

# Rapport d'activité 2005 Présentation du Groupe Transferts Solide-Fluide (TSF)



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. Non seulement les activités de TSF sont très diverses, mais aussi elles traversent un certain nombre de frontières.

Expérimental versus numérique. Dans TSF, la majorité des études sont expérimentales (ébullition sur fil, croissance de bulles de vapeur, résistance de Kapitza, écoulements alternatifs, cinétiques d'adsorption), avec une grande variété de techniques mises en œuvre (de la vélocimétrie par images de particules à la mesure de températures cryogéniques en passant par la réponse thermique en fréquence). Les simulations numériques tiennent pourtant leur place, LIMSI oblige. Elles portent sur la dynamique de l'ébullition libre – où un gros effort de modélisation a été entrepris depuis 2004 – la convection naturelle et les écoulements dans les poreux. Lorsque cela est possible, la complémentarité expérimental – numérique est recherchée (convection naturelle autour d'un fil chauffant).

Fondamental versus appliqué. Dans chaque thème du groupe, ce qui semble faire le nœud théorique du problème est abordé. Cela nécessite de parler des interfaces, leur description et leur dynamique, ou bien des interactions entre échelles micro et macro. En outre, et il s'agit parfois des mêmes personnes, certaines des compétences du groupe (cinétique d'adsorption, systèmes thermodynamiques) sont reconnues par des industriels et font l'objet de contrats qui viennent alimenter les finances du groupe.

Le groupe TSF rassemble un chercheur, quatre maîtres de conférence (3 universités), un ingénieur de recherche (partagé à mi-temps avec la Cellule Expérimentale du Département Mécanique-Énergétique), une assistante ingénieur et un doctorant. Mentionnons aussi un professeur, une co-tutelle de thèse avec le LIMHP (Villetaneuse), et l'arrivée programmée en décembre d'un second chercheur.

La diversité du groupe TSF se traduit par des collaborations de recherche très variées, surtout en France mais avec quelques percées vers l'international et vers l'industrie.

Depuis deux ans, le groupe s'étoffe, et prend progressivement son identité. La production scientifique a fait un bond en 2004, et elle devrait conserver ce niveau, avec des fluctuations entre conférences internationales et articles de revues à comité de lecture. Le groupe triple à peu près sa dotation annuelle par des revenus venant de projets de recherche et de contrats industriels.

## Présentation de la recherche

### Thème Dynamique de l'ébullition libre

*M.-C. Duluc, V. Daru, I. Elayyadi, et aussi D. Juric*

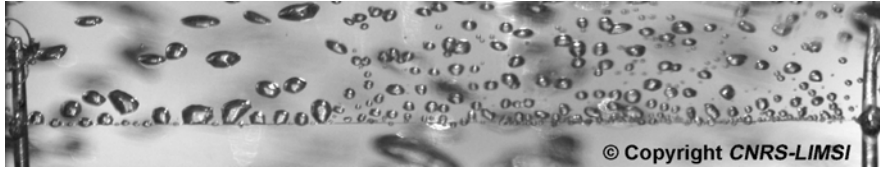
Historiquement, ce thème était principalement expérimental. Depuis deux ans l'effort a porté sur le développement d'un modèle numérique de croissance de bulles de vapeur. Les mesures ont aussi continué dans les deux autres axes du thème.

Le premier axe est donc l'étude de la croissance des bulles de vapeur, sujet très actif comme le montre le nombre de laboratoires émergeant à ce thème du réseau AmETh<sup>1</sup> (cf. infra Collaboration de recherche). La difficulté est autant expérimentale que numérique. Sur le plan expérimental, nous voulons dessiner et réaliser un nouveau banc, qui par exemple inclue une caméra rapide. C'est donc au développement d'un code numérique que le LIMSI se consacre depuis quelques années. Première étape, nous avons réalisé un code 1D capable de simuler le changement de phase liquide-vapeur. L'originalité, et la difficulté numérique, consistent à y traiter en même temps un domaine « incompressible » (la phase liquide) et un domaine « compressible » (la phase vapeur). Pour prendre en compte la corrélation entre pression et température à l'interface, il faut que la pression thermodynamique soit une variable accessible, et ainsi nous pouvons décrire des situations avec évaporation en cavité fermée. Les derniers progrès ont consisté à valider ce code en comparant, sur des transitoires, les résultats avec ceux d'un autre code utilisant pour la phase vapeur une approche faible Mach. Pour plus d'information, voir la [page de présentation](#)<sup>2</sup> et aussi les diverses publications ci-dessous (Juric et al., 2004a, 2004b ; Daru et al., 2005a, 2005b ; un article est en publication pour les Comptes Rendus Meca). L'attribution d'une bourse de thèse sur ce thème, de même que la récente embauche d'un CR1, devraient lui permettre d'atteindre une certaine masse critique. Nous devons maintenant travailler sur la complémentarité expérimental-numérique.

Le second axe développe depuis plusieurs années une étude expérimentale de l'ébullition transitoire sur fil (cf. infra Collaboration de recherche, et l'article Duluc et al., 2004). Nous nous sommes intéressé aux conditions de transition directe de l'état de convection naturelle vers celui d'ébullition en film, transition préjudiciable au bon fonctionnement des évaporateurs. En effet, même en conditions stationnaires, nous avons observé une transition directe et prématurée vers l'ébullition en film pour certains états de surface du fil. Nous avons constaté que la présence de traces de graisse ou de résidus du procédé de fabrication augmente la valeur de l'angle de contact entre l'interface liquide-vapeur et la surface solide, ce qui favorise le développement de poches de vapeur et donc l'installation de l'ébullition en film. En comparant les transitoires obtenus avec différents fils (en faisant varier la nature, le diamètre ou l'état de surface), nous avons pu montrer que la transition prématurée vers l'ébullition en film se produit lorsque le flux imposé est supérieur au flux critique minimum sur la caractéristique stationnaire.

---

1 AmETh = Amélioration des Échanges Thermiques



*Ébullition d'azote sur un fil (en film à gauche et nucléée à droite, près du flux critique minimum)*

Dans le troisième axe de ce thème, la convection naturelle autour d'un fil chauffant, mené en collaboration avec F. Lusseyran (groupe Aérodynamique Instationnaire) et S. Xin (groupe Convection - Rotation), nous avons réalisé une nouvelle campagne de comparaison entre expériences et simulations numériques. Nous nous sommes intéressé à l'influence sur l'écoulement de l'intensité du flux dissipé par le fil. Les comparaisons entre mesures et calculs sont excellentes et une analyse dimensionnelle a été conduite avec succès. Pour plus d'information, voir les deux publications (Xin, Duluc et al., 2004, 2005) ci-dessous.

## Thème Thermodynamique des systèmes

*M. Pons*

Le premier axe de ce thème s'intéresse à l'analyse second principe de la convection naturelle en cavité, un système apparemment simple. La cohérence thermodynamique impose de tenir compte du travail des forces de pression : c'est le modèle Boussinesq dit thermodynamique, voir [rapport d'activité LIMSI 2003](#)<sup>3</sup>. Une étude systématique sur la cavité carrée 2D emplie d'air a permis de réactualiser le domaine de validité du modèle Boussinesq usuel. Il apparaît ainsi 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 la [page de présentation](#)<sup>4</sup>, et la publication (Pons and Le Quéré, 2005 ICCHMT'05). Nous souhaitons maintenant aborder la question des instabilités. D'autre part, construire un lien thermodynamique entre la convection naturelle et les moteurs thermiques permet de définir le rendement de conversion de la convection naturelle en cavité, et les facteurs qui l'augmentent ou le diminuent (Pons and Le Quéré, 2005 CFM-2005). On peut attendre de ces études, qui trouvent leur place dans le programme Énergie du CNRS et dans un thème du réseau AmETh (cf. infra Collaborations de recherche), une meilleure connaissance et des pistes pour contrôler les écoulements dans l'habitat.

Le second axe de ce thème s'intéresse à la thermodynamique, principalement analyse second principe, de divers systèmes. En ce qui concerne notre collaboration avec le LESBAT sur la réfrigération solaire (cf. infra Collaboration de recherche internationale, et les articles Buchter et al., 2003 et Hildbrand et al.,

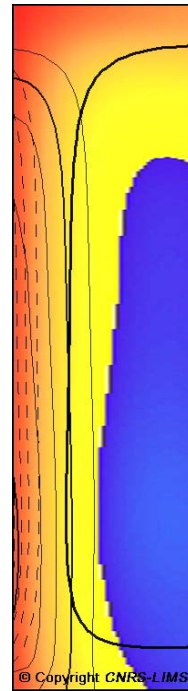
---

2 Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf1/](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf1/)

3 Lien hypertexte : [www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF2/tsf2.html](http://www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF2/tsf2.html)

4 Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf2/](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf2/)

2004), elle s'est progressivement transformée en accompagnement de leurs projets de transfert de cette technologie vers les pays du Sud (Burkina-Faso, Érythrée). Par ailleurs, le projet DECSOL, portant sur la climatisation par énergie solaire et soumis en juin 2005 à l'ANR, prévoit la participation du LIMSIS (groupe TSF) pour les analyses second principe. Un autre sujet émerge dans ce thème, cette fois en collaboration avec le PHASE (Toulouse) et le LaTEP (Pau) à la suite des rencontres au sein du PRI CARNOT, il s'agit de l'analyse second principe de la conduction de chaleur en instationnaire, en particulier du fait des variations de la température ambiante. En effet, comme la fixité de la température ambiante est à la fois une condition nécessaire à l'analyse exergétique et une hypothèse souvent implicite dans l'établissement de critères d'optimisation, considérer sa variation sur la journée (qui est bien une réalité physique) modifie complètement ces deux problématiques (Strub et al., 2005).



*Champ de température (couleurs), ligne de courant type (trait épais) et champs d'irréversibilité dans la couche limite montante d'une cavité d'air de 1,2 m de haut à Rayleigh  $10^6$  ; modèle Boussinesq thermodynamique*

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

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

*J. Amrit, et aussi M.-X. François*

Le premier axe de ce thème porte sur la résistance Kapitza. Cette résistance au transfert de chaleur est localisée à l'interface entre un solide et l'hélium superfluide (à une température de quelques Kelvin) et se traduit par une vraie discontinuité de la température à l'interface. À la suite d'Adamenko and Fuks<sup>5</sup>, nous pensons que la diffusion des phonons sur les rugosités de l'interface joue un rôle non-négligeable dans ce transfert de chaleur (voir notre [rapport d'activité LIMSIS 2003](#)<sup>6</sup> - thème 4). Afin de vérifier expérimentalement cette hypothèse, nous voulons mesurer cette résistance en faisant varier la température du bain d'hélium superfluide jusque en-dessous de 1 Kelvin. En effet, changer cette température modifie la longueur d'onde des phonons et donc leur interaction avec des rugosités dont la taille caractéristique reste évidemment la même. Les variations observées de la résistance Kapitza entre un cristal de silicium et un bain d'hélium superfluide correspondront-elles à l'explication donnée ? Le montage de cette expérience à l'Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

5 Soviet-Physics-JETP., 59(6), pp. 2071-82, 1970.

6 Lien hypertexte : [www.limsis.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/index.html](http://www.limsis.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/index.html)

(qui possède une boucle à Hélium III) a nécessité une longue préparation, entre maintenant dans sa phase de démarrage (cf. infra Collaboration de recherche et l'article Amrit, 2005).

Le second axe concerne la conductivité thermique transverse des parois fines en polycristal de niobium. En effet, nous observons expérimentalement que la conductivité thermique est plus forte dans la direction normale à la paroi que dans le plan de la paroi. Nous expliquons cette anisotropie par la présence de monocristaux qui percolent ou presque. Comme les lignes de flux passant par ces monocristaux ne traversent pas (ou peu) de joints de grain, la résistance thermique qu'elles rencontrent est plus faible, la conductivité thermique est plus forte (voir [rapport d'activité LIMSI 2003](#)<sup>7</sup>). Afin de mieux interpréter les mesures que nous avons réalisées sur des parois en niobium, nous avons complété notre modèle en y introduisant les résistances thermiques entre monocristaux. La [page de présentation](#)<sup>8</sup> montre une confrontation entre ce nouveau modèle et nos mesures. Il apparaît que l'anisotropie de la conductivité thermique de la paroi de niobium dépend fortement du nombre des grains rencontrés lors de la traversée de la paroi. De tels résultats sont importants pour dimensionner au mieux les cavités supraconductrices des accélérateurs de particules (cf. infra Collaboration de recherche, et l'article Amrit, 2004).

Ces études soulèvent la question fondamentale de la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur à l'échelle nanométrique.

## 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 de la vitesse acoustique dans un écoulement alternatif. La difficulté est la suivante : la vitesse du fluide oscillant par définition autour d'une valeur nulle, le signal d'un fil chaud d'une part est très bruité, d'autre part doit être calibré dans ces conditions spécifiques d'utilisation. Une détermination correcte de la vitesse du fluide, son amplitude et sa phase, est importante non seulement pour la connaissance qu'elle apporte sur la dynamique du fluide mais aussi pour la possibilité offerte de coupler cette mesure avec une mesure de pression acoustique, et d'en déduire précisément la puissance acoustique mise en jeu, ce qui donne accès à l'énergétique du système, même lorsque le taux d'ondes stationnaires est important.

Notre démarche consiste donc à réaliser un tube résonnant mu par un haut-parleur électrodynamique. Dans un premier temps le tube est vide, ce qui permet de calibrer le fil chaud puisque le mouvement du fluide est connu via le suivi du haut-parleur. Dans un second temps seulement, un stack sera installé, afin d'étudier la thermoacoustique de l'écoulement induit. Le banc expérimental est en cours de montage, voir la [page de présentation](#)<sup>9</sup>. La réflexion sur l'anémométrie fil-chaud pour la thermoacoustique entraînée par haut-parleur électrodynamique se fait en

---

<sup>7</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF3/tsf3.html](http://www.limsi.fr/RS2003FF/MECA2003/TSF2003/TSF3/tsf3.html)

<sup>8</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf3/tsf3.pdf](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf3/tsf3.pdf)

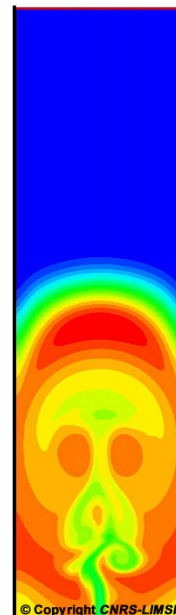
<sup>9</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf4/](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf4/)

collaboration avec le LUAM et avec l'Université de Mexico (cf. infra Collaborations de recherche).

## Thème Transferts en milieux poreux adsorbants

*M. Firdaouss, V. Bourdin, D. Bisch, M. Pons et aussi G. Momen*

Les deux axes de ce thème mêlent l'appliqué et le fondamental. Le premier axe concerne le stockage d'hydrogène dans un réservoir rempli de matériaux adsorbants (charbons actifs, nanotubes de carbone) en vue d'équiper les véhicules du futur. Un Programme de Recherche (PR) de l'Action Concertée Énergie s'est donc constitué sur ce thème autour du LIMHP, qui est le laboratoire français qui teste cette technique (cf. infra Collaboration de recherche). Afin d'interpréter leurs mesures, et aussi d'être en mesure de dimensionner d'éventuels réservoirs d'hydrogène, le LIMHP développe depuis trois ans un code numérique pour simuler la phase de remplissage du réservoir, de loin la plus critique. Dès les premiers pas de cette démarche, le groupe TSF a pu apporter ses compétences sur l'écriture de modèles numériques de processus de transferts, sur les transferts couplés masse et chaleur dans les lits adsorbants et enfin sur les procédés à adsorption (cf. infra Collaboration de recherche).



*Champ de température dans un volume fluide en cours de remplissage*

Dans le PR le rôle du groupe TSF consistait à tester, à l'aide de nos codes détaillés, la validité de certaines hypothèses simplificatrices du code global développé au LIMHP. Ces hypothèses posent 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 codes nouveaux. Les résultats, détaillés dans la [page de présentation](#)<sup>10</sup>, ont permis d'orienter favorablement le travail de thèse de G. Momen, en co-tutelle LIMHP-LIMSI (cf. l'article de conférence Momen et al., 2005). 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.

Le second axe de ce thème 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](#)<sup>11</sup>, [1999](#)<sup>12</sup>, [1996](#)<sup>13</sup>). Les systèmes silicalite+alcane sont

<sup>10</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf6/](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf6/)

<sup>11</sup> Lien hypertexte : <http://www.limsi.fr/RS2002FF/MECA2002FF/TSF2002FF/tsf1.html>

<sup>12</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/RS99FF/MECA99FF/ADS99FF/ads3/](http://www.limsi.fr/RS99FF/MECA99FF/ADS99FF/ads3/)

l'objet d'investigations intenses, dans l'industrie pétrolière, mais aussi académiquement (cf. infra Collaborations de recherche Nos 10 et 13). Nos mesures de cinétique d'adsorption de l'isobutane et du n-butane dans la silicalite sont compatibles avec celles obtenues par les méthodes microscopiques (QENS, PFG-NMR) et par la dynamique moléculaire, alors qu'habituellement les méthodes microscopiques et macroscopiques divergent de 2 à 3 ordres de grandeur. L'accord que nous obtenons est donc particulièrement remarquable (voir [page de présentation](#)<sup>14</sup> et l'article de conférence Bourdin et al., 2005), et remet peut-être en cause les autres méthodes macroscopiques. Par ailleurs, comme nos évaluations expérimentales des coefficients de diffusion nécessitent une description fidèle des équilibres d'adsorption, nous avons développé un modèle de Langmuir à 4 sites (canaux droits, canaux zigzag, intersections et sites aluminium) qui décrit correctement l'adsorption, dans la silicalite, mais aussi dans les ZSM-5 avec différents rapports Silicium sur Aluminium. Enfin, parallèlement à la détermination des coefficients de diffusion, notre protocole nous donne aussi des indications sur les conductivités thermiques. Le fait que cette grandeur varie nous semble pouvoir être utilisé dans des applications liées à l'habitat.

## Personnels

### Permanents

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

### Doctorants

Prénom	Nom	Etablissement d'inscription	Ecole doctorale
Isam	Elayyadi	Paris VII	Physique
Anne	Planchette	Paris VI	SMAE

## 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), Paris-6 Section 60 (M. Pons), Paris-6 Section 62 (M.-C. Duluc), Paris-11 Section 62 (J. Amrit, vice-président B).

<sup>13</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/RS96FF/ME/ADS/ADS1.html](http://www.limsi.fr/RS96FF/ME/ADS/ADS1.html)

<sup>14</sup> Lien hypertexte : [www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf5/](http://www.limsi.fr/Rapports/RS2005/meca/tsf/tsf5/)

## Enseignement et diffusion des connaissances

- Pour 2006, M.-C. Duluc donne le cours *Changement de phase liquide-vapeur* dans le M2 *Mécanique-Énergétique* de l'Université Paris-6, parcours *Physique et dynamique des transferts* (env. 15h)
- En 2004, M. Pons a donné un cours « recherche » *Thermodynamique, convection naturelle et approximation de Boussinesq* dans le DEA de *Mécanique*, Université Paris-6
- Pour 2005, M. Pons a proposé le cours *Analyse et optimisation des processus de transfert* dans le M2 *Mécanique-Énergétique* de l'Université Paris-6, parcours *Physique et dynamique des transferts*, cours qui n'a pas pu ouvrir

## Organisation de colloques

- **Congrès Français de Thermique SFT-2004**, 25-28 mai 2004 à la Presqu'île de Giens : M. Pons a assuré avec D. Gobin (FAST, Orsay) et S. Pageau-Maurice (LIMSI) le *Secrétariat Scientifique*, M. Pons et M.-C. Duluc ont été membres du *comité d'organisation* (156 articles publiés, 210 affiches présentées, 270 participants)
- 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

## 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, sortie en décembre 2005)

## Interventions dans des écoles thématiques et participations à séminaires

- 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.
- Duluc M.-C., Ébullition libre, École Thématique CNRS Le changement de phase liquide-vapeur et ses applications, Cargèse, 26-31 octobre 2003. Polycopié de 30 pages
- 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
- Tayebi B., Stutz B., Lallemand M., Agounoun R., Boussehain R., Darmon J.-P., Duluc M.-C., Caractérisation par une méthode transitoire des transferts thermiques pour l'ébullition libre, Journée de la Société Française de Thermique. Activités du réseau des Laboratoires AmETh. Paris, France, 1er décembre 2004
- 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, Jeudi 27 Janvier 2005, Espace Hamelin, Paris<sup>15</sup>
- Amrit J., Heat transfer between a solid and superfluid helium, Séminaire au Laboratoire des basses températures et de la supraconductivité. Université de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, Espagne, 21-25 mai 2003

---

<sup>15</sup> voir : [http://www.sft.asso.fr/DOCUMENTS/journees\\_SFT/Nanoporeux\\_27-01-2005/IR\\_VB.pdf](http://www.sft.asso.fr/DOCUMENTS/journees_SFT/Nanoporeux_27-01-2005/IR_VB.pdf)

- Pons M., Le mur instationnaire : une solution analytique et une approche procédé. 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
- Bertin T., Bourdin V., Impact de parois à propriétés thermophysiques variables sur les consommations énergétiques des bâtiments, Séminaire du GAT Habitat. Paris, France, 10 juin 2005

## Collaborations de recherche

### Nationales

- Participation de M.-C. Duluc au projet *Croissance des bulles de vapeur* dans le **réseau AmETH**<sup>16</sup>, avec le CETHIL (Villeurbanne), l'IUSTI (Marseille), l'IMFT (Toulouse), le MASTER (Bordeaux) et le CEA-Grenoble
- Collaboration de M.-C. Duluc avec B. Stutz et M. Lallemand du CETHIL (Villeurbanne) pour le projet *Dynamique de l'ébullition libre* du **réseau AmETH**
- 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 (Ecole 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
- Participation de M. Pons au projet *Convection Naturelle* du **réseau AmETH**, projet coordonné par P. Joubert (LEPTAB, La Rochelle), avec le LET (Poitiers), le LMEE (Évry)
- 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
- Collaboration de F. Jebali avec P. Lotton (LAUM, Le Mans) sur le couplage d'un haut-parleur électrodynamique avec un système thermoacoustique
- 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 (ex-IMP, Perpignan)
- Collaboration de M. Pons et M. Firdaouss avec le LIMHP (Villetaneuse) sur la modélisation et la simulation d'un réservoir de stockage d'hydrogène sur matériaux carbonés. La thèse de G. Momen se déroule en cotutelle entre nos deux laboratoires
- Participation de V. Bourdin à un **réseau** coordonné par l'**Institut Français du Pétrole**, avec trois laboratoires français (le LRRS de l'Université de Bourgogne à Dijon, l'IRC à Villeurbanne, et le LIMSI), sur la diffusion d'alcanes dans une zéolite industrielle

---

<sup>16</sup> AmETH = Amélioration des Échanges Thermiques

## Internationales

- Collaboration de M. Pons avec Ph. Dind et son équipe (LESBAT, Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud, Yverdon-les-Bains, Suisse) sur la réfrigération solaire
- Collaboration de F. Jebali avec G. Huelsz (UNAM, Mexico) sur l'anémométrie fil-chaud dans fluide oscillant
- 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

### Conventions et contrats de collaboration

Date d'effet	Date de fin	Intitulé	Type	Organisme financeur	Part labo	Responsable scientifique	Catégorie
17/10/2003	01/05/2004	Zecoools		Zecoools	10 k€	Pons Michel	Contrat équipe-conseil
11/07/2001	10/07/2004	EIVD-MDL		Ecole d'ingénieur du Canton de Vaud	-	Pons Michel	Collaboration de recherche
19/08/2002	18/12/2004	EIVD 2		Ecole d'ingénieur du Canton de Vaud	-	Pons Michel	Collaboration de recherche
01/06/2003	31/05/2004	IFP-ADS		IFP	9 k€	Bourdin Vincent	Collaboration de recherche
01/07/2003	31/05/2005	H2-Therm	Programme interdisciplinaire Energie	CNRS	22 k€	Hassouni Khaled	Collaboration de recherche
01/01/2001	31/12/2006	DRI Pologne		CNRS / Académie polonaise des sciences (PAN)	12 k€	Le Quéré Patrick	Autre

### Valorisation et transfert

M. Pons est intervenu comme expert auprès de la société *Zecoools* (Croissy-Beaubourg, 77) pour avis sur leurs expérimentations de cycles frigorifiques à adsorption (zéolite+eau) fortement dissymétriques. L'apport financier a été de 10 k€ en 2004.

## 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. Thèse d'Habilitation à diriger des Recherches, Université Paris-Sud/LIMSI, Orsay (2005).*

## Publications dans des revues à comité de lecture

1. Amrit, J., *Nanoscale heat conduction at a silicon-superfluid helium boundary*. Superlattices and Microstructures, 2004. **35**: 3-6, 187-194.
2. 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, 1504-1510.
3. Buchter, F., P. Dind, and M. Pons, *An experimental solar-powered adsorptive refrigerator tested in Burkina-Faso*. International Journal of Refrigeration, 2003. **26**: 1, 79-86.
4. Duluc, M.-C., S. Xin, and P. Le Quéré, *Transient natural convection and conjugate transients around a line heat source*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003. **46**: 2, 341-354.
5. Duluc, M.-C., B. Stutz, and M. Lallemand, *Transient nucleate boiling under stepwise heat generation for highly wetting fluids*. International journal of heat and mass transfer, 2004. **47**: 25, 5541-5553.
6. Firdaouss, M. and J. Prieur Duplessis, *On the prediction of Darcy permeability in nonisotropic periodic two-dimensional porous media*. Journal of Porous Media, 2004. **7**: 2, 119-131.
7. Hildbrand, C., P. Dind, M. Pons, and F. Buchter, *A new solar powered adsorption refrigerator with high performance*. Solar Energy, 2004. **77**: 3, 311-318.
8. Jebali, F., J.V. Lubiez, and M.X. François, *Response of a thermoacoustic refrigerator to the variation of the driving frequency and loading*. International Journal of Refrigeration, 2004. **27**: 2, 165-175.
9. Pons, M., *Irreversibility in energy processes : Non-dimensional quantification and balance*. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 2004. **29**: 2, 57-175.
10. 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, 127-132.
11. 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, 133-138.
12. 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, 493-516.
13. 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, 1154-1160.
14. Xin, S., M.-C. Duluc, F. Lusseyran, and P. Le Quéré, *Numerical simulations of natural convection around a line-source*. International journal of numerical methods for heat and fluid flow, 2004. **14**: 7, 830-850.

## Livres et ouvrages et chapitres d'ouvrages

1. Gobin, D., M. Pons, D. Lauriat, and P. Le Quéré (Eds.). *Transferts en milieux hétérogènes - Actes Congrès Français de Thermique SFT2004*. 2004. Société Française de Thermique, Paris.

## Conférences à comité de lecture

1. 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. Leipzig, Germany. Poster.
2. 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. Cachan, France, May 17-20, Ed. R. Bennacer, Publ. Lavoisier, Paris, ISBN 2 7430 0801 6, vol. 2, pp. 1208-1213.

3. 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. Troyes, France 29 août-2 septembre. (6 pages).
4. Juric, D., V. Daru, and M.-C. Duluc. *Simulation d'écoulements liquide-gaz à l'intérieur d'une cavité chauffée*. in *SFT 2004. Congrès Français de Thermique 2004*. 2004. Presqu'île de Giens, France. 25-28 mai 2004, Ed. D. Gobin, M. Pons, G. Lauriat et P. Le Quéré, Pub. SFT-Paris France, ISBN 2-905267-40-2, pp 95-100.
5. Juric, D., P. Le Quéré, V. Daru, and M.-C. Duluc. *On the numerical simulation of two phase liquid-vapor phenomena*. in *ICTAM04. 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics.IUTAM*. 2004. Warsaw, Poland. (2 pages).
6. 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. Istanbul, Turkey. (12 pages).
7. Pons, M. *Thermodynamic analysis of the Boussinesq approximation*. in *JETC 8. Joint European Thermodynamics Conference*. 2003. Bellaterra-Barcelona, Spain. (5 pages).
8. Pons, M. and P. Le Quéré. *Les équations de Boussinesq et le second principe*. in *SFT 2004. Congrès Français de Thermique 2004*. 2004. Presqu'île de Giens, France. 25-28 mai 2004, Ed. D. Gobin, M. Pons, G. Lauriat et P. Le Quéré, Pub. SFT-Paris France, ISBN 2-905267-40-2, pp 229-234.
9. 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. Cachan, France. May 17-20, 2005, Ed. R. Bennacer, Publ. Lavoisier, Paris, ISBN 2 7430 0801 6, Vol. 1, pp. 1-6.
10. Pons, M. and P. Le Quéré. *La convection naturelle, un moteur thermique*. in *CFM 2005. 17ème Congrès Français de Mécanique*. 2005. Troyes, France. AFM. (6 pages).
11. 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. Troyes, France. (6 pages).
12. Zachara, A., J. Pakleza, S. Blonski, R. Trzcinski, and T.A. Kowalewski. *Thermodynamic parameters of vapour bubble growth by image analysis*. in *ICTAM04. 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics.IUTAM*. 2004. Warsaw, Poland. (2 pages).

## Congrès sans actes, workshops

1. Amrit, J. *Nanoscale heat conduction at a silicon-superfluid helium boundary*. in *EUROTHERM 75-Microscale Heat Transfer 2*. 2003. Reims, France.
2. Firdaouss, M. and J. Prieur Duplessis. *Prédiction de la perméabilité de Darcy en milieux poreux périodiques anisotropes*. in *JMP 2003. 6èmes Journées Milieux Poreux*. 2003. Toulouse, France. (2 pages).
3. Pons, M. *A non-dimensional irreversibility balance for analysing energy conversion cycles*. in *Eurotherm seminar 72 : Thermodynamics, heat and mass transfer of refrigeration machines and heat pumps*. 2003. Valencia, Spain. March 31-April 2, 2003, J.M. Corberán and R. Royo Ed., Pub. IMST-UPV Valencia Spain, ISBN 84-931209-8-7, pp. 161-166.
4. Bisch, D. and V. Bourdin. *Diffusion of butane and isobutane in silicalite by IR emission frequency response (TFR)*. Workshop of International Research Group «Diffusion in Zeolites». CNRS, DFG, EPSRC 2005. Leipzig, Germany.
5. Pons, M. *Thermodynamic analysis of the Boussinesq approximation*. JETC8. 8th Joint European Thermodynamics Conference 2003. Bellaterra-Barcelona, Spain, September 2-5.
6. Bisch, D. and V. Bourdin. *Cinétique d'absorption par réponse en fréquence thermique : une méthode indirecte de mesure de la conductivité effective des adsorbants*. Journée SFT : la thermique des matériaux nanoporeux. Société Française de Thermique 2005. Paris, France.
7. Pons, M. *Un nombre adimensionnel pour quantifier les irréversibilités*. Séminaire du PRI

CARNOT 2003. Gourette, France.

8. Pons, M. *Convection naturelle et taille de cavité*. Journée de Dynamique des Fluides sur le Plateau. Université Paris-Sud 2003. Orsay, France.

9. Pons, M. *Des irréversibilités adimensionnées et leur bilan (un cadre robuste pour analyser les procédés de conversion d'énergie)*. Ecole d'été de Thermodynamique (Programme Energie du CNRS) 2003. Odeillo, France.

10. Tayebi, B., B. Stutz, M. Lallemand, R. Agounoun, R. Boussehain, J.P. Darmon, and M.-C. Duluc. *Caractérisation par une méthode transitoire des transferts thermiques pour l'ébullition libre*. Journée de la Société Française de Thermique. Activités du réseau des Laboratoires AmETh 2004. Paris, France.