Bilan FCIH

FCIH
Comme les mots de l'acronyme de l'équipe l'indiquent, il s'agit d'un groupe de sensibilité "Fluide" (par complémentarité aux équipes de sensibilité "Solide" de l'Institut et rappelant que nous nous plaçons dans le cadre général de la "Mécanique des Milieux Continus"). Le mot "Complexe" renvoie aux fluides mais aussi aux configurations, aux nombres d'échelles mises en jeu, aux interactions étudiées et aux lois de comportement recherchées. "Instabilités Hydrodynamiques" traduit l'activité historique (le mot Hydrodynamique est redondant avec fluide, d'autant que l'activité n'est pas limitée à l'eau), ces mots renvoient en fait à l'outil commun de recherche de "solutions de base" et de "stabilité" dans des configurations diverses. On pourrait interpréter le "I" comme "Interfaces", car la complexité étudiée vient souvent d'une interface (entre deux fluides, avec une paroi mobile rigide ou élastique, avec un milieu granulaire, dans un milieu poreux)...

Point de vue développé ; Méthodes et outils

L'esprit général qui prévaut dans le groupe est celui d'une "curiosity driven research", intéressés par les phénomènes physiques fondamentaux de la mécanique des fluides sans application directe autre que le progrès de la connaissance.
Par leur formation initiale, la sensibilité des membres de l'équipe est moitié Physique (dont Géophysique), moitié Mécanique Mathématique (rappelons que la Mécanique a été extraite de la Physique et des Mathématiques par Paul Germain).
Néanmoins, le groupe se préoccupe de nombreuses applications dans des domaines variés ouverts sur le monde réel. Nous faisions partie de l'ancien département CNRS "Sciences Physiques pour l'Ingénieur". En continuant à revendiquer cet intitulé, nous marquons notre attachement au monde macroscopique et aux enjeux de société (et à l'enseignement, voir plus loin).

Principalement, l'équipe a une culture commune forte en Mathématiques Appliquées (dites "à l'anglaise": méthodes asymptotiques, analyse de stabilité, modèles simplifiés, analyse en ordres de grandeur, théorie des systèmes dynamiques…). L'aspect multi sujets des activités du groupe traduit la réalité mathématique qui est sous jacente: de nombreux sujets semblant différents sont explicables par une même simplification mathématique. En effet, nous cherchons à extraire de la complexité naturelle des phénomènes des configurations simplifiées génériques (des modèles) et pertinentes qui elles mêmes sont en fait très complexes.
Pour étayer ce point de vue "théorique", nous développons depuis toujours une activité numérique. Il s'agit à la fois de résolution d'équations modèles simplifiées obtenues par l'analyse mais nécessitant des méthodes adaptées, il s'agit aussi de résolutions directes des équations de Navier Stokes (nous disposons à l'Institut d'un cluster).

Enfin, une nouvelle activité expérimentale, "coin de table", dans la « salle Savart » s'est mise rapidement en place. Parmi les techniques développées, la visualisation par caméras rapides (submilimétrique) est un outil appréciable et complémentaire aux simulations numériques directes.

Insertion dans la société, collaborations et partenriats
Le groupe est très impliqué dans l'enseignement supérieur. Ses membres UPMC ont des responsabilités en enseignement de Licence et de Master 1 & 2. Les CNRS participent à la vie de l'Université et enseignent à l'UPMC, et aussi dans d'autres universités et écoles d'ingénieurs.

Les contrats Industriels avec Total, IFP, PSA, St Gobain, Alcatel, DynFluid, EADS et étatiques ANR ENDOCOM, ANR VAA, ANR blanche, Emergence, CEA, Conseil régional Champagne... montrent notre implication industrielle et contractuelle.

Rayonnement et attractivité [enlever les prix]
Des membres ont été récompensés par une médaille d'Argent CNRS (Zaleski), deux médailles de Bronze (C. Josserand, D. Lhuillier).
Dans le quadriennal, une récompense Prix Gallery of Fluid Motion (Antkowiak Séon) a été obtenue , ICMF et la communication avec le public a été récompensée par le prix « goût des Sciences » Motion (T. Séon A. Antkowiak).
De nombreux visiteurs sur les thématiques d'interfaces, J. Biello (UC Davis 12), J. Gordillo (Séville 11), S. Takeuchi Univ. Tokyo, 10/11, M. Fontelos (Madrid 10) et S. Popinet (NIWA 10/11) ont été nos invités, mais aussi A. M'Chirgui, (Ecole polytechnique de Tunisie, 11/12) pour l'activité plasmas, R. Armentano (Buenos Aires 12) pour la biomécanique, et F. James (Orléans Délégation CNRS 11), Jost Von Hardenberg (Turin 10) et A. Provenzale (Turin 09) pour les aspects plus environnementaux.
Le recrutement cette année d'un CR, T. Séon et d'un professeur R. Wunenburger montrent l'attractivité de notre équipe.
Plusieurs post docs étrangers (américain, indiens chinois et deux français) sont venus travailler avec nous, l'équipe a enfin un flux de thésards suffisant recrutés dans les meilleurs masters.

Evolution et structuration
Le groupe FCIH (Fluides Complexes et Instabilités Hydrodynamiques) est constitué de 18 membres (équilibré en distribution: 11 UPMC/7 CNRS, 9 A/9 B, 13 ont plus de 40 ans (2 UPMC émérites) et 7 moins ont moins de 40 ans. Il y a 7 HDR (1 seul sur les 7 B), 4 post docs, 6 thésards et 1 IR.

Par rapport aux axes définis lors du précédent quadriennal 2004-2007, il n'y a pas eu de franche évolution mais une redistribution compte tenu des départs (P. Carlès au FAST, N. Delprat au LIMSI, D.Gintz à la retraite, J-S Darrozès à la retraite, R. Prud'homme à FRT), des arrivées (P. Collini du LEMFI, J-M Fullana recruté PR, J. Hoepffner recruté MdC, S. Protière recrutée CNRS, V. Ruas émérite) et des évolutions naturelles de l'équipe. La feuille de route du précédent a été tenue, marquant ainsi la cohérence de l'équipe.

Plus précisément, les activités développées sont regroupables en 5 axes ayant de fortes interactions entre eux que nous allons détailler.

1) **gouttes bulles**
ACLa1. 2 5 37 39 44 45 53 54 59 64 71 76 79 83 86 87 89 90 91 109 112 114

L'impact de gouttes, la dynamique de bulles, l'atomisation et plus globalement la dynamique des interfaces correspondent à une préoccupation « historique » de l'équipe. Ces problèmes complexes mettant en jeu des interfaces fortement déformées et dont la topologie peut varier rapidement ont la particularité de lier des questions fondamentales en mécanique des fluides (physique des surfaces, modélisation numérique des interfaces, formation de structures singulières par exemple) à des préoccupations industrielles actuelles (atomisation dans les moteurs, microfluidique, écoulements multiphasiques en milieux poreux…). Cette dualité garantit à l'activité un renouvellement constant des problématiques ainsi qu'un financement régulier équilibré entre contrats industriels (Total, PSA, Air Liquide, Saint-Gobain par exemple) et financements publics (ANR, Emergence, CEA). Traditionnellement théorique et numérique, la thématique s'est enrichie pendant cette dernière période d'une activité expérimentale au développement rapide et concrétisée par l'équipement de la salle Savart. Ses trois thèmes principaux sont:

Atomisation : dans de nombreuses situations la dynamique de l'interface conduit à la formation et à « l'éjection » de gouttes. Le contrôle de la formation, la distribution de taille de ces gouttes est cruciale pour de nombreuses applications : par exemple il est souhaitable d'avoir des gouttes nombreuses et petites pour une combustion moteur optimale alors qu'on cherche à minimiser la production d'aérosols lors de fuites liquides. La compréhension de l'instabilité du jet liquide conduisant à la formation de gouttes reste encore incomplète et est abordée ici sous plusieurs angles : analyse de stabilité d'un jet, (S. Zaleski, M. Rossi, collaboration avec T. Boeck), ou d'une nappe liquide (G. Agbaglah, C. Josserand et S. Zaleski, collaboration avec L. Duchemin et L. Gordillo) et simulations numériques directes multi-échelles à l'aide de Gerris (G. Agbaglah, A. Bagué, D. Fuster, maintenant CR à FRT, J. Hoepffner et S. Zaleski).

Impact de gouttes : par la diversité des situations (impacts sur substrat solide, sur surface structurée ou sur film liquide mince ou profond) et des dynamiques (éclaboussure « splash », étalement, formation de jet, enfermement de bulles…) l'impact de gouttes représente un condensé de la dynamique des interfaces. Plusieurs aspects sont abordés : suite à la théorie proposée par C Josserand et S. Zaleski en 2003, l'influence d'une couche limite visqueuse lors du prompt splash a été étudiée théoriquement et numériquement pour une goutte (C. Josserand, P. Ray et S. Zaleski) et pour le cas analytiquement et expérimentalement abordable de la demi-goutte (A. Antkowiak, P.-Y. Lagrée et J. Philippi). Le rôle de l'air environnant, crucial comme l'ont montré des expériences récentes, reste un sujet d'actualité abordé sous des angles différents : modélisation de la couche d'air avant l'impact montrant le «skating» de l'interface avant le contact (C. Josserand, collaboration avec L. Duchemin), prise en compte de l'angle de contact lors de l'enfermement de la bulle d'air (Z. Jian, C. Josserand, P. Ray S. Zaleski en collaboration avec S. Popinet), caractérisation de l'impact sur film liquide (C. Josserand et G.J Michon d'une part C. Josserand en collaboration avec M. Fontelos et le PMMH d'autre part) ou sur substrat solide (C. Josserand et S. Zaleski en collaboration avec M Fontelos et J. Eggers d'une part, R. Schroll et W. Zhang d'autre part) montrant également l'importance de couches limites formées lors de l'impact. Finalement, la dynamique des gouttes rebondissantes en lien avec les expériences de gouttes vibrées (Y. Couder, MSC) présente un problème fascinant de couplage ondes-interface. Plusieurs modèles ont été développés prenant en compte la pression de lubrification présente dans la couche d'air interstitielle entre la goutte et le bain liquide et l'explication vient de l'existence de deux types d'onde stables (Capillaire et de Faraday) et par leur interférences (C. Josserand, M. Rossi et S. Protière, collaboration Y. Couder).

Dynamique de bulles : la dynamique de bulles est également un problème classique de la mécanique des fluides diphasiques mais qui recèle encore de nombreux mystères. Par exemple, l'interaction hydrodynamique entre bulles voisines conduit à des dynamiques complexes couplant le sillage de la bulle et la déformation de l'interface (prix à la Gallery of Fluid Motion de l'APS, A. Antkowiak et T. Séon). Ces écoulements complexes ont des applications dans des domaines aussi variés que la fabrication du verre (collaboration avec Saint-Gobain) ou la caractérisation des bulles de champagne (A. Antkowiak, T. Séon, S. Zaleski, collaboration G. Liger-Belai).

2) **interaction fluide-solides**
ACLa1. 11 26 32 40 43 80 84 85 93 100 101 107 108 113

Comme indiqué plus haut, le I de FCIH peut se référer aux interfaces, et aux interfaces fluide-solide en particulier. Bien souvent, ce type d'interaction est associée à l'aéro- ou l'hydro-élasticité, mais sous certaines conditions (en fait, lorsque les échelles sont très petites), la tension de surface peut être le vecteur de déformation du substrat solide : on parle alors d'élasto-capillarité. Ce champ original a commencé à être exploré avec la thèse de M. Rivetti (A. Antkowiak, C. Josserand, coll. Audoly et Neukirch), qui a permis d'identifier des mécanismes de repliement 3D de micro-structures élastiques (ou `micro-origami') par impact de goutte. Il a également été montré que l'on pouvait sélectionner la forme finale de repliement uniquement par la vitesse d'impact de la goutte.
De même une goutte placée entre deux fibres parallèles flexibles attachées à un côté et libres de défléchir à l'autre modélise le mouillage de réseaux de fibres. Ce phénomène est omniprésent et va aussi bien de l'imprégnation des fibres textiles, du séchage de filtres fibreux ou des cheveux au mouillage des tarses permettant l'adhésion d'insectes à une surface (S Protière, H. Stone et C. Duprat, Princeton University, contrat Emergence). Dans ce cas, comme dans les précédents un accord entre la modélisation et les observations expérimentales a été obtenu.
Ce champ d'étude est partie prenante de la révolution du « micro » et de la manufacture d'objets microscopiques liés à la révolution du nano et aussi à la mise au point de procédés d'encapsulation. L'aspect micro fluidique est considéré dans l'équipe par son aspect gaz raréfiés et sera vu au point suivant.

Toujours à l'échelle millimétrique (taille de billes d'environ 100 µm) l'interaction de particules à l'interface eau-huile (S. Protière) par l'intermédiaire des forces de capillarité crée une mono-couche de particules (appelée « radeau »). Grâce à des forces volumiques telles que la gravité par exemple, ce radeau peut devenir instable et couler en encapsulant une certaine quantité de liquide. Il se forme alors des gouttes d'huiles entourées d'une coque solide de particules. Les propriétés de cet objet très stable appelé «gouttes en armure» a été étudié.

La littérature ne s'était concentrée que sur une configuration idéalisée sans gravité. Il a été montré que pour les drapeaux réels, que l'on voit battre dans le vent, les ondes sont obliques

et un modèle pour l'angle d'oblicité a été obtenu en accord avec des essais en soufflerie (J. Hoepffner).

Enfin, toujours à l'échelle humaine et plus classiquement, le groupe continue les études de biomécanique avec interaction entre l'écoulement du sang et la déformation des vaisseaux. Il s'agit de propagation de l'onde pouls dans les artères et de l'écoulement dans les veines (P.-Y. Lagrée, M. Rossi et J.M. Fullana en coll avec P. Flaud MSC). Une collaboration avec l'Université Doshisha de Kyoto a par exemple permis de comparer quantitativement l'écoulement dans un réseau de 9 tubes élastiques à un modèle mono dimensionnel d'écoulement. Dans la même optique, un modèle d'interaction fluide (type couche limite) structure élastique (faiblement couplée) a été mis en œuvre avec l'équipe de GIPSA Lab de Grenoble pour comparer quantitativement l'écoulement dans les voies aériennes supérieures pour décrire l'apnée du sommeil.

l'interaction de deux grosses bulles dans un fluide visqueux provoque un jet intense

3**) Comportements Asymptotique, Stabilité d'écoulements, dynamique de la vorticité**
ACLa1. 14 16 17 31 41 58 62 63 66 92 104 105 106

L'instabilité de Kelvin Helmoltz a été revisitée en étudiant l'évolution non linéaire d'une perturbation localisée et non d'une perturbation sinusoidale, une vague autosemblable a ainsi été mise en évidence (Hoepffner)

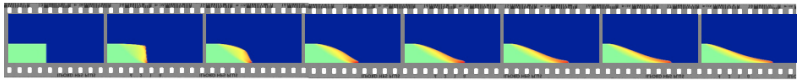
Lors de la rétractation d'un film mince sous l'action de la tension de surface, un bourrelet est créé, dont la surface croît linéairement avec le temps. Ce profil du film mince a pu être décrit en effectuant un développement asymptotique aux temps longs entre le bourrelet et le film d'épaisseur constante au (G. Agbaglah, L. Gordillo et C. Josserand, collaboration avec L. Duchemin).

Les vortex apparaissant en bouts de pales (par exemple d'éolienne) possèdent approximativement une invariance hélicoïdale. Dans ce contexte, un code de simulation numérique dédié à cette symétrie a été mis au point. Des résultats sur la dynamique d'un seul vortex et la fusion de plusieurs vortex hélicoïdaux ont été établis en fonction des paramètres typiques comme le pas de l'hélice (M. Rossi coll Y. Delbende LIMSI)

Les problèmes d'écoulement de fluides conducteurs en conduite sont présents en métallurgie. Ils posent des questions concernant la transition à la turbulence en magnétohydrodynamique. La théorie de la perturbation optimale a été étendue à ces cas de figure. Cette approche, qui a permis de comprendre l'existence et le mécanisme conduisant à l'existence de tourbillons longitudinaux dans les couches limites transitionnelles, a montré comment le champ magnétique imposé modifie ces structures (M. Rossi Th. Boeck (Ilmenau)).

L'évaporation dans un mélange binaire (Polymère solvant) conduit à la présence d'instabilités de convection de type Rayleigh ou Marangoni. Il s'agit de traiter un problème de stabilité avec un écoulement instationnaire. Les résultats obtenus avec une méthode de type quasi-statique et une méthode de type non-normal ont été comparés aux expériences réalisées au FAST (M. Rossi Coll. F.Doumenc et B.Guerrier).

La turbulence d'ondes élastiques dans les plaques décrit l'état statistique atteint par un système d'ondes dont les interactions non-linéaires, faibles, interagissent de manière résonantes, ce qui conduit à cet équilibre. Les caractéristiques de la turbulence d'ondes pour les plaques élastiques a été prédite théoriquement et numériquement (C. Josserand avec Sergio Rica et Gustavo Düring). La dissipation réelle et les conditions aux limites expérimentales doivent cependant être prises en compte afin de bien évaluer leur influence sur les spectres de turbulence (thèse de T. Humbert, avec C. Josserand, en collaboration avec O. Cadot et C. Touzé).



différents instantanés de l'effondrement d'un tas de grains avec la μ(I) rhéologie dans *Gerris*

4) **Milieux complexes et écoulements en milieux naturels**
ACLa1. 1 3 6 7 8 12 18 19 22 23 24 27 28 29 30 31 33 34 35 36 46 49 50 51 56 57 65 7374 75 77 78 82 88 95 97 98 102

Comme dit plus haut, le C renvoie aux écoulements complexes. La complexité pouvant être le caractère pas tout à fait continu de l'écoulement. C'est dans ce contexte que se développe l'activité sur les sources plasmas utilisées pour les satellites géostationnaires de télécommunication et les sondes interplanétaires. Les effets magnétiques à basse pression et les interactions plasma-surface (bombardement électronique, effet du rayonnement VUV) sur les nouveaux matériaux céramiques utilisés pour ces propulseurs et les micro-propulseurs sont étudiés (M. Dudeck).

L'activité Microfluidique (C. Croizet, R. Gatignol) traite des écoulements gazeux en micro-canaux en vue d'applications environnementales (micro-filtres à particules). Des simulations numériques par la méthode de Monte-Carlo (DSMC) sont comparées à des approches théoriques asymptotiques basées sur les équations de Navier-Stokes et/ou de Burnett. Les cas des gaz simples (thèse de D. Ameur) et des mélanges (thèse de M. Reyhanian) isothermes ont été étudiés. La modélisation de milieux dispersés est examinée par des approches issues de la théorie cinétique (équations de Boltzmann et des moments de Grad, C. Croizet).

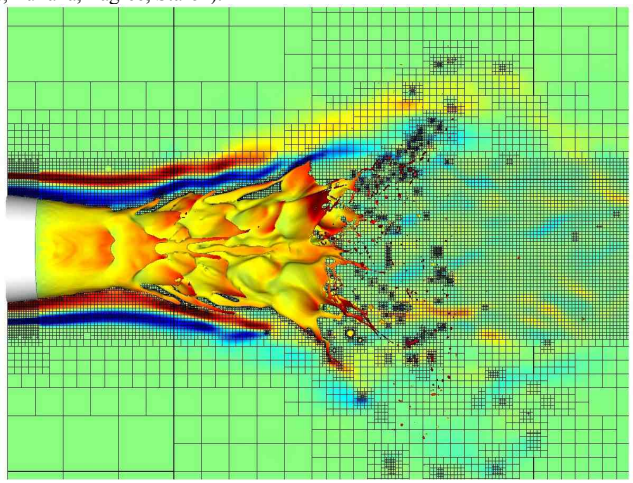
Le groupe s'intéresse aux fluides dans l'environnement en général. Il a donc une activité modélisation et calcul liés au Nucléaire (A. Monavon). Mais, il a aussi une activité de modélisation des milieux naturels avec une ambition plus géophysique.
C'est dans ce contexte que se placent les travaux sur l'érosion et la sédimentation (O. Devauchelle, maintenant CR IPGP, P.-Y. Lagrée C. Josserand) de lits érodables (coll IPGP), ils ont permis de mieux comprendre la formation de structures en forme de chevrons (comme ceux que l'on voit lorsque la vague se retire de la plage.

Profitant de la simulation par dynamique de contact, la modélisation des milieux granulaires est toujours examinée afin d'en comprendre la rhéologie (Lagrée, Lhuillier, Staron, Josserand). Dans le cas des effondrements de colonnes granulaires secs, la rhéologie du μ(I) a été implémentée dans le code *Gerris* (Lagrée, Staron Popinet) et un accord remarquable a été obtenu entre la dynamique de contact, la description continue de Navier Stokes et les résultats expérimentaux de la littérature. Nous maîtrisons toute la chaîne du discret au continu : du déplacement de chaque grains au continu Navier Stokes μ(I), en passant par Saint Venant.

La modélisation et rhéologie des milieux granulaires mouillés est d'autant plus compliquée et est abordée par des modèles d'écoulements de fluides denses en particules ou suspensions concentrées (D. Lhuillier).

5) **Outils et Méthodes Numériques**
ACLa1. 20 21 25 47 48 52 61 67 69 70 81 103

L'équipe développe de nombreux codes personnels en tant qu'outils (méthodes pseudo spectrales, intégrales de frontières, volumes finis, dynamique de contact (C. Josserand, P-Y Lagrée, A. Antkowiak, L. Staron) pour résoudre des équations modèles dégagées. Par exemple liées à l'activité modélisation et résolution des équations 1D- St Venant en biomécanique, ou fleuves et avalanches granulaires (Lagrée Fullana Staron), ou turbulence d'onde (Josserand). Mais aussi en éléments finis ou des méthodes numériques performantes pour résoudre NS (V. Ruas) sont proposées. En éléments finis encore, une nouvelle méthode de résolution d'équations paraboliques de type double deck a été proposée (P.-Y. Lagrée F Chouly).
Dans ce même axe, une activité de data mining (J. Chaskalovic) est développée pour explorer des bases de données médicales (ou des simulations numériques générant un grand nombre de données).
Enfin, le groupe participe au débuggage, à la maintenance, à la diffusion et à la vie du code libre *Gerris* (équipe informatique de l'Institut, stagiaires, thésards et post docs, Zaleski, Josserand, Fullana, Lagrée, Staron).



l'atomisation : calcul par *Gerris*