

MICHEL PONS

Introduction

Au LIMSI, les Transferts Solide-Fluide (TSF) se déclinent autour de l'ébullition, de la thermodynamique, de l'hélium superfluide, des fluides oscillants et des milieux poreux adsorbants. Les activités de TSF, très diverses, traversent un certain nombre de frontières.

Expérimental *versus* numérique. Le groupe TSF entretient un effort expérimental soutenu pour l'ébullition sur fil, la résistance de Kapitza, les écoulements oscillants, et les cinétiques d'adsorption. Les techniques mises en œuvre vont de la vélocimétrie par fil chaud à la mesure de températures cryogéniques en passant par la réponse thermique en fréquence. Le groupe développe aussi de plus en plus de simulations numériques. Ces dernières portent surtout sur la dynamique de l'ébullition libre mais aussi la convection naturelle et les écoulements dans les poreux. Lorsqu'elle est possible, la complémentarité expérimental – numérique, par exemple pour la convection naturelle autour d'un fil chauffant, permet des avancées sur des points sensibles, ici la spécification des conditions aux limites d'un domaine de calcul ouvert.

Fondamental *versus* appliqué. Chacune des problématiques du groupe présente des points durs théoriques que nous abordons. Cela nécessite par exemple de décrire des interfaces et leur dynamique, ou bien de décrire les interactions entre échelles micro et macro. Parallèlement, certaines des compétences du groupe (sur la cinétique d'adsorption ou sur les systèmes thermodynamiques) sont reconnues par divers partenaires, académiques ou industriels, et contribuent à des projets de recherche ou font l'objet de contrats.

Le groupe TSF rassemble actuellement deux chercheurs, quatre maîtres de conférence (UPMC, Université Paris-Sud 11 et CNAM), un ingénieur de recherche (partagé à mi-temps avec la Cellule Expérimentale du Département Mécanique-Énergétique), une assistante ingénieure et un doctorant. Mentionnons aussi une thèse dirigée en co-tutelle avec le LIMHP (Villetaneuse) et soutenue en novembre 2006.

Le spectre des collaborations de recherche entretenues par le groupe TSF reflète bien celui de ses activités. Ces collaborations impliquent surtout des partenaires français, avec toutefois quelques percées vers l'international et vers l'industrie.

Présentation de la recherche

Thème Dynamique de l'ébullition libre

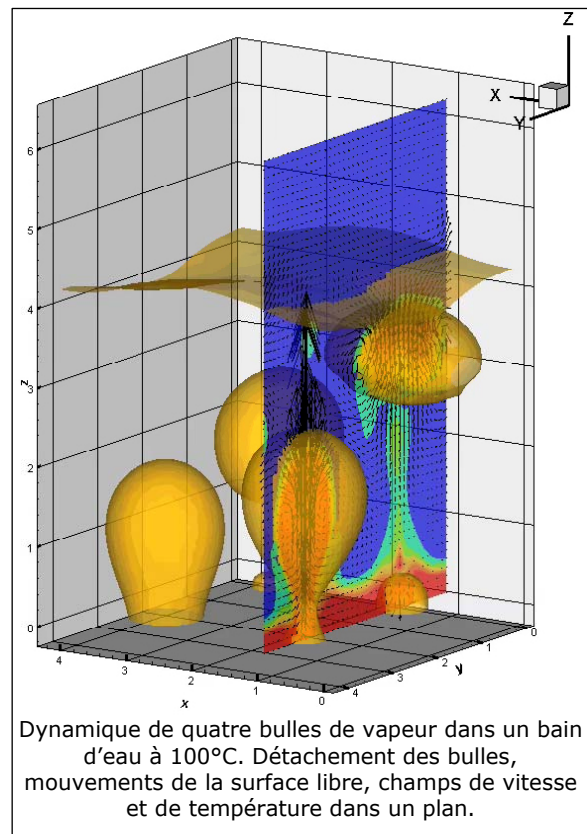
M.-C. Duluc, D. Juric, V. Daru, I. Elayyadi, P. Le Quéré

Historiquement, ce thème était principalement expérimental. Depuis quatre ans l'effort a porté sur le développement d'un modèle numérique de croissance de bulles de vapeur. Les mesures ont aussi continué dans le second axe du thème.

Le premier axe, l'étude de la **croissance des bulles de vapeur**, est un sujet très actif comme le montre le nombre de laboratoires émergeant à ce thème dans le GdR AMETH³. Depuis quelques années, le groupe concentre ses efforts sur le développement de modèles et de simulations numériques. Les difficultés sont de plusieurs ordres. Premièrement, le suivi de l'interface, qui représente un vrai problème en soi. La méthode que nous développons est celle du *front tracking plus level contour reconstruction*. Elle permet un suivi fin de l'interface, même très déformable et soumise à ruptures et/ou coalescences. Nous pouvons l'appliquer au cas réel d'ébullition nucléée de l'eau où le rapport des densités (fixes) des phases liquide et vapeur est de 1600, en traitant simultanément la zone de contact triple solide-liquide-vapeur, l'angle de contact, la microcouche à l'interface solide-vapeur et la tension superficielle de l'interface liquide-vapeur. Les

³ AMETH = Analyse et Maîtrise des Écoulements et Échanges Thermiques

simulations sont faites en 3D, voir la [page de présentation](#)⁴ et les publications (Shin and Juric 2007, Juric et al. *ICMF 2007*). La limitation rencontrée pour l'instant porte sur la taille du volume simulé. Deuxièmement, les variations de densité. La coexistence des phases liquide et vapeur dans un domaine fermé soumis à chauffage induit des variations de la pression de vapeur et donc de la densité de la phase vapeur. L'originalité de notre approche, et sa difficulté numérique, résident dans le traitement simultané d'un domaine où le fluide est incompressible (la phase liquide) coexistant avec un domaine où le fluide est compressible (la phase vapeur). Pour prendre en compte la corrélation entre pression et température à l'interface, et ainsi décrire des situations avec ébullition en cavité fermée, la pression thermodynamique doit être une variable accessible. En 2005, nous disposions d'un code 1D intégrant le changement de phase et ce code avait été validé, ce qui a donné lieu à diverses publications (Daru *et al.* 2006, *ICCHMT 2005*, *CFM 2005*, *IHTC 2006*). L'analyse de ces cas a permis de mettre en évidence les constantes de temps pertinentes en géométrie plane comme en géométrie sphérique. Ce même code 1D a permis de simuler le déplacement d'une lame liquide entre deux volumes gazeux soumis à des flux de chaleur variables. Cette étude (Duluc *et al.* *SFT 2007*) montre qu'il est possible de contrôler le déplacement d'une lame liquide par des flux de chaleur et réaliser ainsi un micro-oscillateur. Elle a aussi montré que l'algorithme actuel ne permet pas de conserver exactement la masse. Ceci justifie donc les travaux sur le front tracking et sur la résolution de l'équation de Poisson. Ce travail sur le code 1D offre deux extensions toutes deux envisagées au LIMSI. La première est l'extension de ce code en 2D axisymétrique, et au-delà en 3D. Ceci est le cœur du travail de thèse d'I. Elayyadi (*ED Physique Macroscopique Paris 7*). Il s'agit de rejoindre, compléter et intégrer le travail sur le front tracking, mais avec des schémas numériques qui permettent de traiter des volumes réalistes. Différentes « briques » de l'assemblage sont opérationnelles, par exemple le traitement de la tension superficielle, d'autres restent à mettre en place, en particulier un schéma numérique robuste face à des grands rapports de densité des deux phases. Ce travail est en cours, voir la [page de présentation](#)⁵. La seconde extension souhaite explorer les écoulements diphasiques dans des conduits micrométriques, avec ou sans changement de phase. Il s'agit là soit de savoir simuler des mélanges diphasiques soit de savoir dessiner des actuators utilisant les changements de phase.



On voit que ce thème, qui profite aussi des apports précieux de V. Daru, MCF ENSAM effectuant sa recherche au LIMSI groupe *Aérodynamique Instationnaire*, atteint une masse critique qui permet d'envisager des collaborations, par exemple avec D. Jamet (CEA Grenoble) ou V. Nikolayev (ESPCI). Nous devons aussi travailler sur la complémentarité expérimental-numérique soit sur la croissance de bulles soit sur les micro-actuators.

Le second axe développe une étude expérimentale de **l'ébullition transitoire sur fil** et ce depuis plusieurs années (*cf.* le rapport scientifique [2003](#)⁶). Nous nous intéressons aux conditions de transition prématurée vers l'ébullition en film, cette transition prématurée étant préjudiciable au bon fonctionnement des évaporateurs. En 2005 nous avons montré l'influence de l'état de surface du fil via la valeur de l'angle de contact entre l'interface liquide-vapeur et la surface solide. Depuis, une campagne expérimentale menée dans l'azote liquide a permis de corréler l'intensité de l'échelon imposé au régime d'ébullition observé. Au-delà d'une certaine valeur du flux, la nucléation se déclenche simultanément sur toute la longueur du fil, avec les risques de coalescence qui en découlent. Nous avons ainsi pu établir les échelles de temps des

⁴ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_Interface_tracking

⁵ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_liquid-gas_flows

⁶ Lien hypertexte : <http://www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF6/TSF6.html>

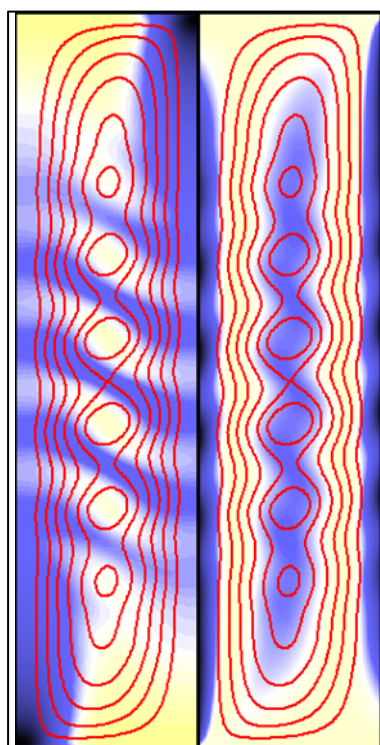
différents phénomènes en jeu, voir la [page de présentation](#)⁷. Ce travail, en collaboration avec le CETHIL au sein du GdR AMETH paraîtra prochainement (Duluc et al. *accepté IJHMT* 2008⁸).

Grâce au montage expérimental développé pour l'étude de l'ébullition sur fil, M.-C. Duluc contribue aux travaux sur la **convection naturelle autour d'un fil chauffant** menés en collaboration avec F. Lusseyran (groupe *Aérodynamique Instationnaire*) et S. Xin (groupe *Convection Rotation*, maintenant professeur au CETHIL, INSA Lyon). L'objectif est d'identifier les conditions aux limites à appliquer aux calculs de convection naturelle en domaine ouvert. Nous nous sommes concentré cette année sur les lois d'échelles de temps. Les lois connues théoriquement et calculées numériquement ont bien été vérifiées expérimentalement. Nous sommes donc en mesure de prédire correctement les structures principales de l'écoulement, avec cependant quelques limitations. Il est maintenant clairement identifié que ces limitations portent sur le calcul de la vitesse et pas sur celui de la température, cf. la [Page de présentation](#)⁹. La première phase a été publiée (Xin, Duluc et al. *CFM* 2005) et un article de revue vient d'être soumis à *Int. J. Heat Fluid Flow*.

Thème Thermodynamique des systèmes

M. Pons

L'axe premier de ce thème est l'**analyse second principe de la convection naturelle** en cavité, en particulier en présence d'une transition. La cohérence thermodynamique impose de tenir compte du travail des forces de pression : c'est le modèle *Boussinesq* dit *thermodynamique*. Une étude systématique sur la cavité carrée 2D emplies d'air a permis de réactualiser le domaine de validité du modèle *Boussinesq usuel* et a montré que des configurations courantes dans l'habitat (2,5 m de haut et 0,6 K entre les deux murs verticaux) requièrent le modèle *thermodynamique* pour être simulées correctement, voir les pages des rapports d'activité [2003](#)¹⁰ et [2005](#)¹¹, et les publications (Pons & Le Quéré 2005a et b, 2007, *ICCHMT* 2005). Cette nécessité est malheureusement presque toujours négligée dans les calculs de convection naturelle ou mixte réalisés pour l'habitat. Par ailleurs, une attention toute particulière a été apportée à la transition à l'instationnarité pour cette même configuration école. Il est notable qu'aucune grandeur thermodynamique, y compris les irréversibilités, ne présente de discontinuité à la transition. En revanche, il semblerait que l'on puisse corrélérer, du moins qualitativement, les topologies respectives des fluctuations et des irréversibilités. Les fluctuations sont les plus importantes dans les régions où l'irréversibilité est très faible. Serait-on alors proche de la réversibilité locale ? De plus, et là encore, l'effet de la taille de la cavité, via le travail des forces de pression, a été mis en évidence. Ces analyses ont fait l'objet de publication (Pons & Le Quéré *SFT* 2006 et *IHTC* 2006). Pour les poursuivre, il faudrait faire des bilans thermodynamiques sur des trajectoires fluides. En 2006-2007, l'effort a porté sur la transition entre écoulement monocellulaire et écoulement multi-cellulaire dans les cavités à grand rapport de forme (ici 20) emplies d'air. Cette transition présente l'avantage d'exister entre états stationnaires. De nouveau, on a montré que dans une cavité de 2 mètres de haut, le Nusselt est clairement plus fort que dans une cavité de 80 cm de haut, et que la transition y est nettement retardée. De plus, les effets thermodynamiques de l'apparition des cellules de recirculation corotatives au centre de la cavité ont été analysés, donnant une explication thermodynamique de l'existence d'un seuil, voir la [page de présentation](#)¹², et les publications (Pons *SFT* 2007 et *JETC-IX* 2007). La principale avancée tangible de ces travaux reste la nécessité d'utiliser le modèle *Boussinesq thermodynamique* pour simuler les grands



Lignes de courant dans les champs d'irréversibilité conductive (gauche) et visqueuse (droite). Cas du rapport de forme 20, $Ra_L = 7000$.

⁷ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_boiling_crisis

⁸ M.-C. Duluc, B. Stutz & M. Lallemand, Boiling incipience in liquid nitrogen induced by a step change in heat flux, *accepté in Int. J. Heat Mass Transfer*, sera publié probablement en 2008.

⁹ http://rs2007.limsi.fr/index.php/CORO:Page_11

¹⁰ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF2/tsf2.html

¹¹ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2005/meca/tsf/tsf2/

volumes, en particulier pour l'habitat. Ces travaux contribuent à l'axe *Convection naturelle Hors-Boussinesq* de la Fédération de recherche Transferts de Masse et de Chaleur.

Ce deuxième axe du thème s'intéresse aussi à la thermodynamique de divers systèmes, principalement par leur analyse second principe. Notre collaboration avec le LESBAT (Yverdon-les-Bains, Suisse) sur la réfrigération solaire a rencontré en 2007 un développement tout à fait en phase avec les préoccupations très actuelles sur l'énergie et le réchauffement climatique. Une PME française (Solaref) tente de commercialiser cette technologie de réfrigérateurs solaires. Sur son site web (www.solaref.com), elle mentionne explicitement le LIMSI comme étant à l'origine de cette technologie. La collaboration avec le LESBAT se poursuit, avec l'étude de systèmes à adsorption pour la climatisation solaire. Une nouvelle convention de collaboration est à l'étude. La climatisation solaire, préoccupation tout à fait d'actualité, est aussi le thème central du projet *ORASOL*. Ce projet, financé par l'ANR-PREBAT de 2007 à 2010, veut comparer plusieurs solutions de climatisation solaire. Les tests en vraie grandeur sont ou seront effectués dans divers laboratoires, et c'est le LIMSI qui est chargé de mettre en place le protocole de comparaison, en termes de premier et de second principes, et *in fine* d'analyser les résultats expérimentaux. La réflexion a commencé par définir des critères qui s'appliquent équitablement à tous les systèmes thermodynamiques, cycles ouverts comme cycles fermés. Ensuite ont été abordées les questions de l'entropie du rayonnement solaire (et donc de son exergie) et de la température extérieure variable (quelle est l'exergie de l'air extérieur lorsque sa température varie ?). C'est aussi cette réflexion qui est à la base de la collaboration avec le LEPTAB (La Rochelle, Convention No 020990 du 9 août 2007) sur l'analyse second principe de l'installation de climatisation solaire par roue dessiccante en test au LEPTAB depuis l'été 2007.

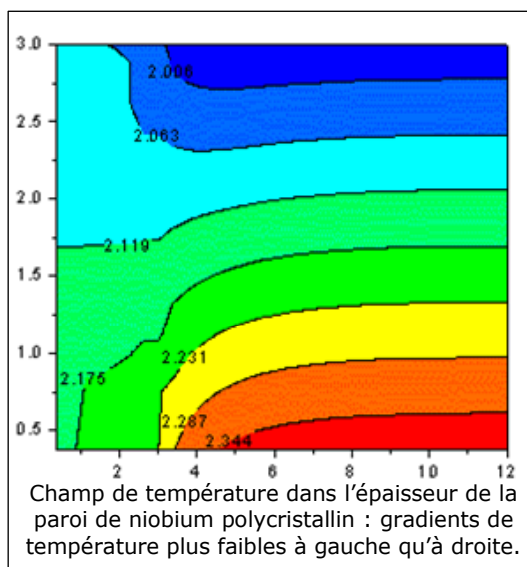
L'ensemble de cette réflexion est partagé et confronté au sein des séminaires et écoles thématiques du PRI CARNOT.

Thème Transferts de chaleur à l'interface solide-hélium superfluide

J. Amrit

Le premier axe de ce thème porte sur le couplage thermique entre la surface d'un cristal et l'hélium superfluide (en dessous de 2,17 K). Ce couplage se traduit par une résistance au transfert de chaleur à l'interface, appelée la résistance de Kapitza. Grâce aux propriétés du superfluide, il est possible d'avoir accès expérimentalement aux mécanismes de transferts à petite échelle. Afin de mettre en évidence le rôle de la diffusion des phonons sur les rugosités nanométriques de l'interface, une expérimentation a été mise au point et réalisée en collaboration avec l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO groupe de J.-P. Thormeau). Cette expérimentation, inédite en elle-même et utilisant une méthode originale de contrôle de la température de l'interface entre le silicium et le bain d'hélium superfluide refroidi par une boucle à hélium 3, a permis de mesurer sur un même banc cette résistance sur une gamme de température allant de 2 jusqu'à 0,3 Kelvin, ce qui est une première mondiale. Ces mesures permettront d'étudier l'interaction entre les phonons, dont la longueur d'onde varie avec la température, et les rugosités de l'interface, dont la taille caractéristique à une échelle donnée est évidemment fixe. Voir la [page de présentation](#)¹³ et l'article (Amrit 2005). Mentionnons aussi que les apports de F. Chatelet (IPNO) et Qiang Li (post-doc chinois pendant un an) à cette opération ont été précieux.

Le second axe concerne les cavités supraconductrices des accélérateurs de particules et en particulier leur conductivité thermique transverse. En effet, ces parois fines en polycristal de niobium présentent, en plus de l'anisotropie étudiée précédemment, voir la page de présentation [2005](#)¹⁴ et l'article (Amrit 2006), une hétérogénéité de conductivité effective qui se traduit par des points chauds autour des soudures entre éléments.



¹² Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_multicellular_convection

¹³ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_silicium_superfluid_helium

¹⁴ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2005/meca/tsf/tsf3/tsf3.pdf

Là encore, les observations s'expliquent par la résistance Kapitza localisée aux joints de grains. Les transferts de chaleur dans un matériau hétérogène en terme de densité de joints de grains ont été modélisés, cf. l'article (Amrit & Li, *CEC-ICMC* 2007). De tels résultats sont importants pour dimensionner au mieux les cavités supraconductrices des accélérateurs de particules, ce qui intéresse beaucoup le CEA avec lequel nous collaborons sur ce sujet depuis dix ans.

Ces études soulèvent la question fondamentale de la compréhension et la maîtrise des mécanismes de transfert de chaleur à l'échelle nanométrique. En effet, la diffusion des phonons sur les rugosités de l'interface qui est la cause de la résistance Kapitza et que nous étudions à température cryogénique sur des échantillons de taille millimétrique, intervient pareillement aux températures ambiantes dès que les dimensions caractéristiques descendent dans les échelles nanométriques. C'est pourquoi ces travaux trouvent complètement leur place dans l'axe *Nanothermique* de la Fédération de recherche *Transferts de Masse et de Chaleur*.

Thème Transferts en fluide oscillant

F. Jebali-Jerbi

Dans la très vaste problématique des écoulements oscillants (leur thermique, les cycles Stirling ou thermoacoustiques), notre action se focalise sur l'établissement d'une métrologie sûre et simple de la puissance acoustique et de la vitesse instantanée dans un écoulement alternatif. La difficulté est que la vitesse du fluide par définition oscille autour d'une valeur nulle ou quasi-nulle. Il en résulte, d'une part que le signal d'un fil chaud est très bruité, d'autre part que la calibration d'un fil chaud doit correspondre à ces conditions très spécifiques d'utilisation. Il est donc important de savoir déterminer correctement la vitesse du fluide, son amplitude et sa phase, non seulement pour la connaissance que cette mesure apporte sur la dynamique du fluide mais aussi pour la possibilité offerte de coupler cette mesure avec une mesure de pression acoustique. On peut alors déduire précisément la puissance acoustique mise en jeu, et avoir ainsi accès à l'énergétique du système, même lorsque le taux d'ondes stationnaires est important.

Nous avons donc réalisé un tube résonnant mu par un haut-parleur électrodynamique. La présence d'un stack, monté en 2006, permet d'étudier la transformation thermoacoustique de l'écoulement oscillant provoqué par le haut-parleur. Les expériences réalisées en 2007 montrent un très bon accord entre mesures et calculs acoustiques, en particulier sur le déphasage entre capteurs de pression, voir la [page de présentation](#)¹⁵. Cet accord sur la phase, premièrement représente une nette amélioration par rapport aux expérimentations précédentes, deuxièmement donne accès à la puissance acoustique de l'écoulement. La réflexion sur l'anémométrie fil chaud, la calibration des fils chauds en amplitude ET en phase, se poursuit et les expériences devraient être réalisées en 2008. Ces travaux se font en interaction avec P. Lotton (LAUM).

Thème Transferts en milieux poreux adsorbants

M. Firdaouss, V. Bourdin, D. Bisch, M. Pons

Chacun des deux axes de ce thème aborde un problème fondamental avec des retombées applicatives.

Le premier axe concerne les mesures de cinétique d'adsorption. Ces mesures sont réalisées grâce à la technique de réponse thermique en fréquence, une méthode macroscopique qui est la spécialité du groupe TSF (voir les pages de présentation des rapports [2002](#)¹⁶, [1999](#)¹⁷, [1996](#)¹⁸). Les systèmes silicalite+alcane sont l'objet d'investigations intenses. En effet, l'industrie pétrolière a besoin de ces données cinétiques afin d'améliorer ses procédés de séparation, en particulier des isomères. Cette question est aussi l'enjeu d'un débat académique entre, d'un côté l'approche microscopique (mesures par QENS, PFG-NMR et la dynamique moléculaire) et de l'autre l'approche macroscopique. Habituellement ces deux approches divergent de deux à trois ordres de grandeur dans leurs évaluations des cinétiques d'adsorption. Est-ce dû à un artefact expérimental ou bien à un phénomène fondamental n'agissant qu'à l'échelle macroscopique ? Nos mesures, réalisées avec une méthode macroscopique, sont cohérentes avec celles obtenues par les méthodes microscopiques. Nous pensons, dans le dépouillement de nos données brutes, mieux tenir compte des

¹⁵ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_oscillating_fluid

¹⁶ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2002FF/MECA2002FF/TSF2002FF/tsf1.html

¹⁷ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS99FF/MECA99FF/ADS99FF/ads3/

¹⁸ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS96FF/ME/ADS/ADS1.html

couplages entres transferts de masse et de chaleur que cela n'est fait dans l'interprétation des autres mesures macroscopiques. Depuis 2005, nous avons étendu les mesures obtenues avec les isomères isobutane et n-butane, cf. la page de présentation [2005](#)¹⁹ et l'article (Bourdin et al. *Diffusion Fundamentals Conf.* 2005) aux pentane, hexane, heptane et octane. Après avoir exploré des températures allant de -15 à 90°C, des taux de remplissage compris entre 30 et 90% et des pressions allant de 10 à 1000 Pa, nous obtenons toujours un accord remarquable avec les méthodes microscopiques, voir la [page de présentation](#)²⁰. L'International Research Group *Diffusion in Zeolites* est particulièrement intéressé par ces résultats.

L'expertise de V. Bourdin dans le domaine de l'adsorption est aussi régulièrement sollicitée par le Service d'Aéronomie de Paris 6 (IPSL Paris) pour dimensionner des dispositifs adsorbants destinés à piéger des molécules, soit dans l'espace, soit au sol. V. Bourdin est ainsi intervenu sur l'expérience SAMU (Spectromètre de masse Aéroporté Multi-espèce) de l'équipe Physico-Chimie de la Troposphère et sur l'expérience PHOEBOS.

Le second axe de ce thème concerne le stockage d'hydrogène dans un réservoir rempli de matériaux adsorbants (charbons actifs, nanotubes de carbone). Ce sujet, aussi en phase avec les préoccupations actuelles sur l'énergie, était celui d'un Programme de Recherche (PR) de l'Action Concertée Énergie constitué autour du LIMHP, le laboratoire français qui teste cette technique. Afin d'interpréter leurs mesures, et aussi d'être en mesure de dimensionner d'éventuels réservoirs d'hydrogène, le LIMHP a développé un code numérique pour simuler la phase de remplissage du réservoir, de loin la plus critique. Nous avons pu tester à l'aide de nos codes MFN détaillés la validité de certaines hypothèses simplificatrices du code global développé au LIMHP, en particulier l'absence d'influence, soit des conditions en amont du lit, soit du régime transitoire, sur l'hydrodynamique du gaz à l'intérieur du lit poreux adsorbant. Pour ce faire, nous avons développé et fait tourner des modèles numériques axisymétriques, voir la page de présentation [2005](#)²¹ et l'article (Momen et al. *IHEC* 2005). Depuis 2005, nous avons consolidé nos résultats numériques et avons aussi étudié l'influence de la forme du volume libre à l'entrée du réservoir, voir la [page de présentation](#)²². Le PR a pris fin en 2005. La poursuite de telles recherches dépend en fait complètement de la capacité d'adsorption des matériaux carbonés à venir, celle des matériaux actuels étant très insuffisante pour développer des réservoirs à hydrogène.

Personnels

Permanents

Prénom	Nom	Statut	Position	Organisme
Jairaj	Amrit	Ens-Ch	MC	Paris XI
Danièle	Bisch	ITA	AI	CNRS
Vincent	Bourdin	ITA	IR2	CNRS
Marie-Christine	Duluc	Ens-Ch	MC	CNAM
Mouaouia	Firdaouss	Ens-Ch	MC	Paris VI
Fathi	Jebali Jerbi	Ens-Ch	MC	Paris VI
Damir	Juric	Ch	CR1	CNRS
Michel	Pons	Ch	CR1	CNRS

Doctorant

Prénom	Nom	Ecole doctorale	Etablissement d'inscription
Isam	Elayyadi	Physique Macroscopique	Paris VII

¹⁹ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2005/meca/tsf/tsf5/

²⁰ Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_butane_isobutane_silicalite

²¹ Lien hypertexte : www.limsi.fr/RS2005/meca/tsf/tsf6/

²² Lien hypertexte : http://rs2007.limsi.fr/index.php/TSF:_gas_storage

Personnel non permanent

Prénom	Nom	Statut
Qiang	Li	Professeur invité

Participation à des instances

- Participations aux *Commissions de Spécialistes* de différentes universités : Marne-la-Vallée sections 30-33 et 62 (M.-C. Duluc, M. Pons), UPMC Section 60 (M. Pons), UPMC Section 62 (M.-C. Duluc), Paris-Sud 11 Section 62 (J. Amrit, vice-président B jusqu'en 2006).

Enseignement et diffusion des connaissances

- M. Firdaouss assure le cours *Bases en méthodes numériques* dans le M2 *Mécanique-Énergétique* de l'UPMC, pour les deux parcours *Recherche* et *Professionnel*.
- V. Bourdin donne un cours sur *l'Énergie solaire thermique* dans le module *Énergies alternatives* du M2 de *Mécanique physique* de l'Université Paris-Sud 11 à l'attention des étudiants des parcours *Rayonnement et énergie*, *Énergie et environnement*, et *Modélisation en mécanique des fluides*.

Organisation de colloques

- Organisation par M. Pons du deuxième séminaire CARNOT tenu du 26 au 28 janvier 2005 à la Délégation Fontainebleau de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Environ 25 participants (PROMES, LEMTA, CETHIL, LaTEP, LSGC, LOCIE, École Mines de Paris, LAIL, PHASE, LMP), 15 exposés.
- M. Pons participe au comité d'organisation de l'école thématique OCET (Optimisation et Contrôle des Écoulements et Transferts). La première édition a eu lieu à Aussois, du 12 au 17 mars 2006. La seconde édition, en préparation, est prévue à Batz sur mer, du 14 au 19 septembre 2008.

Organisation de séminaires

- M. Pons est co-responsable de l'organisation du Séminaire de Mécanique d'Orsay (LIMSI – FAST, environ un séminaire par semaine).

Édition de revue

- En 2005, M. Pons a été *Guest Editor* de *Int. J. Thermal Sci.*, pour coordonner le numéro spécial de cette revue dédié à la mémoire de Bernard Spinner (9 articles, Numéro de décembre 2005).

Interventions dans des écoles thématiques et participations à séminaires

- Amrit J., La résistance thermique à l'interface Silicium/superfluide : effets de rugosités de surface, Séminaire GDR *Thermique des Nanosystèmes et Nanomatériaux*, CETHIL-INSA Lyon, 6 juin 2007.
- Bourdin V. et Bisch D., Diffusion of butane and isobutane in silicalite by IR emission frequency response (TFR), Workshop of International Research Group "Diffusion in Zeolites". CNRS, DFG, EPSRC. Leipzig, Germany, April 15, 2005 (2005).
- Bourdin V., Bisch D., Cinétique d'adsorption par réponse en fréquence thermique : une méthode indirecte de mesure de la conductivité effective des adsorbants, Journée SFT La thermique des Matériaux Nanoporeux, le 27 Janvier 2005, Espace Hamelin, Paris²³.
- Bourdin V. et Bisch D., Diffusion of butane and isobutane in silicalite by IR emission frequency response (TFR), Workshop of International Research Group "Diffusion in Zeolites". CNRS, DFG, EPSRC. Leipzig, Germany, April 15, 2005 (2005).
- Bourdin V. et Bisch D., Diffusion of butane and isobutane in silicalite by IR emission frequency response (TFR), Workshop of International Research Group "Diffusion in Zeolites". CNRS, DFG, EPSRC. Leipzig, Germany, April 15, 2005 (2005).
- Daru V., Duluc M.-C., Elayyadi I., Juric D., Le Maître O., & Le Quéré P., Simulation numérique d'écoulements liquide-vapeur faiblement compressibles, Séminaire Fédération TM&C – Convection Hors-Boussinesq, 19 décembre 2006, Évry.
- Firdaouss M. et Pons M., Influence des conditions amont sur l'écoulement dans un lit granulaire, 7èmes Journées d'Étude sur les Milieux Poreux, 26-27 octobre 2005, Bordeaux.
- Juric D., G. Tryggvason and S. Shin, Three-Dimensional Simulation of Vapor Bubble Dynamics in Nucleate Boiling, 58th Annual Meeting American Physical Society (Div. Fluid Dynamics), Chicago USA, November 20-22, 2005.

²³ voir : http://www.sft.asso.fr/DOCUMENTS/journees_SFT/Nanoporeux_27-01-2005/IR_VB.pdf

- Juric D., A Lagrangian/Eulerian Approach to Numerical Modeling in Multiphase Flows, invited seminar Dept. Mech. Engng., Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA, February 25, 2005.
- Juric D., Modélisation et simulation d'écoulements multiphasiques, 14^{ème} Colloque Alain Bouyssy, Orsay, 23-24 février 2006.
- Juric D., Three-dimensional simulation of vapor bubble dynamics in nucleate boiling, 18^{ème} Congrès Français de Mécanique CFM'07, Grenoble, 27-31 Août 2007.
- Pons M., Le mur instationnaire : une solution analytique et une approche procédée. Deuxième séminaire CARNOT, ENSMP – Fontainebleau, 26-28 janvier 2005.
- Pons M., Le principe de moindre action. Deuxième séminaire CARNOT, ENSMP – Fontainebleau, 26-28 janvier 2005.
- Pons M., La thermodynamique en temps fini : une obscure clarté, des pistes à explorer. Deuxième séminaire CARNOT, ENSMP – Fontainebleau, 26-28 janvier 2005.
- Pons M., Une approche locale du second principe, Troisième École de Printemps de Thermodynamique (PRI CARNOT Programme Énergie du CNRS), 6-9 juin 2005, Pau.
- Pons M., Thermodynamique, convection naturelle et modèles de Boussinesq. Troisième Séminaire CARNOT (PRI CARNOT Programme Énergie du CNRS), Aussois, 24-26 avril 2006.
- Pons M., Thermodynamique, convection naturelle et modèles de Boussinesq, Premier séminaire Fédération TM&C (Transferts de Masse et de Chaleur) , EM2C Chatenay-Malabry, 7 juin 2006.
- Pons M., Thermodynamique, convection naturelle et modèles de Boussinesq, Séminaire Fédération TM&C – Convection Hors-Boussinesq, 19 décembre 2006, Évry.
- Pons M., Analyse exergétique et sources réelles - Le cas de la climatisation solaire, Quatrième Séminaire CARNOT (GAT *Efficacité Énergétique*, ACI *Énergie – Conception Durable*, CNRS), Aussois, 15-17 octobre 2007.

Collaborations de recherche

Nationales

- Participation de M.-C. Duluc et M. Pons au **GdR AMETH**²⁴, dirigé par E. Arquis, au travers des thèmes Dynamique de l'ébullition libre et Thermodynamique des systèmes. Dans ce cadre, la continuation de la collaboration de M.-C. Duluc avec B. Stutz et M. Lallemand du CETHIL (Villeurbanne) se traduit par la soumission cet été d'un article à Int. J. Heat Mass Transfer.
- Collaboration de M. Pons avec P. Joubert et P. Bourdoukan, **LEPTAB**, Université La Rochelle, sur l'analyse second principe d'une installation expérimentale de climatisation solaire par cycle à roue dessiccante. Convention No 020990 du 9 août 2007.
- Participation de M. Pons à l'axe *Convection naturelle Hors-Boussinesq* de la **Fédération de recherche Transferts de Masse et de Chaleur**, rassemblant EM2C (École Centrale, Chatenay-Malabry), LMEE (Évry), LETEM (Marne-la-Vallée), FAST (Orsay) et LIMSI.
- Participation de M. Pons au **projet ANR-PREBAT ORASOL**, projet piloté par F. Lucas (LPBS, St Pierre de la Réunion) avec l'INES (Chambéry), le LOCIE (Le Bourget du Lac), le PROMES (Perpignan), le LaTEP (Pau), et TECSOL (Perpignan).
- Participation de M. Pons aux **PRI CARNOT 1 et 2** (Communauté d'Analyse et de Recherche sur les Nouvelles Orientations de la Thermodynamique), avec le PROMES (ex-IMP, Perpignan), le LSGC (Nancy), le CETHIL (Villeurbanne), le LEMTA (Nancy), le LaTEP (Pau), le CENERG (École des Mines Paris), le LMTM (CNAM Paris) et LMP (Paris), le LOCIE (Chambéry), le LAIL (Lille) et le PHASE (Toulouse), dans le cadre du programme interdisciplinaire *Énergie* du CNRS.
- Collaboration de J. Amrit avec J.-P. Thermeau, équipe R&D Basses Températures de l'**IPNO** (Orsay), sur la mesure de la résistance Kapitza (Si/He-superfluide) à très basse température
- Collaboration de J. Amrit avec C.-Z. Antoine, (**CEA/DAPNIA/SACM**, Gif sur Yvette) sur les transferts de chaleur entre cavités supraconductrices et hélium superfluide et sur la conductivité thermique des polycristaux.
- Participation de J. Amrit à l'axe *Nanothermique* de la **Fédération de recherche Transferts de Masse et de Chaleur**.
- Collaboration de F. Jebali avec P. Lotton (**LAUM** Le Mans) sur le couplage d'un haut-parleur électrodynamique avec un système thermoacoustique.
- Collaboration informelle de V. Bourdin avec B. Mège, IR au Service d'Aéronomie de Paris 6, IPSL, sur des pièges adsorbants.
- Participation de M. Pons et M. Firdaouss au **PR H2-THERM Modélisation thermique et mécanique du stockage d'hydrogène par adsorption**, financé par l'Action Concertée Énergie du CNRS-MNRT-DGA, avec le LIMHP (Villetaneuse), le LEGI (Grenoble), le LMARC (Besançon), le LEMTA (Nancy) et le PROMES (Perpignan). M. Pons et M. Firdaouss ont participé aux jurys de thèse de Gelareh Momen (en cotutelle LIMSI-LIMHP) et de Guillaume Hermosilla-Lara (novembre 2006 et février 2007).

²⁴ AMETH = Analyse et Maîtrise des Écoulements et Échanges Thermiques

Internationales

- Collaboration de M. Pons avec Ph. Dind, et depuis 2006 avec son successeur S. Citherlet et son équipe (**LESBAT, HEIG-Vd**, Yverdon-les-Bains, Suisse) sur la réfrigération solaire.
- Participation invitée de V. Bourdin à l'**International Research Group Diffusion in Zeolites**, avec S. Brandani (University College, London), J. Caro (Universität Hannover, Allemagne), H. Jobic (IRC Villeurbanne), J. Kärger, R. Staudt (Universität Leipzig, Allemagne), F. Schüth (Max-Planck-Institut, Mülheim an der Ruhr, Allemagne), J. Weitkamp (Universität Stuttgart, Allemagne), et D. M. Ruthven (Maine University, USA) comme consultant invité. Ce groupe est financé par le CNRS (France), la DFG (Allemagne) et le EPSRC (Royaume Uni).

Contrats de recherche et valorisation

Tableau des contrats

Date d'effet	Date de fin	Intitulé	Type	Organisme financeur-Partenaire	Part labo	Responsable scientifique	Catégorie
01/01/2001	31/12/2007	DRI Pologne	Autre	CNRS / Académie polonaise des sciences (PAN)	13 900 €	Le Quéré Patrick	Partenariat
17/04/2007	16/04/2009	ORASOL	PREBAT	ANR	45 320 €	Lucas Franck	Collaboration de recherche
09/08/2007	08/08/2010	Irréversibilités dessicantes	Autre	Université La Rochelle	-	Pons Michel	Collaboration de recherche

Production scientifique

Thèses

1. Amrit, J., *Etude de l'interface hélium superfluide-solide : surfaces des cristaux d'hélium-4, résistance de Kapitza et transferts de chaleur à microéchelle*, Habilitation à Diriger des Recherches. 2005, Université Paris 11/LIMSI.
2. Planchette, A., *Contribution à l'étude des écoulements verticaux d'azote liquide diphasique dans les canaux rectangulaires des vaporisateurs industriels*. 2006, Université Paris 6/LIMSI.

Revue à comité de lecture

1. Amrit, J., *Effect of surface roughness on the anomalous heat conductance at solid/superfluid helium interfaces : a way of quantifying phonon scattering in microstructures*. Journal of Physics D : Applied Physics, 2005. **38**(10): p. 1504-1510.
2. Amrit, J., *Grain boundary Kapitza resistance and grain-arrangement induced anisotropy in the thermal conductivity of polycrystalline niobium at low temperatures*. Journal of Physics D : Applied Physics, 2006. **39**(20): p. 4472-4477.
3. Daru, V., M.-C. Duluc, O. Le Maitre, D. Juric, and P. Le Quéré, *Modélisation et simulation numérique du changement de phase liquide-vapeur en cavité*. Comptes Rendus Mécanique, 2006. **334**(1): p. 25-33.
4. Duluc, M.-C., B. Stutz, and M. Lallemand, *Boiling incipience in liquid nitrogen induced by a step change in heat flux*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007. **Accepted 2007**: 13p.
5. Pons, M. and P. Le Quéré, *An example of entropy balance in natural convection - Part 1 : the usual Boussinesq equations*. Comptes Rendus Mécanique, 2005. **333**(2): p. 127-132.
6. Pons, M. and P. Le Quéré, *An example of entropy balance in natural convection - Part 2 : the thermodynamic Boussinesq equations*. Comptes Rendus Mécanique, 2005. **333**(2): p. 133-138.
7. Pons, M. and P. Le Quéré, *Modeling natural convection with the work of pressure-forces: a thermodynamic necessity*. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2007. **17**(3): p. 322-332.
8. Shin, S., S.I. Abdel-Khalik, V. Daru, and D. Juric, *Accurate representation of surface tension using the level contour reconstruction method*. Journal of Computational Physics, 2005. **203**(2): p. 493-516.
9. Shin, S., S.I. Abdel-Khalik, and D. Juric, *Direct three-dimensional numerical simulation of nucleate boiling using the level contour reconstruction method*. International Journal of Multiphase Flow, 2005. **31**(10-11): p. 1231-1242.
10. Shin, S. and D. Juric, *High order level contour reconstruction method*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007. **21**(2): p. 311-326.

11. Strub, F., J. Castaing-Lasvignottes, M. Strub, M. Pons, and F. Monchoux, *Second law analysis of periodic heat conduction through a wall*. International Journal of Thermal Sciences, 2005. **44**(12): p. 1154-1160.

Livres et ouvrages

Chapitres d'ouvrage

1. Vincent, S., J.P. Caltagirone, and D. Juric, *Test-case No 11b : stratching of a circle in a vortex velocity field (N)*, in *Validation of Advanced Computational Methods for Multiphase Flow*, J.D.L.O. Lemonnier H, Editor. 2005, Begell house. p. 85-89.

Conférences à comité de lecture

1. Amrit, J. and Q. Li. *Simulation of the impact of the Kapitza resistance at grain-grain boundaries on niobium superconducting cavities*. in *CEC-ICMC 2007. 2007 Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference*. 2007.

2. Bourdin, V., S. Brandani, A. Gunadi, H. Jobic, C. Krause, J. Karger, and W. Schmidt. *Diffusion of n-alkanes in MFI-type zeolites : a comparative study with different measuring techniques*. in *Diffusion Fundamentals Conference 2005 : Basic principles of theory, experiment and application*. 2005.

3. Daru, V., M.-C. Duluc, I. Elayyadi, and P. Le Quéré. *Numerical simulations of liquid vapour phase change problem in a closed cavity*. in *IHTC-13. 13th International Heat Transfer Conference*. 2006.

4. Daru, V., M.-C. Duluc, D. Juric, and P. Le Quéré. *A numerical model for the simulation of liquid-vapor phase change in an enclosure*. in *ICCHMT 2005. 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*. 2005.

5. Daru, V., M.-C. Duluc, O. Le Maitre, D. Juric, and P. Le Quéré. *Simulation numérique d'écoulements liquide vapeur faiblement compressibles*. in *CFM 2005. 17ème Congrès Français de Mécanique.AFM*. 2005.

6. Duluc, M.-C., V. Daru, I. Elayyadi, and P. Le Quéré. *Déplacement d'interface liquide - gaz sous l'effet d'un chauffage*. in *SFT 2007 Congrès Français de Thermique "Thermique et Société"*. 2007.

7. Juric, D., S. Shin, and G. Tryggvason. *Direct numerical simulations of nucleate boiling*. in *ICMF 2007. 6th International Conference on Multiphase Flow*. 2007.

8. Momen, G., G. Hermosilla, A. Michau, M. Pons, M. Firdaouss, B. Leneindre, L. Madec, and K. Hassouni. *Numerical simulation of hydrogen storage under high pressure in porous packed bed*. in *IHEC 2005. International Hydrogen Energy Congress & Exhibition*. 2005.

9. Pons, M. *Bilans thermodynamiques de la transition mono multi-cellulaire dans les cavités à grand rapport de forme*. in *SFT 2007 Congrès Français de Thermique "Thermique et Société"*. 2007.

10. Pons, M. *The transition from single- to multi-cell natural convection of air in cavities with an aspect ratio of 20*. in *JETC IX Joint European Thermodynamics Conference IX*. 2007.

11. Pons, M. and P. Le Quéré. *Modelling natural convection with the piston effect, a thermodynamic necessity*. in *ICCHMT 2005. 4th International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*. 2005.

12. Pons, M. and P. Le Quéré. *La convection naturelle, un moteur thermique*. in *CFM 2005. 17ème Congrès Français de Mécanique, AFM*. 2005.

13. Pons, M. and P. Le Quéré. *Influence of the pressure stress work on heat transfer and flow in the differentially heated cavity*. in *IHTC-13. 13th International Heat Transfer Conference*. 2006.

14. Pons, M. and P. Le Quéré. *Flux de chaleur et irréversibilités autour de $Ra=1,8 \times 10^8$ pour deux cavités de tailles différentes*. in *SFT 2006. Congrès Français de Thermique*. 2006.

15. Xin, S., M.-C. Duluc, F. Lusseyran, and P. Le Quéré. *Etude numérique et expérimentale de la convection naturelle externe autour d'un fil chauffant*. in *CFM 2005. 17ème Congrès Français de Mécanique.AFM*. 2005.

Congrès sans actes, workshops

1. Pons, M. and P. Le Quéré. *L'influence de l'effet "travail des forces de pression" sur la convection naturelle dans l'habitat*. in *IBPSA - France 2006. International Building Performance Simulation Association Conference*. 2006.

2. Bisch, D. and V. Bourdin. *Diffusion of butane and isobutane in silicalite by IR emission frequency response (TFR)*. in *Workshop of International Research Group "Diffusion in Zeolites"*. CNRS, DFG, EPSRC. 2005.

3. Bisch, D. and V. Bourdin, *Cinétique d'absorption par réponse en fréquence thermique : une méthode indirecte de mesure de la conductivité effective des adsorbants*, in *Journée SFT : la thermique des matériaux nanoporeux. Société Française de Thermique*. 2005.

MAURICE-XAVIER FRANÇOIS

Introduction

Au cours de la période concernée par ce rapport, l'activité de l'action transversale s'est concentrée dans trois directions :

- La modélisation des systèmes, le développement des codes de calcul correspondants, la mise au point de maquettes expérimentales et la confrontation numérique-expérimental.
- L'étude théorique et analytique et la simulation numérique par approximation faible Mach de la cellule thermoacoustique.
- L'étude expérimentale et théorique des effets non linéaires dits de streaming.

Par ailleurs, les travaux de mise au point du « démonstrateur » de forte puissance, 2 kW à 120K, se sont poursuivis.

Cette activité s'est faite comme par le passé dans une forte collaboration :

- avec le concours de l'équipe « R&D Basse Température » de l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay (IPNO).
- avec la société HEKYOM installée à Orsay, Parc Club Université, dans le cadre du Transfert Technologique entrepris dès 2002 et de l'accord de licence signé entre l'UPMC-CNRS et la société HEKYOM en février 2005 pour l'exploitation des deux brevets (le deuxième brevet a été publié en novembre 2005) et du savoir faire du laboratoire.

Les relations internationales ont été poursuivies avec l'Académie des Sciences de Chine (Technical Institut of Phsics and Chemistry) et les Universités de Saint Jacques de Compostelle et de Bilbao d'une part, et de Calgary d'autre part. Ces collaborations ont donné lieu à des échanges de professeur et de post-doctorants.

Présentation de la recherche

Modélisation des systèmes, développement des codes de calcul correspondants

A. Bétrancourt, M.-X. François

Ce travail correspond à la thèse d'Adrien Bétrancourt, BDI CNRS cofinancée avec le Conseil Général de l'Essonne et HEKYOM. Grâce à la poursuite du développement du code CRISTA, une étape importante a été franchie en 2006 puisqu'il a été possible d'effectuer la simulation numérique d'une machine complète comprenant à la fois la source acoustique thermoacoustique couplée à sa charge thermoacoustique. La recherche a porté également sur une validation expérimentale et donc la mise au point des maquettes correspondantes. L'association de ces deux actions constitue le résultat final important. Le développement de maquette permet en outre de révéler les verrous technologiques éventuels qui sont en réalité une caractéristique essentielle des machines thermoacoustiques.

Dans ce même cadre, une version spécifique du code TADESIGN a été développée avec T. Le Pollès (Société HEKYOM) pour permettre le calcul d'amplificateurs acoustiques.

Mise au point de maquettes expérimentales et confrontation numérique-expérimental.

A. Bétrancourt, G. Defresne, M.X. François, en collaboration avec P. Duthil, J.P. Thermeau, X. Xie (IPNO) et T. Le Pollès, X. Louis (HEKYOM)

Les maquettes existantes au LIMSI-CNRS ont été modifiées, certains éléments étant en fonctionnement depuis 6 ans. Ces travaux à caractère technologique ont permis l'étude du vieillissement de ces composants, stack ou échangeur de chaleur. Un effort particulier a porté sur l'analyse des conditions de déclenchement de l'instabilité thermoacoustique qui correspond au démarrage du générateur d'onde. Il s'agit là d'un problème complexe où théorie, technologie et mise en œuvre sont totalement imbriquées dans des relations mal connues. Un ensemble constitué d'un générateur et d'un tube à gaz pulsé (TGP) a été construit. La température froide de -90°C a été atteinte en version TGP et -110°C en version boucle.

Avec la société HEKYOM, une nouvelle maquette de générateur + amplificateur acoustique a été étudiée (simulation numérique au LIMSI, étude technologique avec l'IPNO). Les résultats des essais du printemps 2007 sont très encourageants et montrent un très bon accord calcul – expérience.

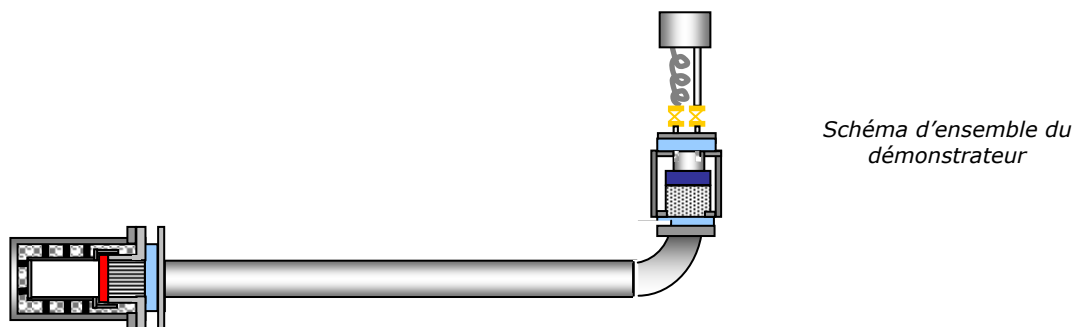
Réfrigérateur thermoacoustique produisant 2 kW à 120 K

D. Baltean Carlès, A. Bétrancourt, G. Defresne, M.-X. François en collaboration avec P. Duthil, J.-P. Thermeau (IPNO)

Ce projet a été cofinancé par l'ANVAR, le Conseil Général de l'Essonne, le CNRS (ex-DAE) et la Valorisation IN2P3.

Le projet a rencontré de nombreux obstacles, essentiellement technologiques, dont l'étude s'est poursuivie de façon méthodique. Ils ont révélé certaines difficultés liées au changement d'échelle (un facteur 25 par rapport aux précédentes réalisations du LIMSI) correspondant à la mise au point de ce « démonstrateur ». Ils ont permis de proposer un programme d'analyse méthodique des conditions de démarrage des machines thermoacoustiques. Ces conditions ont été testées et validées sur les nouvelles machines de petite taille de l'équipe. Ces résultats sont confidentiels dans le cadre de la licence UPMC/CNRS-HEKYOM.

Des conclusions positives sont attendues pour le troisième trimestre 2007. En effet, compte tenu de la petite taille de l'équipe mixte (LIMSI-IPNO-HEKYOM), la priorité a été donnée à la mise au point des nouvelles maquettes présentant une très grande fiabilité métrologique et demandant un financement réaliste.



Analyse expérimentale des effets non linéaires dans les systèmes thermoacoustiques

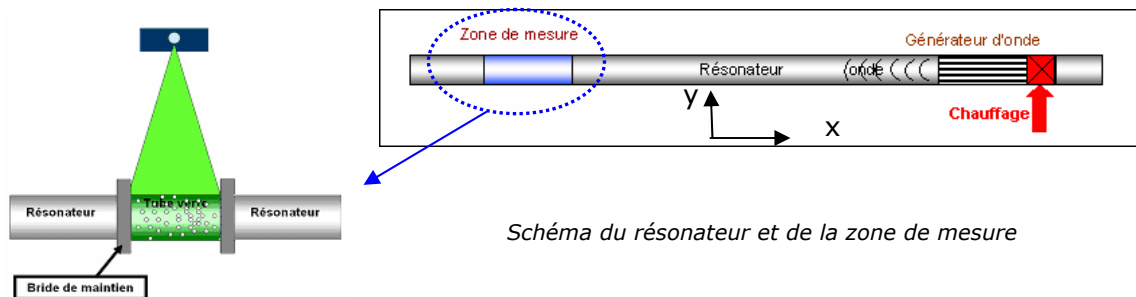
D. Baltean-Carlès, P. Debesse, F. Lusseyran, M.-X. François

Cette étude fait l'objet de la thèse de Ph. Debesse (ED SMAE). Elle s'inscrit dans la suite d'une action de collaboration avec l'équipe PIV de F. Lusseyran, initiée en 2005.

Les phénomènes non linéaires présents dans les systèmes thermoacoustiques sont responsables de l'apparition des écoulements continus secondaires qui se superposent aux oscillations acoustiques dominantes, pénalisant l'efficacité des systèmes. L'objectif de cette étude est de caractériser le champ de

vitesse acoustique (de l'ordre du m/s) dans un résonateur contenant un générateur d'onde thermoacoustique et de mettre en évidence les écoulements secondaires (de l'ordre du cm/s).

La métrologie classiquement utilisée dans ce cas est la vélocimétrie par images de particules (PIV), méthode qui a nécessité une adaptation aux systèmes thermoacoustiques avec une forte pression moyenne et un générateur d'ondes thermoacoustique. Nous utilisons une méthode originale de PIV, développée au LIMSI, fondée sur les techniques de flot optique. Le système expérimental est constitué d'un générateur d'onde thermoacoustique quasi-stationnaire créée dans un guide d'onde fermé à ses extrémités, et d'une zone de mesure adaptée pour l'application de la vélocimétrie par image de particule (PIV) (figure ci-dessous). Le gaz utilisé est l'azote, sous une forte pression moyenne (7×10^5 Pa- 15×10^5 Pa). Le paramètre de contrôle est la pression acoustique.



Les champs PIV ont été calculés avec deux procédures expérimentales validées par une comparaison avec les prédictions de l'acoustique linéaire :

Méthode 1 : Champs PIV sans référence de phase. Les champs de vitesses, fortement sous-échantillonnés par rapport à la fréquence de l'onde ($= 22$ Hz), sont obtenus avec des paires d'images enregistrées à cadence constante ($= 10$ Hz), acquises de manière désordonnée par rapport à la période acoustique. Le cycle acoustique du champ de vitesse a été reconstruit avec une méthode originale de post-traitement, développée dans le cadre de la thèse. Cette méthode permet de réordonner les vitesses suivant leur phase à l'intérieur d'une période de base avec une technique de projection par décomposition en valeurs singulières (SVD). Le signal ainsi reconstruit permet l'identification des composantes modales de l'onde (amplitudes et phases respectives). Le champ de vitesse moyenné (en temps) montre l'existence d'un écoulement moyen du même ordre de grandeur que le Rayleigh streaming, mais avec un profil distordu par la présence des phénomènes tridimensionnels.

Méthode 2 : Champs PIV avec référence de phase. Les champs de vitesses sont obtenus avec des paires d'images enregistrées à phase constante du cycle acoustique, en utilisant une électronique de synchronisation avec le signal de pression. Cette procédure expérimentale a permis une analyse des champs de vitesses par une méthode classique de moyennes de phase (16 phases du cycle équiréparties). Les résultats sont en parfait accord avec ceux obtenus par la première méthode pour la mesure de la composante acoustique et en bon accord pour la mesure de la composante moyenne.

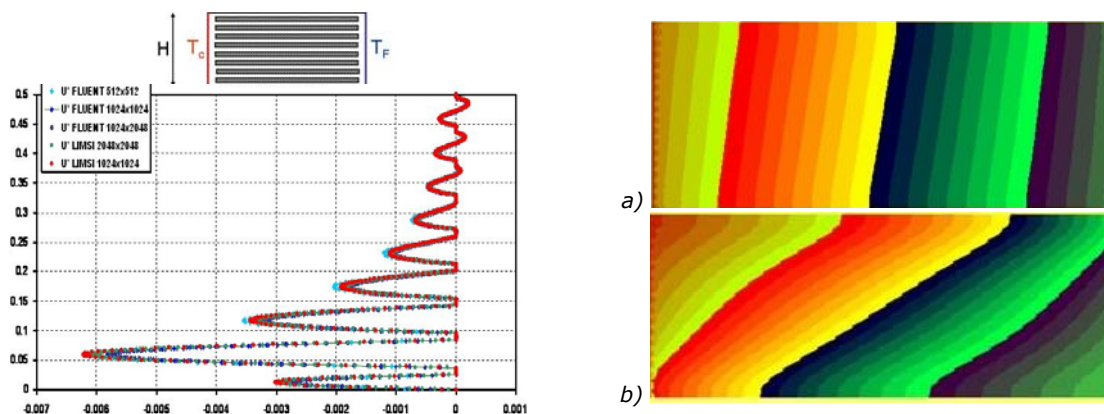
Étude numérique de la convection naturelle autour et dans le stack moteur

C. Weisman, P. Duthil, D. Baltean-Carlès

L'étude concerne la convection dans une cavité bidimensionnelle différentiellement chauffée contenant un empilement de plaques planes horizontales conductrices. Le rapport de forme (longueur/hauteur) de la cavité est de 2.5 et il existe un espacement réduit entre les extrémités des plaques et les parois. Cette étude est motivée par une application sur une expérience en thermoacoustique, où la convection dans le stack (empilement de plaques) semble empêcher l'établissement du champ thermique nécessaire au déclenchement du générateur d'ondes.

Les stacks utilisés comportent plusieurs centaines de plaques et le calcul complet nécessite un maillage trop fin. L'étude que nous menons consiste à effectuer des calculs (avec un code instationnaire résolvant les équations de Boussinesq) pour un nombre restreint de plaques conductrices (l'équation de la chaleur est résolue dans les plaques), afin de pouvoir ensuite évaluer la pertinence d'un calcul utilisant un modèle de milieu poreux représentant l'empilement. Nous avons effectué les calculs pour plusieurs valeurs du nombre

de Rayleigh (Rayleigh hauteur entre 10^5 et 10^8) ainsi que l'étude de convergence en maillage. Nous avons utilisé plusieurs nombres de plaques (17, 34, 68). L'objectif est la description de la répartition de température dans le stack pour des valeurs de Rayleigh correspondant aux applications pratiques. La figure ci-dessous montre un exemple de résultats :



Profils de vitesse horizontale au milieu de la cavité

Champs de température : a) $Ra=10^6$, b) $Ra=10^7$

Analyse multi-échelles et adaptation du modèle numérique à faible nombre de Mach pour la prise en compte du couplage stack/champ acoustique résonnant

C. Weisman, D. Baltean-Carlès, M.-X. François, P. Le Quéré en collaboration avec P. Carlès (UPMC, IJLRA) et L. Bauwens (Université de Calgary, Canada)

Il s'agit d'une étude initiée en 2006 en collaboration avec P. Carlès (IJLRA), qui s'inscrit dans l'axe d'étude des phénomènes non linéaires du projet de GDR-thermoacoustique 2007 et qui fait l'objet d'un soutien financier spécifique recherche de l'UPMC (BQR 2007).

Les grands rapports d'échelle d'espace et de temps présents dans un système thermoacoustique permettent, dans de nombreuses circonstances, de découpler les échelles et donc les phénomènes, et d'en dégager des modèles simplifiés qui pourront être résolus analytiquement ou simulés numériquement. L'une des voies en ce sens est la simulation numérique à faible nombre de Mach. Cette approche, développée par Paolucci dans un contexte différent, consiste à établir un développement asymptotique des équations de Navier-Stokes compressibles à faible nombre de Mach pour en dégager un découplage entre la propagation acoustique et son effet macroscopique sur la pression. Cette technique, sur laquelle le LIMSI possède une solide expérience, a déjà montré son intérêt dans l'étude du stack (thèse de P. Duthil avec C. Weisman et M.-X François). Le travail présent a comme objectif l'adaptation des codes 2D du LIMSI à l'aide des méthodes asymptotiques multi-échelles, pour réaliser le couplage entre le pompage de chaleur dans le stack et le champ acoustique dans le résonateur, résultats qui seront confrontés aux expériences modèles existantes au laboratoire. On envisage par la suite la modélisation du streaming entre les plaques du stack.

Une autre application de ce travail se poursuit sous la forme d'une collaboration avec L. Bauwens de l'Université de Calgary. L'objectif général est l'étude des générateurs d'ondes (moteurs) thermoacoustiques. La configuration de travail est la suivante : un stack est placé entre deux échangeurs de chaleur, à l'intérieur d'un tube résonant, fermé aux deux extrémités ; la position du stack moteur est proche d'une extrémité du résonateur tandis que du côté opposé se trouve une charge, par exemple un réfrigérateur thermoacoustique. Une différence de température est appliquée entre les deux échangeurs de chaleur. De point de vue technologique, il existe toujours un petit espace entre le stack et les échangeurs. Un des objectifs de ce travail est l'étude de l'influence de la variation de cet espacement entre le stack et les échangeurs sur l'amplification de l'onde, et donc sur l'efficacité d'un tel générateur d'onde. Une hypothèse importante de travail est celle de la longueur très courte du stack par rapport à la longueur d'onde acoustique, hypothèse qui justifie l'utilisation de l'approximation en faible nombre de Mach pour décrire l'écoulement à l'intérieur du stack. Dans ce contexte, le code 2D faible Mach existant (utilisé jusqu'à présent pour l'étude de l'écoulement du fluide et du pompage de chaleur dans le stack réfrigérant) est modifié cette fois-ci pour un fonctionnement du stack de type moteur, en utilisant l'étude asymptotique permettant le couplage stack/résonateur, et en prenant en compte les échangeurs de chaleur. La température est imposée au niveau des échangeurs et les conditions limites sont calculées et imposées pour que l'amplification de l'onde soit réalisée.

Personnels

Permanents

Prénom	Nom	Statut	Position	Organisme
Diana	Baltean	Ens-Ch	MC	Paris VI
Gérard	Defresne	Ens-Ch	Pr. Ag.	Paris XI
Maurice-Xavier	François	Ens-Ch	Pr1	Paris VI

Doctorants

Prénom	Nom	Ecole doctorale	Etablissement d'inscription
Adrien	Bétrancourt	SMAE	Paris VI
Philippe	Debesse	SMAE	Paris VI

Personnels non permanents

Prénom	Nom	Statut
Manuel	Osorio	Post-doc

Collaborations de recherche

Internationales

- ESPAGNE : L'Université de Saint Jacques de Compostelle, Professeur F. VIDAL, spécialisée en particulier dans l'étude théorique et expérimentale des matériaux supraconducteurs à haute température Critique (HTC). L'intérêt convergent est dans la réfrigération de ces matériaux où le procédé thermoacoustique peut être un candidat. M. Osorio, Post-Doc de cette Université, a été présent au LIMSIS pour l'année académique 2005-2006, puis pour deux mois en 2007.
- CHINE : Le laboratoire de Cryogénie de l'Institut de Physique et Chimie de l'Académie des Sciences de Chine à Pékin et avec Les Professeurs LI Qing, LUO Ercang, et l'Académicien ZHOU Yuan. Ce laboratoire travaille sur les mêmes thèmes que l'ATT à un niveau de compétence équivalent. En 2006-2007, le séjour post-doctoral de Xiujuan XIE dans l'équipe mixte LIMSIS-IPNO-HEKYOM a été financé par HEKYOM.
- CANADA : Le département de Mechanical Engineering de l'Université de Calgary, Professeur Luc Bauwens. Le sujet de collaboration est développé ci-dessus.

Nationales

Collaboration LIMSIS-IPNO en R&D

L'équipe ATT a poursuivi et amplifié sa collaboration avec l'équipe R&D Basses Températures de l'IPNO. Cette synergie reste le point fort de l'ATT pour le développement des stations d'essais dans le cadre de l'opération de transfert de technologie.

Institut JLRA

Une collaboration avec P. Carlès a débuté en 2005 tout d'abord à titre de conseil pour l'analyse des résultats expérimentaux des différentes maquettes et tout particulièrement le « démonstrateur ». Cette collaboration s'est poursuivie en 2006 en s'ouvrant sur une étude asymptotique et numérique exposée ci-dessus.

GDR Thermoacoustique

A l'initiative du LIMSIS, une réunion a été organisée à Orsay en juillet 2006 pour examiner l'intérêt et le contenu d'une proposition de GDR « Thermoacoustique » au CNRS qui a été accepté à partir de janvier 2007. Le GDR regroupe les principaux laboratoires français concernés : LAUM (Le Mans), LMFA (Lyon), LEA (Poitiers), LIMSIS-CNRS, IPNO, auxquels d'autres laboratoires français et européens sont associés (TREFLE, IJLRA, ECN - Pays Bas) ou seront associés (ex : Stokes Research Institute-Université de Limerick ou

Eindhoven University of Technology). Le programme de recherche du GDR s'articule autour de 4 thèmes: phénomènes fondamentaux, métrologie adaptée à l'étude des systèmes thermoacoustiques, méthodologies de modélisation, composantes-architectures-systèmes, thèmes dans lesquelles s'inscrivent les activités de recherche développées par notre équipe.

Contrats de recherche et valorisation

Soutiens financiers pour l'opération de transfert

- Action ASTRE dans le cadre de la convention UPMC/CG91-N373
- BQR Recherche UPMC-2007

Valorisation et transfert

E. Bretagne, P. Duthil, M.X. François

Après un premier brevet déposé en 2002, PCT en 2004, un deuxième brevet a été publié en novembre 2005. Ce brevet concerne les architectures acoustiques des systèmes thermoacoustiques.

Par ailleurs, l'équipe LIMSI et l'IPNO soutiennent l'action de l'UPMC et du CNRS débutée en 2003 dans la création de la Start Up HEKYOM ayant pour programme le développement d'une ingénierie thermoacoustique appliquée à la réfrigération non polluante. Une licence d'exploitation des brevets UPMC-CNRS a été signée avec cette société.

Tableau des contrats

Date d'effet	Date de fin	Intitulé	Type	Organisme financeur-Partenaire	Part labo	Responsable scientifique	Catégorie
01/11/2004	31/12/2006	ASTRE	Autre	Conseil Général de l'Essonne	63 000 €	François Maurice Xavier	Collaboration de recherche
01/12/2005	31/12/2006	Proto ATT	Autre	IPN	-	François Maurice Xavier	Collaboration de recherche
01/01/2008	31/12/2008	BQR 2008	BQR	Université Paris VI	15 000 €	Ballean Diana	Collaboration de recherche
25/10/2004	24/10/2007	ATT - Soutien au Transfert DAE	Autre	CNRS-DAE	75 000 €	François Maurice Xavier	Autre

Production scientifique

Conférences à comité de lecture

1. Debesse, P., D. Ballean, F. Lusseyran, and M.X. François. *Adaptation de la vélocimétrie par images de particules à l'analyse des effets non linéaires en thermoacoustique*. in *CFTL 2006. Congrès Francophone de Techniques Laser*. 2006.
2. Debesse, P., D. Ballean, F. Lusseyran, and M.X. François. *Analyse expérimentale des effets non linéaires dans les systèmes thermoacoustiques*. in *CFM 2007. 18ème Congrès Français de Mécanique*. 2007.
3. Duthil, P., D. Ballean, A. Bétrancourt, G. Defresne, M.X. François, Z.B. Yu, and Q. Li. *Méthode de caractérisation acoustique d'éléments passifs*. in *CFA 06. 8ème Congrès Français d'Acoustique*. 2006.
4. Duthil, P., D. Ballean, A. Bétrancourt, M.X. François, J. Wu, and Z.B. Yu. *Caractérisation des éléments de contrôle du champ acoustique dans les systèmes thermoacoustiques*. in *CFM 2005. 17ème Congrès Français de Mécanique, AFM*. 2005.
5. Duthil, P., D. Ballean, A. Bétrancourt, M.X. François, Z.B. Yu, and J.P. Thermeau. *Experiments and valve modelling in Thermoacoustic device*. in *CEC-ICMC 2005: 5th Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference*. 2005.
6. Faure, T., F. Lusseyran, L. Pastur, R. Pethieu, and P. Debesse. *Développement d'instabilités dans un écoulement subsonique se développant au-dessus d'une cavité : mesures synchronisées PIV-LDV*. in *CTFL2006. 10ème Congrès Francophone de Techniques Laser*. 2006.
7. Hu, Z.J., Q. Li, J.H. Xie, G. Zhou, Q. Li, P. Duthil, and M.X. François. *Acoustic impedance adjusting for a small cascade thermoacoustic engine*. in *CFA 06. 8ème Congrès Français d'Acoustique*. 2006.

Congrès sans actes, workshops

1. Baltean, D., A. Bétrancourt, G. Defresne, P. Duthil, J.P. Thermeau, and M.X. François. *Sound Wave Cooling : a new thermodynamic process*. in *METIME 2005: International Conference on Thermal Engines and Environmental Engineering*. 2005.
2. Lusseyran, F., L. Pastur, T. Faure, P. Debesse, D. Baltean, and M.X. François. *Mesure synchronisée PIV - grandeur scalaire locale : la moyenne de phase et ses possibles évolutions*. in *20e Journée Thématique de L'Association Francophone de Vélocimétrie Laser*. 2006.
3. François, M.X., *Les cycles thermoacoustiques*, in *Deuxième Séminaire Carnot ENSMP*. 2005.