances in Coating, drying and Dynamic Wettting, September 7-9,2009, Karlsruhe, Germany.

- [131] Myrillas, M., Gosset, A., Rambaud, P., Anderhuber, M., Mataigne, J.-M., Buchlin, J.-M. Experimental investigation of delaying splashing in the jet wiping process by means of a side jet 7th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2010, Tampa, USA, May 30-June 4, 2010.
- [132] Myrillas, M., Gosset, A., Rambaud, P., Anderhuber, M., Mataigne, J.-M., Buchlin, J.-M. Technique for delaying splashing in jet wiping process. *Chemical Engineering and Processing : Process Intensification*, **50**(5-6) 466-470, 2011.
- [133] Myrillas, M., Rambaud, P., Mataigne, J.-M., Gardin, P., Vincent, S., Buchlin, J.-M. Numerical modeling of gas-jet wiping process European Coating Symposium, ECS 2011, Turku, Finland, June 8-10, 2011, ISBN 978-952-12-25-74-1, pp 162-165
- [134] Munoz-Esparza, D, Buchlin, J.-M., Myrillas, M., Berger, R. Numerical investigation of impinging gas jets onto deformable liquid layers *Applied Mathematical Modelling*, **36**, 2687-2700, 2012.
- [135] Bacharoudisa, E., Bratec, H., Keirsbulka, L., Buchlin, J.-M., Labraga, L. Onset of atomization on horizontal, shear-driven liquid films at the vicinity of a sharp corner. Submitted to *Atomization and Sprays*, 2012.
- [136] Bacharoudisa, E., Bratec, H., Keirsbulka, L., Buchlin, J.-M., Labraga, L. Simplified model for the prediction of the occurrence of film atomization in corner geometries. To be submitted to *Surface Sciences*.
- [137] Scheid B., Margerit J., Iorio C.S., Joannes L., Heraud M., Queeckers P., Dauby P.C. and Colinet P. Onset of thermal ripples at the interface of an evaporating liquid under a flow of inert gas *Exp. in Fluids* **52**, 1107-1119, 2012.
- [138] Chauvet F., Dehaeck S. and Colinet P. Threshold of Bénard-Marangoni instability in drying liquid films. *Europhys. Lett.* **99**, 34001, 2012.
- [139] Colinet P., Chauvet F. and Dehaeck S., Genesis of Bénard-Marangoni patterns in thin liquid films drying into air, *to appear in Without bounds : a scientific canvas of nonlinearity and complex dynamics*, Eds : R. G. Rubio, Yu. S. Ryazantsev, V. M. Starov, G. X. Huang, A. P. Chetverikov, P. Arena, A. A. Nepomnyashchy, A. Ferrùs and E. G. Morozov, Springer-Verlag (2012).
- [140] Machrafi H., Rednikov A., Colinet P. and Dauby P.C. Bénard instabilities in a binary-liquid layer evaporating into an inert gas. *J. Colloid Interface Sci.* **349**, 331-353, 2010.
- [141] Machrafi H., Rednikov A., Colinet P. and Dauby P.C. Bénard instabilities in a binary-liquid layer evaporating into an inert gas : stability of quasi-stationary and time-dependent reference profiles. *Eur. Phys. J - Special Topics* **192** 71-81, 2011.
- [142] Colinet P. Interfacial patterns and waves in liquid layers and thin films, in *Pattern Formation at Interfaces*, Eds P. Colinet and A.A. Nepomnyashchy, CISM Courses and Lectures, **513**, SpringerWienNewYork, Udine (2010), ISBN 978-3-7091-0124-7.
- [143] Scheid B., van Nierop E. and Stone H. A. Thermocapillary-assisted pulling of thin films : application to molten metals *Appl. Phys. Lett.* **97**, 171906, 2010.
- [144] Scheid B., van Nierop E. and Stone H. A. Thermocapillary-assisted pulling of contact-free liquid films *Phys. Fluids* **24**, 032107, 2012.

- [145] Scheid B., Delacotte J., Dollet B., Rio E., Restagno F., van Nierop E. A., Cantat I., Langevin D. and Stone H. A. The role of surface rheology in liquid film formation *Europhys. Lett.* **90**, 24002, 2010.
- [146] Delacotte J., Montel L., Restagno F., Scheid B., Dollet B., Stone H.A., Langevin D. and Rio E. Plate coating : influence of concentrated surfactants on the thickening. *Langmuir* **28**, 3821, 2012.
- [147] Scheid B., Dorbolo S., Arriaga L.R. and Rio E. Antibubbles dynamics : the drainage of an air film with viscous interfaces. *Phys. Rev. Lett.* **109**, 264502, 2012.
- [148] Rednikov A. Ye., and Colinet P. Vapor-liquid steady meniscus at a superheated wall : asymptotics in an intermediate zone near the contact line. *Microgravity Sci. Tech.* **22**, 249-255, 2010.
- [149] Rednikov A. Ye. and Colinet P., Truncated versus extended microfilms at a vapor-liquid contact line on a heated substrate *Langmuir* **27**, 1758-1769, 2011.
- [150] Colinet P. and Rednikov A. Ye. On integrable singularities and apparent contact angles within a classical paradigm. Partial and complete wetting regimes with or without phase change, *Eur. Phys. J. – Special Topics* **197**, 89-113, 2011.
- [151] Rednikov A. and Colinet P. Evaporation-driven contact angles in a pure-vapor atmosphere : the effect of vapor pressure non-uniformity. *Math. Model. Nat. Phenom.* **7**, 53-63, 2012.
- [152] Rednikov A. and Colinet P. Singularity-free description of moving contact lines for volatile liquids, *to appear in Phys. Rev. E*