

LA THERMIQUE AU SERVICE DE LA TRANSITION
ÉNERGÉTIQUE

RECUEIL DES RÉSUMÉS

DU

CONGRÈS ANNUEL DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE

SFT 2022

31 MAI — 3 JUIN 2022
VALENCIENNES

ORGANISÉ PAR

LE LABORATOIRE LAMIH (UMR CNRS 8201 - UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE
HAUTS-DE-FRANCE) ET L'INSTITUT ÉNERGIE (UNIVERSITÉ DE MONS)

Première partie

Prolégomènes

Parrainages

Le Congrès Français de Thermique, SFT 2022, organisé par le laboratoire LAMIH (UMR CNRS 8201 - Université Polytechnique Hauts-de-France) et l'Institut Énergie (Université de Mons) à Valenciennes a bénéficié du parrainage et du soutien des institutions et des organismes suivants :

Laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201

Université Polytechnique Hauts-de-France

Le Mont Houy

59313 Valenciennes Cedex 9

www.uphf.fr/LAMIH

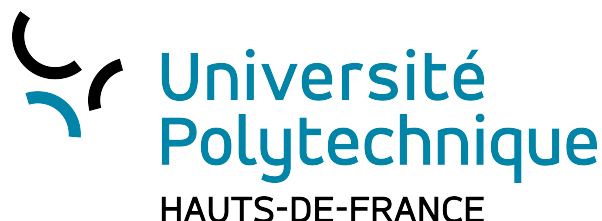


Université Polytechnique Hauts-de-France

Campus Mont Houy

59313 Valenciennes cedex 9

www.uphf.fr



CNRS

3 rue Michel-Ange

75794 Paris cedex 16

www.cnrs.fr



INSA Hauts-de-France

Campus Mont Houy

59313 Valenciennes cedex 9

www.insa-hautsdefrance.fr



Thermal Engineering and Combustion Unit

56 rue de l'Épargne

7000 Mons - Belgique

web.umons.ac.be/trmi



Université de MONS

Place du Parc , 20

7000 Mons - Belgique

web.umons.ac.be



Région Hauts-de-France

151 Avenue du président Hoover
59555 Lille cedex

www.hautsdefrance.fr



Ville de Valenciennes

Hôtel de Ville
Place d'Armes
BP 90339 – 59304 Valenciennes cedex

www.valenciennes.fr



Fédération de Recherche Transports Terrestres et Mobilité

FR TTM CNRS 3733

www.frttm.fr



Institut Carnot ARTS

151 boulevard de l'Hôpital
75013 Paris

www.ic-arts.eu



Il a également reçu le soutien d'exposants-sponsors industriels :

COMSOL France

10 avenue Doyen Louis Weil
38000 Grenoble, France

www.comsol.com

Contact : Frédéric BERNARD

☎ 04 76 46 49 01

✉ frederic.bernard@comsol.fr



DEWESoft

1 bis rue Jean le Galleu
94200 Ivry-sur-Seine, France

dewesoft.com

Contact : Nicolas PHAN

☎ 01 75 64 19 38

✉ nicolas.phan@dewesoft.com



PHOT'Innov

1 Avenue Neil ARMSTRONG
BAT C - Clément Ader CS 10076
33700 Mérignac, France

www.photinnov.com

Contact : Laurent GREULICH

☎ 07 85 83 46 47

✉ l.greulich@photinnov.fr



INNOVATION IN PHOTONICS

TELOPS

6 rue du Docteur Schweitzer
91420 Morangis, France

www.telops.com

Contact : Marie-Eve LANG

☎ 01 70 27 71 34

✉ marie-eve.lang@telops.com



THEMACS Ingénierie

2 bis rue Alfred Nobel
77420 Champs-sur-Marne, France

themacs-engineering.com

Contact : Jean-Pierre MONCHAU

☎ 06 29 82 44 34

✉ monchau@themacs.fr



Cap Instrumentation

Av. Henri Barbusse
59770 Marly, France

www.capinstrumentation.fr

Contact : Vincent DUBOIS

☎ 03 27 29 01 20

✉ vdubois@capinstrumentation.fr



EDF

Direction de l'Action Régionale Hauts-de-France
39 rue du Faubourg de Roubaix
59800 Lille, France

www.edf.fr

Contact : Philippe CERS

☎ 03 20 14 49 05

✉ philippe.cers@edf.fr



Comité d'organisation

Équipe locale

Le congrès de la SFT 2022¹ s'est déroulé du 31 mai au 3 juin 2022 sur le thème **La Thermique au service de la Transition Énergétique**. Il a été organisé par les personnels des équipes de recherche du département Mécanique du laboratoire LAMIH UMR CNRS 8201 - Université Polytechnique Hauts-de-France² et de Institut Énergie - Université de Mons³.

Président : Julien Pellé

Co-présidents : Céline Morin, Damien Méresse

Comité d'organisation et scientifique local : - *Membres UPHF* : Fethi Aloui, Jérémy Basley, François Beaubert, Eric Delacourt, Xavier Delcorte, François Delcourt, Sylvie Rubens, David Uystepruyst - *Membres UMONS* : Jérémy Bompas, Ward De Paepe, Eric Dumont, Véronique Feldheim, Paul Lybaert, Benoît Liémans, Alessio Pappa, Patrick Tene Hedje, Antoine Verhaegh

Secrétariat et organisation locale : Katia Florek, Sylvie Rubens

Support Web : Audrey Dupuis de la société Insight-Outside⁴

Comité Scientifique de la SFT

Christophe Le Niliot (Pdt CA)	IUSTI, Marseille	Najib Laraqi	ALTIE, Ville d'Avray
Christophe Journeau (Pdt CS)	CEA, Cadarache	Philippe Le Masson	IRDL, Lorient
Nadine Allanic	GEPEA, Nantes	Denis Lemonnier	PPRIME, Poitiers
Philippe Baucour	FEMTO, Belfort	Johann Meulemans	Saint-Gobain, Paris
Jérôme Bellettre	LTeN, Nantes	Pierre Millan	ONERA, Toulouse
Jocelyn Bonjour	CETHIL, Lyon	Julien Pellé	LAMIH, Valenciennes
Didier Delaunay	LTeN, Nantes	Laetitia Perez	Polytech, Angers
Bernard Desmet	ENSIAME, Valenciennes	Michel Pons	LIMSI, Orsay
Stéphane Gibout	LATEP, Pau	Benoît Rousseau	LTeN, Nantes
Patrick Glouannec	IRDL, Lorient	Patrick Salagnac	LASIE, La Rochelle
Michel Gradeck	LEMETA, Nancy	Didier Saury	PPRIME, Poitiers
Joël Lallier	THALES, Eliancourt	Sylvain Serra	LATEP, Pau
François Lanzetta	FEMTO, Belfort	Franck Vouzelaud	THALES, Eliancourt

1. www.congres-sft.fr/2022/

2. www.uphf.fr/LAMIH

3. web.umons.ac.be/trmi

4. www.insight-outside.fr/



Liste des relecteurs

Le comité d'organisation adresse de très vifs remerciements aux relecteurs qui ont pris le temps de lire et d'expertiser les articles soumis au congrès.

Nassim Baba Ahmed	Nadine Allanic	Vincent Ayel
Jean-Luc Bailleul	Magali Barthes	Alain Bastide
Françoise Bataille	Jean-Pierre Bedecarrats	Sylvie Begot
André Bergeron	Yann Billaud	Nicolas Blet
Rodolphe Bolot	Daniel Bougeard	Pascale Bouvier
Sihem Bouzid	Nicolas Boyard	Arnaud Bruch
Cyril Caliot	Didier Chamagne	Xavier Chesneau
Eric Chénier	Benedicte Cuenot	Mathieu David
Martin David	Alain Degiovanni	Fabien Delaleux
Didier Delaunay	Philippe Desevaux	David Donjat
Eva Dorignac	Marie-Christine Duluc	Jean Pierre Dumas
Eric Dumont	François Durier	Claude-Gilles Dussap
Olivier Farges	Yann Favennec	Mbarek Feddaoui
Matthieu Fenot	Stéphane Fohanno	Jean-Pierre Fradin
Jean-Laurent Gardarein	Bertrand Garnier	Benjamin Gaume
Rémi Gautier	Stéphane Gibout	Florine Giraud
Patrick Glouannec	Michel Gradeck	Xiaofeng Guo
Philippe Haberschill	Souria Hamidouche	Jean-Luc Harion
Yamina Harnane	Fareed Hussain	Laurent Ibos
Jacques Jay	Patrice Joubert	Christophe Journeau
Abdelhadi Kotri	Andrzej Kusiak	François Lanzetta
Najib Laraqi	Guillaume Layes	Michel Lebouche
Yves Lecointe	Denis Lemonnier	Renan Leon
Valérie Lepiller	Tahar Loulou	Denis Maillet
Martin Martin	Johann Meulemans	Florian Moreau
Pierre Mousseau	Monssif Najim	Christophe Le Niliot
Yacine Ait Oumeziane	Jacques Padet	Julien Pelle
Laetitia Perez	Benjamin Piaud	Thomas Pierre
Vincent Platel	Jean-Pierre Ploteau	Bérengère Podvin
Michel Pons	Catalin Popa	Hervé Pron
Olivier Quemener	Elissa El Rassy	Mourad Rebay
Jean-Michel Reneaume	Philippe Reulet	Fabrice Rigollet
Simon Rouchier	Yassine Rouizi	Sebastien Rouquette
Stéphane Roux	Jean-Claude Roy	Romuald Rullière
Jean-François Sacadura	Didier Saury	Monica Siroux
Jérôme Soto	Pascal Stouffs	Lounès Tadrif
Jules Voguelin Simo Tala	Cédric Thiebaut	Karim Touati
Adrien Toutant	Brice Tremeac	Benoit Trouette

Marielle Varenne-Pellegrini
Pradip Xavier

Etienne Videcoq
Belkacem Zeghmati

Gerard Vignoles

Le mot du comité d'organisation

Après deux années difficiles compte tenu de la situation exceptionnelle causée par l'épidémie de Coronavirus (covid 19), le 30^e Congrès Français de Thermique peut à nouveau se tenir en présentiel.

Il se déroule du 31 mai au 3 juin 2022 à Valenciennes sur le thème **La Thermique au service de la Transition Énergétique**.

Si en 1992, la conférence des Nations Unies à Rio de Janeiro adoptait une série de principes de précautions dans un contexte incertain pour l'avenir de notre planète, le diagnostic est désormais sans appel. La prise de conscience est ainsi collective mais dans un contexte démographique mondial en plein essor et avec un modèle de société très lié à la consommation de biens, quels sont nos moyens d'actions pour changer de modèle et migrer vers une société plus sobre et décarbonée avec une contrainte temporelle forte ?

De nombreuses problématiques sont en jeu, qu'elles soient d'ordre techniques, scientifiques, sociales, sociétales, financières ou bien encore politiques.

Quelle est aujourd'hui la place du thermicien par rapport à ces problématiques ?

Comment le thermicien pourra-t-il participer aux évolutions stratégiques qui sont indispensables pour assurer cette transition ?

Quels outils sont à disposition de notre communauté scientifique pour expliquer les enjeux de la transition énergétique, proposer des éléments de solutions et sensibiliser les populations à leur propre responsabilité ?

Comment s'ouvrir à de nombreux champs disciplinaires afin d'adopter l'approche globale que réclame cette transition énergétique ?

Au cours de ce congrès, les différentes contributions, au travers des conférences plénières, des ateliers débats et des communications scientifiques, tenteront d'apporter des pistes de réflexion sur les actions à mener par notre communauté scientifique.

Le thème **La Thermique au service de la Transition Énergétique** sera abordé au travers de six conférences plénières qui permettront d'ouvrir le monde de la thermique à des enjeux qui peuvent en paraître :

- M. Christophe Goupil (Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain) abordera la transition écologique et sociétale en mettant en évidence les contraintes et les possibles au travers d'une approche thermodynamique du monde vivant ;
- M. Stéphane Baly (Co-animateur du domaine Smart and resilient cities JUNIA) présentera le scénario de transition énergétique à Horizon 2050 de Negawatt ;
- M. Hervé Jeanmart (Université Catholique de Louvain) abordera les nombreuses interrogations auxquelles les modèles de planification énergétique essayent de répondre en proposant des scénarios de transition du système actuel vers une société bas carbone en 2050 ;
- M. Corentin Prié (Audi AG, Développement énergies/carburants renouvelables) mettra en avant le potentiel de contribution de certaines mesures sur la diminution de la quantité totale des émissions de dioxyde de carbone émise par les flottes de véhicules terrestres ;

- Mme Valérie Masson-Delmotte (CEA-CNRS-UVSQ Paris Saclay/IPSL et co-présidente du groupe n°1 du Giec) abordera le réchauffement climatique à travers une synthèse de l'état actuel des connaissances scientifiques, des enjeux, risques et options d'action.
- Mme Laurie Marraud (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique) clôturera le congrès en s'intéressant à la problématique de l'accessibilité durable à la santé dans un contexte d'augmentation des risques sanitaires et des besoins de santé liés aux changements environnementaux et de tension sur les ressources.

Lors de ce congrès, quatre ateliers permettront des échanges sur des thématiques transversales :

- les pratiques pédagogiques innovantes en transferts thermiques seront abordées au cours d'un atelier qui sera animé par Marie-Christine Duluc.
- un atelier abordera l'apport du numérique dans la Thermique, les différentes modélisations et approches numériques - développement de codes, code ouverts, codes commerciaux, codes industriels - seront discutées. Une présentation, à titre d'exemple, sera effectuée par les intervenants. A la suite, une table ronde, afin de favoriser les échanges, sera proposée. L'animation sera assurée par Françoise Bataille, Marc Médale, Adrien Toutant et Emmanuel Laroche.
- l'atelier combustion flexible sera animé par Alessandro Parente.
- la problématique de la rénovation énergétique des bâtiments et de sa massification sera abordée dans un atelier animé par Philippe Cers.

Nous avons ainsi reçu 121 propositions de résumés. 83 communications ont été finalement acceptées pour publication dans les Actes du congrès annuel de la SFT 2022 et bénéficient dorénavant d'un DOI. 33 communications ont été retenues pour être présentées sous forme d'affiche uniquement. L'ensemble des travaux, représentant un total de 280 expertises, font ainsi l'objet d'une publication sur le site internet de la Société Française de Thermique.

Le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique a classé 8 communications pour le Prix Biot-Fourier et seront proposées pour publication dans la revue *Entropie : thermodynamique – énergie – environnement – économie (ISTE)*.

Le Comité d'Organisation du congrès remercie très sincèrement le Conseil d'Administration et le Conseil Scientifique de la Société Française de Thermique pour leur soutien renouvelé et leur confiance dans l'organisation du 30^e congrès.

Le Comité local d'Organisation est très heureux de vous accueillir à nouveau en présentiel et vous souhaite, à toutes et à tous, un très bon congrès 2022 !

Julien Pellé
et l'ensemble du comité d'organisation local

Programme

Conférences plénières

Transition écologique et sociétale : des contraintes et des possibles

Mardi 31 mai 2022 – 14h30

CHRISTOPHE GOUPIL

LIED, UMR 8236, Université de Paris

Christophe Goupil est professeur à l'Université de Paris. Physicien de formation, il développe son activité de recherche au sein du Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain, (LIED, UMR 8236), dont il est cofondateur et directeur-adjoint. Ses recherches sont centrées sur les mécanismes de conversion thermodynamique de l'énergie et de la matière dans les systèmes animés, dont le vivant, et dans les systèmes inanimés que sont les dispositifs manufacturés. Dans la lignée des approches biomimétiques il a mis en place une réflexion sur la bio-inspiration des usages de l'énergie. Avec l'économiste Gaël Giraud il développe un modèle macroéconomique intégrant les conditions de production et de recyclage dans un monde de dimension finie. Christophe Goupil est conseiller scientifique du Campus de la Transition, pour lequel il a participé à l'édition du Manuel de la Grande Transition.

Les principes de la thermodynamique s'imposent à tous les systèmes, le vivant ne faisant pas exception. Les contraintes qui en découlent définissent les bordures d'un cadre à l'intérieur duquel se développent les possibles. Subir les principes de la thermodynamique, les assimiler, en utilisant des voies parfois subtiles ou parfois grossières, telles sont les défis auxquels sont confrontées nos communautés, tout comme la nature dans les processus évolutifs. Pour chaque situation la diversité des modalités de couplage entre l'énergie et la matière permet d'explorer l'espace des possibles. A la vision mécaniste idéalisée d'un monde sans frottement, se substitue alors celle de la thermodynamique où qui peut le plus ne peut pas nécessairement le moins, et où l'idéal n'existe pas dans un temps fini. Cette approche thermodynamique nous permet d'envisager d'autres regards dès lors que l'on considère ses extensions sociotechniques, qui elles aussi trouvent un cadre et des bornes. Depuis la révolution industrielle notre monde est passé de la condition aux limites imposée par le flux solaire et le plafond photosynthétique, à la condition aux limites d'un stock d'énergies fossile. Sans nous en rendre compte nous sommes passé des conditions de Neumann à celles de Dirichlet, avec les conséquences que nous mesurons. Si la transition écologique nous enjoint de modérer nos consommations et d'optimiser nos procédés, il faut admettre que ce faisant, n'est considéré que le versant quantitatif du problème, qui est celui qu'énonce le premier principe. Nous nous intéresserons donc aussi au versant qualitatif, qui est celui énoncé par le second principe. Quelques exemples choisis dans la nature et dans les technologies nous permettront de constater que le système le plus adapté et aussi le moins adaptable, et que la faiblesse des rendements de certains processus naturels n'est en fait que le prix à payer pour atteindre une certaine résilience. Quelques conclusions socio-techniques pourront alors être envisagées.

La transition énergétique au coeur des transitions sociétales

Mardi 31 mai 2022 – 16h45

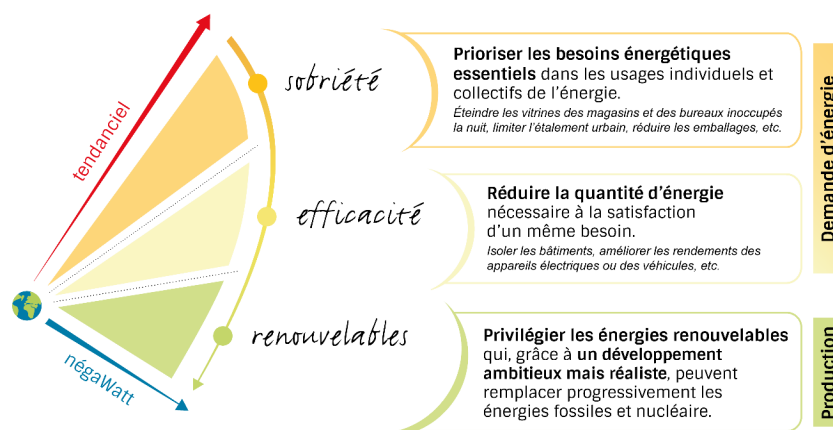
STÉPHANE BALY

Association négaWatt, Valence

Docteur ingénieur de l'UTC de Compiègne et de l'Imperial College of London, Stéphane Baly est enseignant en Sciences Pour l'Ingénieur à HEI et vacataire sur la thématique de transition énergétique (Lille1, INSA-HdF, Asder, ENSA). Il évolue depuis plus de 15 ans en tant qu'expert dans le domaine de la transition énergétique : il est conseiller municipal à la mairie de Lille, conseiller à la Métropole Européenne de Lille, membre du Conseil Économique Social et Environnemental de la région Hauts de France, co-animateur du domaine Smart and resilient cities JUNIA et membre de la compagnie des négaWatts.

Face à l'augmentation inéluctable du coût de l'énergie, face à l'épuisement des ressources, face à l'urgence climatique et aux multiples impacts environnementaux, nous devons rapidement nous orienter vers un nouveau modèle énergétique.

Pour répondre à ces enjeux, l'Association négaWatt a mis au point un scénario de transition énergétique à horizon 2050 traduisant une évolution possible de notre système énergétique. Ce scénario s'appuie sur la démarche négaWatt qui consiste à questionner nos usages de l'énergie avant de s'intéresser aux ressources et non l'inverse : c'est de nous chauffer, de nous éclairer ou de nous déplacer dont nous avons besoin, et non de bois, d'uranium ou de pétrole. La démarche négaWatt est fondée sur trois piliers. Le premier concerne la réduction de nos besoins par la sobriété dans les usages individuels et collectifs de l'énergie. L'efficacité permet ensuite de diminuer la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction de ces besoins. La priorité peut enfin être donnée aux énergies renouvelables qui, grâce à un développement ambitieux mais réaliste, peuvent remplacer progressivement les énergies fossiles et nucléaire.



Association négaWatt – www.negawatt.org

Association à but non-lucratif créée en 2001, négaWatt est dirigée par un collège de membres actifs, la Compagnie des négawatts, qui rassemble une vingtaine d'experts impliqués dans des activités professionnelles liées à l'énergie. Tous s'expriment et s'engagent à titre personnel au sein de l'association.

L'Association négaWatt propose, avec son scénario de transition énergétique, l'alternative la plus aboutie en matière de prospective énergétique, en offrant un modèle durable et applicable en France pour les 40 prochaines années.

Quelles trajectoires de transition énergétique ? Génération de scénarios avec EnergyScope TD.

Mercredi 1 juin 2022 – 08h30

HERVÉ JEANMART

Institute of Mechanics, Materials and Civil engineering (IMMC), Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve (Belgique)

Hervé Jeanmart est professeur à l'Université catholique de Louvain. Il est membre de l'Ecole Polytechnique de Louvain (EPL) où il enseigne, aux étudiants ingénieurs, la thermodynamique appliquée, les moteurs à combustion interne et les énergies renouvelables. Président de l'institut de mécanique, matériaux et génie civil (IMMC), ses activités de recherche portent sur la conversion de la biomasse, la combustion et les systèmes énergétiques. Toutes ses activités tournent autour de l'énergie, il vise deux objectifs majeurs : d'une part faciliter et dynamiser la transition énergétique et d'autre part, mettre en évidence les insuffisances d'une transition exclusivement basée sur la technologie. Il étudie la transition énergétique sous l'angle des besoins en stockage, notamment sous forme de e-fuels. Pour cela il participe au développement de l'outil de simulation EnergyScope TD.

Un système énergétique permet de satisfaire, à partir de sources d'énergies primaires, les besoins en chaleur, en électricité et en mobilité des acteurs d'un territoire. Les enjeux climatiques imposent un changement rapide et radical des sources d'énergie actuellement exploitées. En conséquence, l'ensemble du système doit être adapté, voire réinventé. Cela génère de nombreuses interrogations auxquelles les modèles de planification énergétique essaient de répondre en proposant des scénarios de transition du système actuel vers une société bas carbone en 2050. EnergyScope TD est un tel modèle. Il minimise, pour une région, le coût de la transition sous la contrainte d'une trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre. Il est principalement développé par l'EPFL et l'UCLouvain pour générer des trajectoires de transition et identifier les technologies clés des futurs systèmes énergétiques. Après avoir décrit le cadre de la modélisation des systèmes énergétiques, le modèle EnergyScope sera présenté. Son application aux cas de la Belgique et de l'Italie sera analysée. Les développements en cours du modèle seront abordés comme la prise en compte des incertitudes ou l'importation d'énergie via l'hydrogène et ses dérivés.

Accords de Paris : signification pour la transition vers une mobilité électrique

Mercredi 1 juin 2022 – 14h00

CORENTIN PRIÉ

AUDI AG, Ingolstadt (Allemagne)

Corentin Prié devient Ingénieur en Mécanique et Energétique diplômé de l'INSA-Hdf en 2018. Après un Diplôme de Recherche Technologique Universitaire (DRTU) chez AUDI AG en 2019 sur le développement des énergies et carburants renouvelables, il intègre le groupe et travaille actuellement dans le service "Stratégie motorisation et châssis". Il est spécialisé dans l'analyse du potentiel technico-économique des énergies et carburants renouvelables, l'étude de l'emprunte environnementale (Life Cycle Assessment) de différentes technologies de motorisation incluant la distribution et l'utilisation d'énergies et carburants renouvelables, la simulation de la flotte de véhicules individuels concernant sa consommation d'énergie et l'impact environnemental résultant à long terme ainsi que l'optimisation et l'analyse de scénarios pour réaliser les accords climatiques de Paris.

La réalisation des objectifs climatiques de Paris dépend physiquement d'un budget restant disponible d'émissions de CO_2 . Le contenu de la conférence présente les résultats d'une simulation qui mesure les conséquences des différents vecteurs énergétiques et de la flotte de véhicules existante au cours de la transition électrique de la mobilité individuelle. Basée sur une approche globale du calcul du bilan carbone (Life Cycle Assessment), celle-ci permet d'évaluer la quantité totale de CO_2 qui sera émise par la mobilité individuelle en Union Européenne au cours des trois prochaines décennies, c'est-à-dire jusqu'en 2050. À l'aide de différents scénarios concernant la transition énergétique, la simulation met en avant le potentiel de contribution de certaines mesures sur la diminution de la quantité totale cumulée de CO_2 émise.

Une approche similaire a été réalisée pour les États-Unis et la Chine dans le but de comparer l'emprunte carbone des trois marchés clés de l'automobile. Ces analyses sont accompagnées de l'étude du potentiel énergétique de ces régions afin de simuler des scénarios de transition énergétique à long terme.

L'outil développé permet notamment l'optimisation de la transition automobile couplée à la transition énergétique, dans le but de ne pas épuiser le budget restant disponible en CO_2 . La simulation montre que ceci nécessite de décarboner rapidement l'utilisation de la flotte existante, majoritairement composée de véhicules à moteurs diesel et essence. Certains instruments du programme environnemental européen (Green Deal) permettent de le faire en favorisant la production et l'utilisation de carburants renouvelables d'origine synthétique (eFuels) ou végétale (Biofuels), et la commission européenne travaille actuellement au renforcement de ces mesures.

Enfin, une description technique des carburants synthétiques sera présentée pour clarifier leur potentiel de contribution à la réalisation des objectifs de Paris en ce qui concerne la mobilité.

Jeudi 2 juin 2022 – 14h

VALÉRIE MASSON-DELMOTTE

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – LSCE (UMR 8212) – CEA, Saclay

Valérie Masson-Delmotte est paléoclimatologue au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-CNRS-UVSQ Paris Saclay/IPSL) et co-présidente du groupe n°1 du Giec.

Diplômée de l'Ecole Centrale et d'un doctorat préparé au CEA, Valérie Masson-Delmotte détient le Grand prix Etienne Roth de l'Académie des sciences avec Françoise Vimeux (2002), le prix Louis D. de l'Institut de France (obtenu de façon collective avec le thème climat du LSCE, 2004), le prix Descartes de la Commission Européenne pour la recherche collaborative transnationale (Epica, 2008), le prix d'excellence scientifique de l'UVSQ (2011) ainsi que le prix Irène Joliot-Curie de 2013 dans la catégorie « femme scientifique de l'année ». Elle a également été associée au Prix Nobel de la Paix remis à Al Gore et au Giec en 2007.

Depuis 2008, elle est directrice de recherche au CEA : ses travaux de recherches portent entre autres sur le changement climatique et l'impact du climat futur, la construction des modèles climatiques en fonction du passé, les archives climatiques dans les cernes d'arbres et les glaces polaires. Elle a ainsi contribué à la reconstitution de la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère sur les 800 000 dernières années et a également travaillé sur l'impact du réchauffement climatique sur l'Antarctique en 2070.

Energie, climat et médecine curative : quand le soin menace la santé.

Vendredi 3 juin 2022 – 11h

LAURIE MARRAULD

Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, EHESP Paris Nord, Saint-Denis

Laurie Marraud est Maître de Conférences à l'Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique (EHESP) spécialisée sur la question des usages des technologies numériques en santé. Docteure en sciences de gestion, elle a réalisé sa thèse à Télécom Paris-Tech, avant d'intégrer le LGI de l'Ecole Centrale de Paris et le CRG à l'Ecole Polytechnique en tant que post-doctorante. Laurie Marraud axe ses recherches actuelles sur les conséquences de l'introduction des Technologies d'Information et de Communication (TIC) en santé dans un contexte de transition épidémiologique, démographique et socio-technique. Elle s'intéresse en particulier aux effets ambivalents des technologies selon une perspective praxéologique. Elle collabore également sur les questions de démocratie sanitaire et des TIC comme levier de l'engagement patient. Elle a initié en 2019 au Shift project un travail sur le système de santé, le climat et l'énergie publié sous le rapport "décarboner la santé pour soigner durablement" en novembre 2021.

D'après le Lancet [1], le changement climatique représente la plus grande menace du XXIème pour la santé humaine. Les modélisations du GIEC démontrent la possibilité d'un réchauffement global planétaire allant jusqu'à 5°C en moyenne si nous n'infléchissons pas les tendances des émissions de gaz à effet de serre actuelles, ce qui se traduirait par une "menace existentielle" pour l'humanité. Dans tous les cas, un réchauffement de 2°C de température moyenne est attendu d'ici 2050, en raison du carbone déjà émis et de l'inertie du système économique. Cette élévation de 2° représenterait le début de l'insécurité alimentaire mondiale.

Les conséquences sur nos environnements et nos sociétés, induites par le changement climatique actuel et les modifications environnementales, seront nombreuses, variées dans leur forme et dans leur expression. Ces conséquences représenteront autant de situations inédites et souvent difficiles à anticiper - comme la crise sanitaire et économique de la Covid19 de probable origine environnementale - auxquelles nos sociétés doivent se préparer pour devenir résilientes.

Le système de santé et son organisation sont parties prenantes des constats énoncés ci-dessus. La position singulière du secteur de la santé dans l'économie pose la question de sa vulnérabilité potentielle, tant en tant qu'offres de soins que structures complexes dépendantes de nombreux approvisionnements énergétiques et matériels pour fonctionner. La question climatique fait émerger de multiples enjeux pour les acteurs de la santé qui devront évoluer vers un monde potentiellement "invivable et accessoirement inassurable" comme l'évoquait Henri de Castries, ex PDG d'Axa [2], si rien n'est fait.

Le système de santé doit donc anticiper deux changements majeurs. D'un côté, l'évolution de la demande de soins, liée aux effets des changements de l'environnement sur la santé des populations. De l'autre côté, la transformation de l'offre de soins liée à la double contrainte carbone, c'est-à-dire réduire l'intensité carbone de l'activité de soins et trouver des substituts aux ressources carbonées. Dans ce cadre, **comment assurer une accessibilité durable à la santé dans un contexte (i) d'augmentation des risques sanitaires et des besoins de santé liés aux changements environnementaux et (ii) de tension sur les ressources ?**

[1] Costello A., Abbas M., Allen A. et al., Managing the health effects of climate change. The Lancet. 2009 ; 373 : 1693-1733.

[2] <https://theconversation.com/une-fonction-achats-qui-priorise-lecologie-dans-ses-indicateurs-dynamise-la-performance-economique-de-lentreprise-158087>

Ateliers

Pratiques pédagogiques en thermique

Mercredi 1 juin 2022 – 16h30

| **MARIE-CHRISTINE DULUC – LAFSET, CNAM, Paris**

L'apport du numérique dans la thermique

Jeudi 2 juin 2022 – 8h30

| **FRANÇOISE BATAILLE – Université de Perpignan, PROMES (UPR 8521), Perpignan**
| **EMMANUEL LAROCHE – ONERA, Toulouse**
| **MARC MEDALE – Aix Marseille Université, IUSTI (UMR 7343), Aix Marseille**
| **ADRIEN TOUTANT – Université de Perpignan, PROMES (UPR 8521), Perpignan**

Synergie entre expérience et modélisation pour la caractérisation de carburants alternatifs

Vendredi 3 juin 2022 – 8h30

| **ALESSANDRO PARENTE – Université Libre de Bruxelles, Unité de recherche Aéro-Thermo-Mécanique, Bruxelles**

Les enjeux de la massification de la rénovation du bâtiment

Vendredi 3 juin 2022 – 8h30

| **PHILIPPE CERS – EDF, Direction régionale Hauts-de-France, Lille**

Prix Biot-Fourier

Huits contributions ont été présélectionnées pour le Prix Biot-Fourier. Les auteurs présenteront leurs travaux à l'occasion de deux sessions orales.

Le Prix Biot-Fourier sera attribué en fonction des rapports d'expertise et de la qualité des présentations orales.

Radiométrie Photothermique pulsée périodique en configuration face avant pour la caractérisation thermique d'une couche de Si₃N₄ amorphe

Clément Chassain^{1,*}, Jean-Luc Battaglia¹, Andrzej Kusiak¹

* ✉ : clement.chassain@u-bordeaux.fr

¹ I2M Bordeaux Unité TREFLE

Mots clés : radiométrie photothermique, excitation pulsée périodique, couches mince, conductivité thermique, résistance thermique d'interface, techniques de minimisation

(Cf. page [67](#))

Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo

Yaniss Nyffenegger-Péré^{1,*}, Stéphane Blanco¹, Jean-Louis Dufresne², Mouna El Hafi³, Vincent Eymet⁴, Vincent Forest⁴, Richard Fournier¹, Nicolas Mellado⁵, Nada Chems Mourtaday¹, Mathias Paulin⁵

* ✉ : yaniss.nyffenegger-pere@laplace.univ-tlse.fr

¹ Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE)

² Laboratoire de Météorologie Dynamique and Institut Pierre Simon Laplace (LMD/IPSL)

³ Laboratoire RAPSODEE

⁴ MesoStar

⁵ Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Mots clés : Forçage des gaz à effet de serre, Transfert radiatif, Monte-Carlo, Raie-par-raie

(Cf. page [120](#))

Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique

Sylvain Cailliez^{1,*}, David Chalet¹, Philippe Mannesiez²

* ✉ : sylvain.cailliez@ec-nantes.fr

¹ Ecole Centrale de Nantes, LHEEA Lab. (ECN/CNRS), Nantes

² CRITT M2A, Béthune

Mots clés : Batterie, Propriétés thermiques, Spectroscopie d'Impédance Thermique, Modèle nodal

(Cf. page [71](#))

Scanning fast photothermal radiometry

Alejandro Mateos Canseco^{1,*}, Andrzej Kusiak¹, Jean-Luc Battaglia¹

* ✉ : alejandromateoscanseco@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie, I2M

Mots clés : Photothermal radiometry ; Thermal conductivity ;

(Cf. page [72](#))

Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale

Thomas Villemin¹, Olivier Farges¹, Gilles Parent¹, Rémy Claverie², Julien Bouyer²

* ✉ : thomas.villemin@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine, LEMTA UMR 7563

² Cerema, Équipe de Recherche TEAM, 71 rue de la grande haie, 54510 Tomblaine, France

Mots clés : Méthode de Monte Carlo, Photovoltaïque, Conduction, Rayonnement, Convection

(Cf. page [17](#))

Condensation convective à faible vitesse massique : Analyse des phénomènes thermohydrauliques locaux

Marion Beaumale¹, Pascal Lavieille¹, Marc Miscevic¹

* ✉ : marion.beaumale@laplace.univ-tlse.fr

¹ LAPLACE

Mots clés : condensation convective, métrologie optique, coefficient d'échange, expérimental

(Cf. page [116](#))

Thermo-hydraulic analysis of the flat plate pulsating heat pipe tested under μ -gravity conditions

Maksym Slobodeniuk^{1,*}, Rajalakshmi Ravichandran², Remi Bertossi³, Vincent Ayel², Cyril Romestant², Yves Bertin²

* ✉ : maksym.slobodeniuk@ensma.fr

¹ IPSA ; ISAE-ENSMA

² ISAE-ENSMA

³ IPSA

Mots clés : Pulsating Heat Pipe, Microgravity, Thermal Performance, Flow Transition

(Cf. page [117](#))

Influence des propriétés des grains sur la conductivité thermique d'un lit de poudre d'alumine α -Al₂O₃

Jordan Letessier^{1,*}, Jean-Laurent Gardarein², Jean-Mathieu Vanson³, Christelle Duguay³, Fabrice Rigollet², Aimen E. Gheribi⁴, Jérôme Vicente²

* ✉ : jordan.letessier@univ-amu.fr

¹ CEA,DES,IRESNE,DEC,Cadarache et laboratoire IUSTI Technopôle Château-Gombert

² Laboratoire IUSTI Technopôle Château-Gombert

³ CEA,DES,IRESNE,DEC,Cadarache

⁴ Polytechnique Montréal, Montréal, QC, H3C 3A7, Canada

Mots clés : caractérisation de propriétés thermiques, diffusivité, conductivité thermique, méthode inverse, tomographie à rayon X, alumine, simulation FFT

(Cf. page [123](#))

Table des matières

I Prolégomènes	iii
Parrainages	v
Comité d'organisation	ix
Liste des relecteurs	xi
Le mot du comité d'organisation	xiii
Programme	xv
Prix Biot-Fourier	xxiii
Radiométrie Photothermique pulsée périodique en configuration face avant pour la caractérisation thermique d'une couche de Si ₃ N ₄ amorphe	xxiii
Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo	xxiii
Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique	xxiv
Scanning fast photothermal radiometry	xxiv
Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale	xxv
Condensation convective à faible vitesse massique : Analyse des phénomènes thermohydrauliques locaux	xxv
Thermo-hydraulic analysis of the flat plate pulsating heat pipe tested under μ -gravity conditions	xxvi
Influence des propriétés des grains sur la conductivité thermique d'un lit de poudre d'alumine α -Al ₂ O ₃	xxvi
Table des matières	xxvi
II Résumé des communications	1
1 Divers	3
Gas flow and heat transfer CFD modeling in microchannels	4

Etude théorique d'un écoulement bulle-bouchon dans un micro canal rectangulaire : Comparaison entre les différents niveaux de modélisation	5
Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier	6
Caractérisation et localisation de l'endommagement dans les matériaux sous contrainte thermique : application de l'émission acoustique	7
Linear stability analysis of a ferrofluid in a radially heated concentric cylindrical annulus with an applied magnetic field	8
Vers la mise en place de références métrologiques en capacité thermique massique par calorimétrie à chute jusqu'à 3000 °C	9
Develop 800V battery architecture to speed up electric vehicle charging : trade-off between charging infrastructure cost and time spent in station	10
Analyse de sensibilités paramétriques par les méthodes Monte-Carlo	11
Etude des matériaux nanostructurés par SThM : microscopie à sonde locale	12
2 Energétique	13
Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration	14
Etude d'une nouvelle configuration d'un moteur Ericsson à piston liquide libre	15
Etude d'un système de valorisation de l'énergie thermique des routes pour les besoins des bâtiments	16
Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale	17
Optimisation multicritère des performances exergetique, environnementale et économique d'un stockage thermique de type thermocline en fonction des taux de cut-off en charge et en décharge	18
Production thermique d'électricité et cycles thermodynamiques alternatifs	19
Etude expérimentale et numérique d'un Cycle de Rankine à fluide Organique (ORC) appliqué aux Réacteurs à Eau Pressurisés (REP)	20
Can flashback be avoided with humidification in an original micro Gas Turbine combustor ? – 1D predeterminations and LES validation	21
Modélisation et analyse paramétrique d'une machine Stirling frigorifique	22
Analyse des performances de combustion de gaz synthétiques non-conventionnels dans une micro turbine à gaz	23
Etude théorique et expérimentale de l'utilisation de la biomasse solide comme source d'énergie renouvelable : le cas de la Roumanie	24
3 Modes de transfert	25
Influence du rapport de forme sur la convection naturelle de double diffusion dans un mélange gazeux non-gris	26
Etude expérimentale des instationarités au sein d'un écoulement de convection naturelle dans une cavité cubique comprenant un obstacle partiellement chauffé	27
Caractérisation expérimentale des transferts de chaleur dans un canal d'eau avec changement de phase	28

Etude CFD de l'impact des conditions d'injection pour un stockage thermocline en eau . . .	29
Hétérogénéité des modes de transferts convectifs au sein des centrales solaires photovoltaïques	30
Contribution à l'étude expérimentale et numérique de l'écoulement d'air dans une fenêtre pariétodynamique chauffante	31
Cavity size influence on Rayleigh-Bénard convection under the effect of wall and gas radiation	32
Caractérisation des cinétiques de cristallisation du poly(éther éther cétone) (PEEK) par mesure de la chaleur spécifique en calorimétrie différentielle à balayage rapide	33
Modélisation de la cinétique de cristallisation d'un matériau à changement de phase dopé en conductivité par méthode inverse	34
Premiers résultats d'échauffement et d'usure d'un banc représentatif du contact électrique glissant caténaire-pantographe	35
Formulation et caractérisation thermophysique et mécanique d'un mortier renforcé par des fibres naturelles végétales de Posidonia-Oceanica et animales de Plumes de Poulet .	36
Convection naturelle en cavités scalène différentiellement chauffée : application au refroidissement des panneaux solaires photovoltaïques.	37
Lattice Boltzmann Method investigations of natural convection heat transfer instabilities in a rectangular cavity heated from below	38
A genetic algorithm-based topology optimization method for convective cooling of a heating surface with multiple-peak heat flux	39
Modelling of coupled Heat transfer - Application to Porous media at high temperatures . . .	40
Analyse théorique des échanges convectifs forcés en conduites chauffées : application aux thermosiphons hydrauliques et aux échangeurs diphasiques	41
4 Modélisation et Simulation Numérique	43
Conductivité thermique d'une céramique affectée par un réseau de fissures localisées aux joints de granulats : simulations 2D de l'effet d'une distribution bimodale de taille de granulats	44
Furnace thermal piloting management in siderurgy	45
Modélisation thermique d'un matériau composite semi-transparent soumis un laser de haute énergie	46
Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion using Adaptive Mesh Refinement in a typical Micro GasTurbine Combustor	47
Identification de modèles paramétriques monodimensionnels d'un four de brasage et de sa charge	48
Comparaison de méthodes de modélisation système d'un stockage de vapeur par Matériaux à Changement de Phase	49
Modélisation du chauffage de polymères par micro-ondes : approches numérique et expérimentale	50
Simulation du refroidissement d'une zone représentative d'un assemblage de cœur de REP par un écoulement dispersé vapeur/gouttes	51
Simulation numérique de dépôts de particules dans un échangeur par approche Euler – Lagrange	52

Insight into prediction of unsteady forced convection in a porous straight channel subjected to an inlet flow modulation : A REV lattice Boltzmann investigation	53
A REV-scale assessment of metal foam porosity effect on a PCM's melting in an latent heat energy storage unit	54
Tests et améliorations de modèles mixtes de Simulation des Grandes Échelles d'un écoulement à fort nombre de Reynolds en canal asymétriquement chauffé	55
Modélisation numérique du transport de particules fines dans un milieu gazeux en considérant l'effet thermique	56
Design of the HIFU thermal ablation treatment of cancer with stochastic simulations	57
Implémentation de modèles de boîte noire adaptés pour la caractérisation des performances de refroidisseurs commerciaux à sorption	58
Réduction modale d'un modèle non-linéaire de composant électronique : Application à une micro-puce activée de 4 sources	59
Optimisation de forme d'échangeurs thermique en régime turbulent	60
Simulation numérique du comportement du corps humain en état de stress thermique	61
Modélisation et validation expérimentale d'un bassin sportif à la Réunion	62
Présentation d'un cycle thermomécanique innovant mettant en œuvre des écoulements pulsés de fluide organique destiné à la récupération de chaleur fatale basse température	63
Modélisation des transferts radiatifs par réseaux de neurones en présence de phénomènes rares et discontinus	64
5 Métrologie et Techniques Inverses	65
Mesure de la conductivité thermique des métaux à température cryogénique	66
Radiométrie Photothermique pulsée périodique en configuration face avant pour la caractérisation thermique d'une couche de Si ₃ N ₄ amorphe	67
Étude de l'ébullition en mini-canal vertical : analyse du transfert de chaleur par méthode inverse.	68
Optimal sensor location for inverse heat conduction problem in multilayered building walls	69
Influence des échanges radiatifs sur l'identification du coefficient d'échange thermique à l'interface verre/outil	70
Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique	71
Scanning fast photothermal radiometry	72
Mesure de températures sur des corps opaques à hautes températures par méthodes multi-spectrales	73
Observation and Quantification of CO ₂ passive degassing at sulphur Banks from Kilauea Volcano using thermal Infrared Multispectral Imaging	74
Méthode de détection sans contact des effets de l'érosion éolienne sur un verre sodocalcique	75
Tricouches symétriques pour la caractérisation thermique de couches minces par méthode opto-électrothermique	76

Contrôle non destructif quantitatif 1D de matériaux opaques par thermographie infrarouge biface et méthodes de températures duales	77
Caractérisation expérimentale et numérique du procédé de chauffage par induction d'une sphère en tantale	78
Caractérisation de la réponse impulsionnelle d'un système diffusif par une paramétrisation dosale non isochrone	79
Mesure des champs de température et de concentration dans un réacteur microfluidique par thermospectroscopie infrarouge	80
Tomographie thermo-spectroscopique 3D par "Flying Spot" en utilisant un thermoconver- tisseur hyperspectral couplée à une caméra infrarouge	81
Etude de la thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge pour la mesure de température	82
Effet de taille de source sur la mesure de température par thermographie infrarouge à l'échelle microscopique.	83
6 Thermique appliquée	85
Etude numérique du stockage latent d'énergie thermique dans un échangeur-stockeur innovant pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments	87
Évaluation expérimentale du potentiel de la climatisation par eau de mer (SWAC) en climat tropical	88
Etude de la cuisson par contact d'un produit céréalier	89
Étude d'une mousse métallique associée à un réseau de caloducs pour améliorer le contrôle thermique de moules d'injection	90
Méthodologie de dimensionnement d'un dissipateur thermique pour les dernières généra- tions de convertisseurs de puissance	91
Modèle semi-analytique d'un caloduc capillaire cylindrique en régime transitoire avec conditions aux limites de flux imposés	92
Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondations géothermiques	93
Optimisation multicritère d'un système solaire thermique avec un stockage inter-saisonnier	94
Étude expérimentale à échelle réduite d'un bassin de toit – performance de rafraîchisse- ment en climat océanique	95
Quench water quality thermal impact estimation	96
Approche expérimentale du phénomène d'adhésion lors de la mise en forme de produits verriers : étude de l'échange thermique et détermination de l'effort de retrait	97
Etude de la combinaison de panneaux aérovoltaiques améliorés et d'un bâtiment énergé- tiquement performant	98
Développement d'un dispositif expérimental de surmoulage permettant la mesure de la résistance thermique de contact pièce polymère/pièce polymère en conditions in- dustrielles	99
Prise en compte du confort des usagers dans les projets de réhabilitation	100
Analysis on applicability of phase change material glazing unit in different climate conditions	101

Efficacité énergétique et consommation d'eau associés à différentes techniques de refroidissement évaporatif appliquées à un condenseur de climatisation	102
Correlation between field-test and laboratory results for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) used as a residential cogeneration system	103
3E analysis of a hybrid renewable energy system	104
Analyse du risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol (EAHE)	105
Etude expérimentale des performances thermiques d'un mur Trombe	106
Amélioration du refroidissement des fumées d'un incinérateur industriel	107
Evaluation des performances d'un système de refroidissement évaporatif indirect dans un bâtiment tertiaire	108
Caractérisation d'un four de cuisson haute température pour pains libanais	109
Description et performances d'une solution photovoltaïque de production d'eau chaude sanitaire en logement collectif en autoconsommation	110
Étude des technologies de l'hydrogène-énergie appliquées aux bâtiments à faible impact carbone	111
Aérogels hybrides pour la construction durable : Élaboration, caractérisation et modélisation	112
Amélioration du confort thermique par utilisation des MCP dans l'enveloppe du bâtiment	113
Earth-Air Heat Exchangers : Impact of Surrounding Conditions on Long-term Performance	114
7 Transferts en milieux hétérogènes	115
Condensation convective à faible vitesse massique : Analyse des phénomènes thermohydrauliques locaux	116
Thermo-hydraulic analysis of the flat plate pulsating heat pipe tested under μ -gravity conditions	117
Ébullition en film sous flux solaire concentré	118
Encapsulation de matériaux à changement de phase dans un emballage alimentaire	119
Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo	120
Étude du comportement de mouillage d'une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe en fonction de la température et de l'humidité	121
Modélisation des performances thermiques d'un évaporateur solaire	122
Influence des propriétés des grains sur la conductivité thermique d'un lit de poudre d'alumine α -Al ₂ O ₃	123
Project of a pressure stabilizing system for fast boiling experiments	124
Caractérisation des performances de poreux céramiques bicouches pour boucles diphasiques à pompage capillaire	125
Analyse des transferts thermiques lors de la convection forcée d'un gaz en milieu microporeux	126
Simulation et optimisation des performances d'un compresseur à hydrogène par adsorption-désorption à entraînement thermique	127
Étude expérimentale de la vaporisation sous faible pression d'une goutte d'eau sur une paroi chauffée	128

Etude de la micro-explosion de biocarburants émulsionnés sous différents schémas de chauffage radiatifs 129

III Annexes 131

Liste des auteurs 133

Deuxième partie

Résumé des communications

Thème 1

Divers

Gas flow and heat transfer CFD modeling in microchannels	4
Etude théorique d'un écoulement bulle-bouchon dans un micro canal rectangulaire : Comparaison entre les différents niveaux de modélisation	5
Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier	6
Caractérisation et localisation de l'endommagement dans les matériaux sous contrainte thermique : application de l'émission acoustique	7
Linear stability analysis of a ferrofluid in a radially heated concentric cylindrical annulus with an applied magnetic field	8
Vers la mise en place de références métrologiques en capacité thermique massique par calorimétrie à chute jusqu'à 3000 °C	9
Develop 800V battery architecture to speed up electric vehicle charging : trade-off between charging infrastructure cost and time spent in station	10
Analyse de sensibilités paramétriques par les méthodes Monte-Carlo	11
Etude des matériaux nanostructurés par SThM : microscopie à sonde locale	12

Gas flow and heat transfer CFD modeling in microchannels

Abdelhamid Blidia^{1,*}, Jean Kovchar¹, Francois Lanzetta¹, Magali Barthes¹, Michel De Labachellerie¹

* ✉ : abdelhamid.blidia@femto-st.fr

¹ FEMTO-ST institute, Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS

Mots clés : Microfluidics ; Heat transfer coefficient ; Pressure drop ; Numerical simulation

Résumé :

During the last decade, the development of microfabrication technologies for the fabrication of Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) has led to the development of an increasing number of microfluidic technologies. However, the emergence of MEMS, has highlighted that the behavior of fluids in micro-channels is not necessarily the same as the one experienced at the macroscopic scale. This has led to numerous questions regarding the applicability of the predictions based on conventional assumptions for gas-phase microflows. Previous experiments on a thermal micro-machine based on a Stirling cycle were carried out in our institute, and have highlighted thermal issues, high pressure drops and difficulties to understand oscillating flows at these microscales. In the literature, the effects of various parameters such as working fluid, cross-sectional geometry of duct, channel wall roughness and aspect ratio have already been studied for unidirectional permanent flows. However, fluid flow and heat transfer in oscillatory flows are still not yet mastered and require further research work.

Thus, the objective of the present study is to investigate numerically permanent and oscillating gas flows in microchannels with and without temperature gradient. The aim is to obtain reference data that will be compared to the correlations obtained in the literature, before being compared later on with experimental results. A three-dimensional model of microchannel is established and simulated using the commercial code ANSYS Fluent. The influences of working fluids, fluid temperature, geometrical parameters (such as hydraulic diameter, length of the channel and cross-sectional geometry of duct) are investigated, as well as the associated minor and major losses. The pressure drop data are used to characterize the friction factor over a range of aspect ratio from 0.024 to 1 and Reynolds number from 0.1 to 100 with Air, Helium, Hydrogen and Nitrogen as working fluids.

This numerical analysis will be completed by an experimental study with micro-channels that are currently being microfabricated in the MIMENTO cleanroom facility of the FEMTO-ST Institute. They will be instrumented with temperature and pressure sensors, manufactured and calibrated in our institute, that will provide local measurements inside the micro-channel. The experimental setup, that will allow both the studies for permanent and alternate gas flows, is currently under construction.

Etude théorique d'un écoulement bulle-bouchon dans un micro canal rectangulaire : Comparaison entre les différents niveaux de modélisation

Thibault Van'T Veer¹, Alessandro Semeraro², Vincent Ayel², Mouad Diny¹, Yves Bertin²

* ✉ : thibault.vantveer@stellantis.com

¹ Stellantis – Site de Carrières sous Poissy, 78955 Carrières sous Poissy

² Pprime Institute CNRS – ENSMA – Université de Poitiers, UPR 3346, 86961 Futuroscope-Chasseneuil

Mots clés : Caloducs Oscillants, Modélisation, Evaporation, Vapeur Surchauffée, Propriétés Thermodynamiques

Résumé :

Les travaux de modélisation sont focalisés sur une branche unitaire d'un caloduc oscillant pour une application dans le domaine du transport, en particulier sur la gestion thermique du groupe motopropulseur électrifié (batterie, électronique de puissance, machine électrique). Le système étudié fait état de la succession d'une poche de vapeur, d'un bouchon liquide et d'une seconde poche de vapeur dans un micro-canal de section rectangulaire. Le micro canal se présente sous la forme d'un U en position verticale, où le liquide occupe à l'état initial la partie inférieure alors que les deux bulles de vapeur sont réparties de part et d'autre du U. Il s'agit là d'isoler le mouvement du bouchon liquide provoqué par une instabilité en température sur l'une des deux poches de vapeur. La spécificité de cette configuration repose dans la position basse et la faible proportion qu'occupe la zone condenseur : cette dernière représente environ un dixième de la hauteur totale du PHP au regard de la zone évaporateur qui occupe l'ensemble de la surface haute (« top heat mode »). Sous l'effet de la gravité, le risque de se retrouver dans une situation noyée où l'intégralité du liquide reste bloquée dans la zone condenseur est grande. Pour amorcer le démarrage des oscillations, une instabilité en pression et donc en température de la phase vapeur est nécessaire pour déplacer le liquide vers la zone évaporateur et ainsi laisser place à la poche de vapeur d'attendre le condenseur. L'objectif premier de ces travaux est donc de mener une étude comparative entre différents fluides et géométries qui permettent de minimiser cette instabilité.

Pour ce faire, différents niveaux de modélisation sont étudiés en tenant compte au final de l'évolution du film liquide déposé sur la paroi par le ménisque récessif. Ainsi l'apport de chaleur engendré par l'évaporation du film liquide, de la ligne triple et du ménisque est ensuite étudié puis ajouté à l'augmentation d'énergie interne de la phase vapeur. Plusieurs hypothèses sont travaillées pour inclure le travail des forces de pressions à l'équation de l'énergie interne lors de l'expansion de la vapeur.

L'analyse des différents niveaux de modélisation pour différents fluides montre des comportements différents sur le déplacement des bouchons liquides. En effet, les transferts de chaleur vers la vapeur sont dans un premier temps sous forme de chaleur sensible dans la zone asséchée puis par chaleur latente avec l'évaporation. Ils sont par conséquent le point de départ de l'augmentation de température et donc de pression de la poche vapeur. La proportion entre la chaleur apportée à la vapeur surchauffée ou par le film liquide dépend à la fois des propriétés thermodynamiques des différents fluides, de la géométrie des canaux, mais principalement des hypothèses de modélisation imposées. Enfin une figure de mérite laisse ressortir un intérêt particulier pour les fluides frigorigènes qui, dans cette configuration particulière, demandent un faible niveau d'instabilité pour libérer la zone condenseur de la phase liquide.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-023>

Apport de la télédétection dans la modélisation numérique du microclimat urbain à l'échelle du quartier

Baptiste Bouyer^{1,*}, Auline Rodler¹, Laure Roupioz², Sihem Guernouti¹, Marjorie Musy¹, Xavier Briottet²

* ✉ : baptistebouyer@gmail.com

¹ Cerema - Équipe de recherche BPE

² ONERA - DOTA

Mots clés : Microclimat ; Simulation Numérique ; SOLENE-Microclimat ; Télédétection ; Ilots de chaleur urbain ; Thermographie Infrarouge

Résumé :

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain désigne les zones urbaines où les températures d'air et de surfaces sont supérieures à celles des zones rurales environnantes. Ce phénomène, qui tend à s'intensifier avec le réchauffement climatique et lors d'évènements ponctuels tels que les vagues de chaleur, a des conséquences délétères sur le confort et la santé des populations urbaines. Au sein d'une ville, tous les quartiers ne sont pas égaux face à ce phénomène principalement en raison de l'hétérogénéité des activités, des infrastructures, de la proximité de végétation ou d'étendues d'eau, etc. Afin d'apporter une réponse adaptée à cette problématique, il est essentiel d'identifier les quartiers les plus touchés. Pour quantifier l'intensité des îlots de chaleur, deux indices sont généralement utilisés : l'indice UHI (Urban Heat Island) qui désigne la différence de température de l'air entre la ville et son environnement rural et l'indice SUHI (Surface Urban Heat Island) défini comme la différence de température de surface de la ville et de la zone rurale. La réalisation de cartographies détaillées de la température de l'air en milieux urbains pour l'évaluation de l'UHI par des mesures locales est très limitée. En revanche, en raison de la disponibilité et de la couverture des données, la télédétection dans le domaine de l'infrarouge thermique permet de déterminer la température des surfaces de la ville et donc de calculer l'indice SUHI aux heures de passage des satellites. Si on observe des comportements semblables de nuit, les deux indices diffèrent aux cours de la journée notamment en raison des formes urbaines. Néanmoins, la pleine compréhension des relations entre les deux indices n'est pas encore atteinte. Une piste prometteuse de poursuite de ces travaux est le couplage de la télédétection à la modélisation numérique du microclimat urbain.

L'un des objectifs de la mission franco-indienne TRISHNA, dont le lancement du satellite éponyme est prévu en 2025, concerne la préparation de produits adaptés à l'étude des villes. Le projet DIRT (District Infrared theRmography for microclimaTe) s'inscrit dans les travaux du groupe TRISHNA urbain et a pour objectif d'évaluer l'apport des futures données infrarouges thermiques (IRT) mesurées par le satellite TRISHNA pour la cartographie de la température de l'air et d'indices de confort thermique en zone urbaine en s'appuyant sur des simulations numériques du modèle Solene-Microclimat.

Ces travaux s'appuient sur la modélisation numérique du microclimat du quartier du Pin Sec à Nantes. En attendant le lancement du satellite TRISHNA, les données de télédétection utilisées sont les images infrarouges aéroportées acquises lors de la campagne de mesures FluxSAP2010 à la résolution de 2,6 mètres. À partir de ces données, des images proxy sont réalisées à différentes résolutions spatiales. Les températures de surfaces déterminées à partir des images infrarouges sont imposées dans le calcul des bilans thermo-radiatifs. Nous présentons ici l'étude de l'influence de la résolution spatiale et temporelle des données IRT sur les températures de surface et d'air simulées, les températures simulées sont notamment confrontées aux mesures de températures in situ des sols, façades et toits de la campagne de mesure FluxSAP2010.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-029>

Caractérisation et localisation de l'endommagement dans les matériaux sous contrainte thermique : application de l'émission acoustique

Florian Bonzoms^{1,*}, Olivier Faugeroux¹, Stéphane Thil¹, Alain Proust², Thierry Chotard³

* ✉ : florian.bonzoms@promes.cnrs.fr

¹ Laboratoire PROMES

² Mistras Group

³ Laboratoire IRCER

Mots clés : Solaire à concentration, récepteur solaire, Émission acoustique, carbure de silicium, brasure SiC

Résumé :

Les centrales solaires à concentration représentent une solution prometteuse dans la transition énergétique. Un grand nombre d'études vise à améliorer leurs performances. Les aléas climatiques (passages nuageux) produisent des variations brutales dans le flux solaire, ce qui engendre de fortes contraintes thermiques et mécaniques sur le récepteur. Les caractéristiques attendues pour un matériau constitutif d'un récepteur de bonne qualité sont la tenue en température, à l'oxydation, une bonne conductivité thermique et un faible coefficient de dilatation thermique. Le carbure de silicium (SiC, semble donc être un bon candidat. Son inconvénient majeur est sa faible capacité de déformation engendrant un comportement mécanique fragile (rupture soudaine et non prévisible). Une série de thèses a permis de développer un banc d'essai pour matériau sous irradiation solaire concentrée : le banc IMPACT (In-situ thermo-Mechanical Probe by ACoustic Tracking). Ce système expérimental permet le suivi du comportement thermomécanique du matériau grâce à l'émission acoustique (EA) et au suivi de la température de l'échantillon. Ces échantillons sont des disques de 100 mm de diamètre pour une épaisseur de 4 à 5 mm. L'EA correspond à la détection des ondes élastiques transitoires (appelées salves) générées par l'endommagement du matériau soumis à une contrainte (mécanique ou thermique). On fera l'hypothèse qu'un même type d'événement, (microfissuration, corrosion, délamination...) dans un milieu de propagation de même fonction de transfert, produira un même type de salve. Chaque salve est ensuite caractérisée par une série de paramètres appelés paramètres de forme, par exemple : amplitude, durée, énergie...

Pour le système IMPACT, les salves sont détectées de manière simultanée par six capteurs pour permettre une localisation par double triangulation.

Le comportement du carbure de silicium (SiC) sous contraintes thermiques sévères nécessite plus d'investigations, notamment dans le cadre de la conception de système assemblés. En effet, lors du projet SicSol en 2013, un récepteur assemblé en SiC avait explosé suite à une variation de flux solaire brutale. Le mécanisme de la rupture n'est à ce jour pas connu. Afin de mieux comprendre les différents mécanismes mis en jeu, des échantillons de SiC ont été testés sur le banc IMPACT. Certains d'entre eux contiennent une singularité connue (brasure) afin d'évaluer l'impact de ces discontinuités sur le comportement global de l'échantillon. Un chargement thermique cyclique permet de générer un champ de contrainte de même nature dans l'échantillon. Les données brutes de l'EA sont enregistrées puis traitées afin de mieux caractériser et localiser l'endommagement. Le comportement général observé est que les brasures de plus fine épaisseur permettent une meilleure tenue des échantillons. Les objectifs de ces expérimentations sont de caractériser le comportement sous flux solaire concentré d'échantillons en SiC.

Premièrement, dans cette communication, nous présenterons le principe de l'EA. Puis, nous détaillerons le fonctionnement du dispositif expérimental IMPACT ainsi que l'enjeu qu'il représente dans la compréhension du comportement thermomécanique des assemblages en SiC. Enfin, nous aborderons les résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons de SiC assemblés.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-041>

Linear stability analysis of a ferrofluid in a radially heated concentric cylindrical annulus with an applied magnetic field

Anupam Mahantayya Hiremath¹, Antoine Meyer¹, Harunori Yoshikawa², Innocent Mutabazi¹

* ✉ : anupam-mahantayya.hiremath@etu.univ-lehavre.fr

¹ LOMC UMR CNRS 6294

² CNRS UMR 7010

Mots clés : Thermomagnetic convection, ferrofluids, linear stability analysis

Résumé :

A study of linear stability analysis (LSA) was conducted on a ferrofluid confined in an infinitely long cylindrical annulus, with differential radial heating. A stack of magnets inside the inner cylinder providing a magnetic field. In addition, the cylinders can rotate rigidly with an angular frequency. Besides the Archimedean buoyancy and the centrifugal buoyancy, the ferrofluid is subjected to the magnetic Kelvin force. The later consists of a conservative part which does not create flow and non-conservative force which can be seen as a magnetic buoyancy with an effective radial magnetic gravity g_m .

To test the stability of the base state in the annulus, we add small perturbations to the base state and linearize the resulting equations. The small perturbations are expanded the perturbations in form of normal modes and we search the marginal states with a zero temporal growth rate.

Two cases are investigated. In the first one, microgravity conditions are considered in which either the cylindrical annulus is at rest or it is rigidly rotated for $Ta=10$, $Ta=20$ and $Ta=40$. We found that the threshold increases with the radius ratio η and that the solid-body rotation delays the threshold of instability. In all cases, the threshold Ra_{mc} is independent of the Prandtl number (Pr).

In the second case, the Earth gravity acts on the ferrofluid confined in a stationary vertical cylindrical annulus. For weak value of Gr , i.e. $Gr < Gr_c$ critical modes are stationary and appear in form of columnar (SC) vortices ; these modes are due to magnetic buoyancy that is why we call them magnetic modes. For $Gr > Gr_c$ and $Ra_m < Ra_{mc}$, critical modes are either oscillatory hydrodynamic modes for $Pr < 12.45$ and oscillatory thermal modes for $Pr > 12.45$. An energetic analysis will be performed to get a better insight into the powers associated to each buoyancy force.

The obtained results are analogous to those obtained in the same cylindrical annulus subject to a dielectrophoretic force and to a solid-body rotation.

Vers la mise en place de références métrologiques en capacité thermique massique par calorimétrie à chute jusqu'à 3000 °C

Refat Razouk¹, Olivier Beaumont¹, Jacques Hameury¹, Bruno Hay¹

* ✉ : refat.razouk@lne.fr

¹ Laboratoire National de métrologie et d'Essais

Mots clés : Calorimétrie à chute, capacité thermique massique, haute température, métrologie.

Résumé :

Le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais a développé une installation de référence pour effectuer des mesures de diffusivité thermique par méthode "laser flash" jusqu'à 3000 °C. Cette installation a été adaptée à la détermination de la capacité thermique massique des matériaux aux très hautes températures par calorimétrie à chute. Dans cette installation, un échantillon, mis dans un creuset et suspendu par un fil métallique très fin en tantale (diamètre 50 µm) via une pince motorisée, est chauffé dans un four inductif. Lorsque l'équilibre thermique est atteint, le creuset et l'échantillon chute dans un bloc calorimétrique situé sous le four et maintenu à une température proche de la température ambiante. Un obturateur mécanique mobile est placé au-dessus du calorimètre pour limiter le rayonnement du four vers le calorimètre pendant les phases de chauffe. Les variations d'enthalpie de l'échantillon entre sa température initiale dans le four et la température du calorimètre sont mesurées par étapes en fonction de la température initiale dans le four. Plusieurs creusets ont été fabriqués et utilisés pour effectuer des essais à vide et avec les matériaux à tester afin de s'affranchir des pertes thermiques de l'échantillon lors de la chute. La dérivation de la courbe de variation d'enthalpie de l'échantillon par rapport à la température initiale dans le four conduit à la capacité thermique massique. L'étalonnage en énergie du calorimètre est effectué par substitution électrique dans des conditions expérimentales identiques à celles des mesures grâce à un système d'étalonnage in-situ développé spécifiquement pour ce calorimètre. Des mesures de variation d'enthalpie et de capacité thermique massique à haute température ont été réalisées sur plusieurs matériaux solides (alumine, tungstène, graphite). L'enthalpie de fusion du cuivre pur a aussi été mesurée en effectuant des chutes à l'état solide et à l'état liquide et en déterminant la variation d'enthalpie liée à la congélation. Cette communication décrit la mise au point du calorimètre à chute à haute température et la procédure qui a été développée afin de mesurer des incréments d'enthalpie et d'en déduire la capacité thermique massique.

Develop 800V battery architecture to speed up electric vehicle charging : trade-off between charging infrastructure cost and time spent in station

Anastasia Popiolek^{1,*}, Zlatina Dimitrova², Marc Petit³, Philippe Dessante³

* ✉ : anastasia.popiolek@centralesupelec.fr

¹ GeePs - Stellantis

² Stellantis

³ GeePs

Mots clés : véhicules électriques, architecture batterie, vitesse de recharge, infrastructure de recharge, réduction du temps de trajet

Résumé :

Afin de répondre aux attentes de réduction d'émission de gaz à effet de serre, les constructeurs automobiles orientent leur production vers la voiture électrique rechargeable. Cependant, le temps de recharge des véhicules électriques (VEs) reste encore un frein à l'adoption de ceux-ci, notamment pour les trajets longue-distance et l'augmentation de la puissance de recharge (jusqu'à 350 kW) apparaît comme la solution permettant de réduire le temps de recharge à une quinzaine de minute pour une charge de 20 % à 80 % de capacité de batterie. En outre, tous les véhicules électriques ne peuvent se recharger à 350 kW car, pour obtenir une charge à cette puissance, il faut avoir une architecture batterie en 800V alors que la majorité des véhicules actuels ont une architecture en 400V (dont la puissance de charge maximale permise ne peut aller au delà de 150 kW). De plus, permettre la recharge à 350kW impose un coût plus important pour l'infrastructure de recharge par rapport à une recharge à 50 kW ou même à 150kW. Se pose alors la question du choix de l'architecture batterie (400 ou 800V) que les constructeurs automobiles devraient mettre en place pour leur future production. Une étude concrète a été réalisée sur l'autoroute française A6 Paris-Lyon pour évaluer l'impact de différent taux de pénétration de VEs avec une architecture batterie 800V sur le coût de l'infrastructure de recharge et sur la satisfaction des conducteurs de véhicules électriques (réduction du temps d'attente et de charge sur autoroute). L'étude s'appuie sur un outil de simulation prenant en entrée une flotte de véhicule ainsi qu'une infrastructure de recharge rapide sur autoroute et établissant sur une journée le comportement des véhicules électriques suivant leurs caractéristiques (niveau de batterie en entrée d'autoroute, puissance de recharge maximale permise par l'architecture batterie, etc.). L'intérêt de l'architecture batterie à 800V par rapport à l'architecture à 400V est ensuite discuté en fonction de la réduction de temps de trajet que permet ce type d'architecture en augmentant la vitesse de charge.

Analyse de sensibilités paramétriques par les méthodes Monte-Carlo

Nada Chems Mourtaday^{1,*}, Stéphane Blanco¹, Jean-Louis Dufresne², Mouna El Hafi³, Vincent Eymet⁴, Vincent Forest⁴, Richard Fournier¹, Paule Lapeyre⁵, Yaniss Nyffenegger-Péré⁶

* ✉ : nada-chems.mourtaday@univ-tlse3.fr

¹ Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE), UMR 5213 CNRS, Université Toulouse III, France

² LMD/IPSL, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Paris 75252, France

³ Laboratoire RAPSODEE, UMR CNRS 5302, Mines Albi, Campus Jarlard, 81013 Albi CT Cedex 09, France

⁴ MesoStar, Toulouse, France

⁵ WatLIT laboratory, Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, University of Waterloo

⁶ Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE), UMR 5213 CNRS

Mots clés : Monte-Carlo, sensibilités paramétriques, réchauffement climatique

Résumé :

Il est primordial de comprendre les mécanismes physiques du réchauffement climatique en vue d'apporter des solutions appropriées. Notre objectif est de caractériser son évolution par rapport à différents paramètres, ce qui consiste à calculer un forçage radiatif. Ce dernier est défini comme étant la variation dans le flux radiatif au sommet de l'atmosphère lorsqu'un seul paramètre du modèle est modifié, tout en gardant les autres paramètres fixes. Il est donc toujours défini par rapport à un paramètre du modèle et représente la sensibilité du réchauffement climatique à celui-ci. En l'occurrence, le paramètre qui nous intéresse particulièrement est la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Une réflexion sur les sensibilités par les méthodes Monte-Carlo a été initiée depuis près de 20 ans avec la thèse d'Amaury de Lataillade sur la sensibilité du taux de chauffage à la concentration des espèces dans une flamme de CH₄. Dans cette approche, la grandeur à estimer par Monte Carlo s'écrit sous une forme intégrale, et sa sensibilité à un paramètre est donnée par la dérivation de l'intégrale par rapport à ce paramètre. Il découle de cette dérivation un résultat important : les chemins statistiques sont identiques entre le calcul de la grandeur et le calcul de sa sensibilité, ce qui permet le calcul simultané d'une grandeur et de ses sensibilités à divers paramètres sans coût de calcul supplémentaire.

Pour traiter les difficultés de convergences lors d'un calcul de sensibilité par Monte Carlo, plusieurs méthodes de reformulations intégrales ont été développées au sein de l'équipe. On peut notamment citer les travaux de Paule Lapeyre qui propose un modèle de transfert radiatif pour la sensibilité, où l'on dérive l'équation de transfert radiatif de la grandeur et non l'intégrale de la grandeur.

Deux difficultés majeures dans la modélisation du transfert radiatif pour le calcul du flux radiatif au sommet de l'atmosphère concernent les hétérogénéités et les dépendances spectrales. La première difficulté a été levée par un algorithme de "collisions nulles", tandis que la deuxième a nécessité un modèle spectroscopique d'échantillonnage des transitions moléculaires (thèse en cours de Yaniss Nyffenegger dans la continuité des travaux initiés par Mathieu Galtier). Ainsi, il est aujourd'hui possible d'estimer un flux radiatif sur toute la Terre pendant une période d'un mois et sur tout le spectre infrarouge en seulement quelques minutes sur un ordinateur portable de 12 cœurs à 2.60GHz. De plus, ce calcul est insensible aux choix des domaines temporel, spatial et fréquentiel. Cela est dû au fait que la méthode Monte Carlo permet de gérer sans difficulté la complexité multiphysique et multidimensionnelle des questions à traiter. Étant donné les chemins statistiques identiques entre le flux radiatif et ses sensibilités, une conséquence majeure est la conservation de ces performances d'insensibilités aux échelles de complexité dans les calculs de sensibilités.

Etude des matériaux nanostructurés par SThM : microscopie à sonde locale

Nathaly Chaaoui¹, Maher Jandah¹, Rabih Maamary¹, Nathalie Trannoy¹

* ✉ : nathaly.chaaraoui@univ-reims.fr

¹ Université de Reims Champagne Ardenne, ITheMM

Mots clés : Microscopie thermique, sonde thermique, méthodes inverses

Résumé :

La nanotechnologie nécessite des techniques de caractérisation des nanosystèmes et des nanomatériaux. Depuis une vingtaine d'années, la nanotechnologie révèle de nouveaux besoins pour la compréhension et la gestion de la distribution de chaleur à l'échelle micro/nanométrique et dans les structures à l'échelle nanométrique. Le développement de nouveaux matériaux nécessite une connaissance avancée dans le domaine du transfert de chaleur à l'échelle nanométrique et des propriétés thermiques des matériaux nanostructurés. La microscopie thermique à balayage (SThM) basée sur la technique de microscopie à force atomique (AFM) est un outil visant à étudier les mécanismes de transfert de chaleur à l'échelle micro / nanométrique. L'objectif principal consiste en l'évaluation de la température et/ou les propriétés thermiques du matériau étudié à l'aide d'une sonde SThM possédant un élément thermorésistif à l'extrémité. Cette sonde thermique nous permet d'avoir accès simultanément à des images topographiques et thermiques avec une résolution spatiale micrométrique voire submicrométrique. Deux types de sondes thermorésistives ont été utilisés (micro-sonde en Wollaston et nano-sonde en Palladium) dans le but d'étudier l'influence de la structure de l'échantillon sur le signal thermique mesuré et d'évaluer l'effet du volume sondé sur les mesures de conductivité thermique. Pour cela, des échantillons composés de marches en silicium placées en dessous d'une couche de SiO₂ poli ont été spécifiquement fabriqués. En parallèle des modèles numériques modélisant le comportement thermique de chaque type de sondes utilisées ont été développés, afin de pouvoir déduire par la suite la conductivité thermique d'une zone scannée à partir de grandeurs physiques comme la température moyenne de la sonde et la puissance dissipée dans cette dernière en appliquant des méthodes inverses. Le modèle numérique de la sonde en Wollaston basé sur la méthode des éléments finis est réalisé à l'aide du COMSOL Multiphysics, tandis que celui de la nano-sonde en Palladium repose sur une méthode analytique et donc des fonctions de transfert. Les deux modèles ont été capables de reproduire des profils expérimentaux obtenus par SThM, d'estimer la sensibilité du signal thermique à la structure interne des échantillons étudiés et donc, en d'autres termes, d'évaluer la conductance thermique qui correspond au volume sondé et enfin estimer le temps de réponse de la sonde en fonction des variantes physiques et géométriques du système sonde/échantillon (modèle analytique).

Thème 2

Energétique

Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration	14
Etude d'une nouvelle configuration d'un moteur Ericsson à piston liquide libre	15
Etude d'un système de valorisation de l'énergie thermique des routes pour les besoins des bâtiments	16
Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale	17
Optimisation multicritère des performances exergetique, environnementale et économique d'un stockage thermique de type thermocline en fonction des taux de cut-off en charge et en décharge	18
Production thermique d'électricité et cycles thermodynamiques alternatifs	19
Etude expérimentale et numérique d'un Cycle de Rankine à fluide Organique (ORC) appliqué aux Réacteurs à Eau Pressurisés (REP)	20
Can flashback be avoided with humidification in an original micro Gas Turbine combustor? – 1D predeterminations and LES validation	21
Modélisation et analyse paramétrique d'une machine Stirling frigorifique	22
Analyse des performances de combustion de gaz synthétiques non-conventionnels dans une micro turbine à gaz	23
Etude théorique et expérimentale de l'utilisation de la biomasse solide comme source d'énergie renouvelable : le cas de la Roumanie	24

Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration

Luca Zanatta^{1,*}, Fabien Delaleux², Jean-Félix Durastanti²

* ✉ : luca.zanatta@u-pec.fr

¹ Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Rivières et du Cycle de l'Eau, Corbeil-Essonnes

² Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes, Université Paris-Est Créteil, Lieusaint

Mots clés : station d'épuration, optimisation énergétique, thermique, thermodynamique, cycle ORC, conversion d'énergie

Résumé :

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire CERTES et le SIARCE (syndicat des eaux ayant en charge les réseaux d'assainissement et des stations d'épuration en Essonne). Il s'inscrit dans le cadre d'un projet de Schéma Directeur Syndical des Energies Renouvelables et Ressources Réutilisables, qui permet de fixer les objectifs et les moyens de mise en œuvre de projets relatifs aux énergies renouvelables et à la récupération d'énergie.

L'objectif est de réaliser une analyse du potentiel de récupération énergétique des effluents en sortie de station d'épuration et de proposer des solutions de mise en œuvre. Deux sites sont étudiés : la STEP de Vert-le-Grand d'une taille de 3970 équivalents habitants et traitant une charge hydraulique de l'ordre de 1400 m³/jour et la STEP de Lardy-Janville d'une taille de 12680 EH et traitant une charge hydraulique de l'ordre de 2370 m³/jour.

La récupération de la chaleur des effluents en sortie de station a été considérée pour la STEP de Lardy-Janville, étant donné que le débit (70 m³/h en moyenne annuelle) et la température (entre 10°C et 20°C suivant la saison) sont suffisants mais l'impossibilité d'utiliser localement la chaleur ou de l'injecter dans un réseau urbain ont remis en cause cette solution.

L'idée originale de ce projet est alors de considérer cette ressource énergétique non pas comme une source chaude d'un procédé de production mais de l'envisager comme une source froide thermiquement très stable tout au long de l'année. L'option envisagée, objet de cette étude est donc la production d'électricité par un cycle thermodynamique de type ORC en utilisant un système à concentration solaire comme source chaude (rendu possible par la surface au sol disponible dans l'enceinte même des STEP) et d'utiliser les effluents de sortie comme source froide au condenseur de la boucle thermodynamique. Le principal avantage de cette solution est qu'elle utilise deux sources énergétiques gratuites et abondantes. Une pré-étude sur la STEP de Lardy-Janville a montré que pour un ensoleillement moyen de 400 W/m² sur une période allant de mars à septembre et une surface disponible d'environ 3500 m², la production d'électricité moyenne s'élèverait à plus 500 MWh, couvrant ainsi la totalité des besoins de la STEP sur la période donnée.

La suite du travail est de compléter cette pré-étude par une modélisation plus fine des performances et de la production attendue en prenant en compte la variabilité des sources chaude et froide, puis de dimensionner et d'installer un démonstrateur sur site qui intégrera des solutions d'optimisation comme un système de stockage thermique. L'objectif est de faire la preuve du concept à l'aide de ce prototype avant d'envisager un déploiement à plus grande échelle.

Etude d'une nouvelle configuration d'un moteur Ericsson à piston liquide libre

Ryma Chouder¹, Pascal Stouffs¹, Azzedine Benabdesselam²

* ✉ : pascal.stouffs@univ-pau.fr

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, LaTEP

² Laboratoire des Transports Polyphasiques et Milieux Poreux (LTPMP), FGPGM, USTHB

Mots clés : Moteur Ericsson, moteur à piston libre, piston liquide

Résumé :

Les 'moteurs à air chaud' sont définis comme des moteurs alternatifs à apport de chaleur externe, à cylindres de compression et de détente distincts, avec ou sans échangeur récupérateur ou régénérateur, et à fluide de travail monophasique gazeux. On distingue deux familles de 'moteurs à air chaud', celle des moteurs Stirling, qui n'ont ni soupapes ni clapets, et celle des moteurs Ericsson, qui possèdent des organes d'isolement autour des cylindres.

Par ailleurs, les technologies à piston liquide sont reconnues comme simples, fiables et peu coûteuses. Cependant jusqu'ici, les seuls 'moteurs à air chaud' à piston liquide à avoir été réalisés sont les moteurs Stirling de type Fluidyne, inventés en 1983, et connus pour leur faible rendement.

Les moteurs à piston liquide sont particulièrement intéressants dès lors que le piston liquide est 'libre', c'est-à-dire que sa position instantanée n'est fixée par aucun mécanisme cinématique, mais uniquement par le bilan des forces qui s'appliquent sur lui.

Une nouvelle configuration de moteur Ericsson à piston liquide libre est présentée. Celle-ci est constituée d'un tube en U rempli d'eau dans sa partie inférieure, et dont les deux branches sont fermées par des culasses munies de soupapes. L'espace situé entre la surface du liquide et la culasse d'une des branches constitue l'espace de compression, tandis que ce même espace constitue l'espace de détente dans l'autre branche. La configuration étudiée fonctionne en cycle ouvert, l'air atmosphérique entre dans l'espace de compression, est comprimé par le piston liquide, puis refoulé vers un échangeur récupérateur et un échangeur réchauffeur (source chaude du cycle) avant d'être introduit dans l'espace de détente. L'air chaud détendu par la descente du piston liquide est ensuite refoulé vers l'autre branche de l'échangeur récupérateur, lors de la remontée du piston liquide. L'extraction d'énergie utile peut se faire par le biais d'un alternateur linéaire lié à la position du piston liquide. Une autre configuration est proposée, dans laquelle seule une partie du débit massique d'air refoulé par l'espace de compression est introduite dans l'espace de détente, le débit massique introduit étant tel que le travail de détente compense exactement le travail de compression. Dans cette configuration, le piston liquide et les espaces de compression et de détente qu'il délimite s'apparente à un 'générateur de gaz à piston libre', comme le générateur de gaz du moteur PESCARA. Le débit massique d'air comprimé non admis dans l'espace de détente peut être utilisé comme tel, à la sortie de l'espace de compression, le système étant alors un compresseur thermique, soit être prélevé après passage dans les échangeurs récupérateur et réchauffeur et être détendu dans une machine fonctionnant en parallèle de l'espace de détente du piston liquide, si l'objectif est de produire de l'énergie mécanique.

Une modélisation « intracycle », permettant de déterminer les valeurs instantanées des grandeurs thermodynamiques de ce type de système, montre qu'il est possible de déterminer un jeu de paramètres de dimensionnement et de conduite du système permettant un fonctionnement stable, et dont les performances énergétiques sont intéressantes.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-052>

Etude d'un système de valorisation de l'énergie thermique des routes pour les besoins des bâtiments

Prince Sevi¹, Benoit Stutz¹, Frédéric Bernardin², Alexandre Cuer²

* ✉ : febron.sevi@univ-smb.fr

¹ LOCIE, USMB, 73376 Cedex, Boulevard du Lac, CNRS UMR 5271

² Cerema, Equipe-Projet STI, 8-10, Rue Bernard Palissy, CEDEX 2, F-63017 Clermont-Ferrand

Mots clés : Echangeur thermique routier ; stockage thermique ; Pompe à Chaleur ; bâtiment

Résumé :

En France, le réseau routier peut constituer un capteur d'énergie solaire très important. Le seul réseau national pourrait capter une énergie solaire d'environ 196 TWh par an. On voit dès lors le rôle important que peuvent jouer les infrastructures routières dans la transition énergétique. Cette énergie peut par exemple, être mise au profit du secteur du bâtiment qui représente près de 43 % de la consommation totale d'énergie utile en France. Pour mieux exploiter ce potentiel énergétique des routes, plusieurs projets de routes récupératrices d'énergies ont vu le jour dont le projet Dromotherm (<http://www.dromotherm.com>) sur lequel porte cette présente étude, financé par la Région Auvergne-Rhône-Alpes dans le cadre du pack Ambition Recherche 2020-2025. Ce projet vise à récupérer l'énergie solaire thermique des chaussées (via une circulation d'eau dans une couche d'enrobé drainante comprise entre deux couches d'enrobé étanches) ; la stocker à la base des bâtiments dans une cuve isolée en béton, remplie de sable saturé en eau et de tubes géothermiques pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments.

Nos premières études d'un tel dispositif ont consisté à modéliser les différents phénomènes de transferts thermiques qui ont lieu tels que la conduction, la convection et le rayonnement thermique pour développer un modèle global de simulation afin d'étudier son comportement énergétique dynamique sur une année type. Il ressort de nos simulations qu'avec un tel dispositif, environ 8 à 20 % de l'énergie solaire qui arrive sur la surface de la chaussée est transmise au fluide caloporteur (de l'eau) circulant dans la chaussée. Cette énergie récupérée et stockée à long terme (inter saisonnier) est prélevée en hiver via la mise en œuvre d'une pompe à chaleur pour le chauffage d'un bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire pour ses occupants. . Différentes stratégies de pilotage ont été étudiées en vue de limiter les consommations des systèmes annexes et maximiser l'efficacité du système.

Modélisation du bilan thermique d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Monte Carlo et validation expérimentale

Thomas Villemin¹, Olivier Farges¹, Gilles Parent¹, Rémy Claverie², Julien Bouyer²

* ✉ : thomas.villemin@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine, LEMTA UMR 7563

² Cerema, Équipe de Recherche TEAM, 71 rue de la grande haie, 54510 Tomblaine, France

Mots clés : Méthode de Monte Carlo, Photovoltaïque, Conduction, Rayonnement, Convection

Résumé :

Le déploiement de panneaux photovoltaïques s'est fortement accéléré ces dernières années et, d'après les projections en France et en Europe, ils occuperont une place importante dans les futurs mix énergétiques. Ce développement est lié à l'abaissement du prix au kilowattheure et aux améliorations croissantes des rendements électriques des technologies photovoltaïques.

Cependant, la dépendance de la production électrique aux conditions de fonctionnement des panneaux photovoltaïques reste un sujet de recherche très actif. Par exemple, l'impact négatif de l'augmentation de la température des cellules sur la performance électrique du panneau est un phénomène bien connu. Cette température est le résultat des échanges thermiques entre le panneau et son environnement. Les industriels valident le comportement électrique de leurs modules dans les conditions STC (Standard Test Conditions) alors qu'elles ne sont, la plupart du temps, pas représentatives du point de fonctionnement de ces systèmes en situation réelle. Plusieurs travaux ont été menés dans la littérature afin de simuler le bilan thermique d'un panneau. Deux difficultés principales apparaissent : la variabilité temporelle des paramètres climatiques (e.g. rayonnement solaire, vitesse du vent) et la complexité géométrique du panneau et de son environnement (e.g. ombrages).

Dans ce travail, une résolution de ce bilan thermique par la méthode de Monte Carlo est proposée afin d'intégrer temporellement les paramètres climatiques. Cette méthode a déjà fait ses preuves sur la gestion des géométries complexes et les phénomènes transitoires tels que l'énergie solaire. Afin de valider le modèle, une campagne de tests à température d'air contrôlée a été réalisée au Cerema à Nancy afin d'obtenir des données sur le fonctionnement électrique et thermique d'un panneau photovoltaïque de 310 W. De plus, le modèle est confronté à des données obtenues en conditions réelles sur une plateforme expérimentale également située au Cerema. Les résultats démontrent la capacité de la méthode de Monte Carlo à simuler la température d'un panneau photovoltaïque en régime transitoire.

Optimisation multicritère des performances exergetique, environnementale et économique d'un stockage thermique de type thermocline en fonction des taux de cut-off en charge et en décharge

Diane Le Roux^{1,*}, Pierre Neveu², Régis Olivès¹

* ✉ : diane.leroux@promes.cnrs.fr

¹ PROMES - CNRS (UPR 8521) - UPVD

² Université de Perpignan Via Domitia (UPVD)

Mots clés : Stockage sensible de la chaleur, thermocline, chaleur fatale, analyse du cycle de vie, coût actualisé de l'énergie, exergetie, taux de cut-off, optimisation multi-objectif

Résumé :

Récemment, les stockages thermiques de type thermocline ont été considérés comme une alternative prometteuse au stockage de la chaleur, notamment pour valoriser les chaleurs fatales. Dans un tel stockage sensible, un fluide caloporteur circule à travers un lit de solides de garnissage. Pendant la phase de charge, le fluide chaud est injecté par le haut du réservoir, transmet sa chaleur aux solides et est extrait froid par le bas. Trois zones distinctes apparaissent : deux à températures quasi-uniformes (l'une chaude et l'autre froide) séparées par une zone à fort gradient, appelée thermocline. Durant la décharge, le sens d'écoulement du fluide est inversé. Les périodes de charge et de décharge sont stoppées lorsque le fluide extrait atteint une température seuil. Ces températures de cut-off correspondent à un compromis entre la capacité énergétique du stockage et les niveaux acceptables des températures de sortie pour les procédés amont et aval. $T_{cutoff_{ch}} = T_L + x.(T_H - T_L)$, $T_{cutoff_{dech}} = T_H - x.(T_H - T_L)$, où T_H et T_L sont les températures opérationnelles du stockage, et x le pourcentage de cut-off ($0 < x < 1$).

Le stockage thermocline considéré est une unité industrielle à haute température (Eco-Stock®), développée et commercialisée par Eco-Tech Ceram. Il fonctionne avec un lit air/bauxite. L'objectif de cette étude est d'optimiser ce système sur trois critères - efficacité exergetique, impacts environnementaux, coût actualisé de l'énergie (Levelized Cost Of Energy, LCOE) - selon différents taux de cut-off (entre 20 et 90 % en charge et décharge). Pour décrire le comportement thermique du réservoir, six paramètres de conception, définis par le cahier des charges, et deux variables d'optimisation adimensionnelles sont utilisés. Ces dernières sont liées à la géométrie du réservoir et la granulométrie des particules. Un modèle dynamique à une dimension et deux équations, une pour le fluide et une pour le solide, est choisi. Pour évaluer les impacts environnementaux, une Analyse du Cycle de Vie est réalisée sur la cuve Eco-Stock® dont l'unité fonctionnelle est définie par : « Restituer une exergetie égale à celle de la cuve de référence, pendant sa durée de vie (25 ans) en considérant un cycle par jour et 15 jours de repos par an ». Une analyse des coûts du cycle de vie permet de déterminer différents indicateurs économiques, comme la Valeur Actualisée Nette (VAN), qui est la somme des flux financiers ramenés à la valeur qu'ils auraient potentiellement en début de projet. Le LCOE correspond au prix de vente de l'énergie qui annule la VAN. Les optimisations exergetiques présentent une cuve très effilée et un faible diamètre de particules, alors que les optimisations environnementales et économiques conduisent à des cuves trapues avec des diamètres de particules supérieurs au centimètre. Lorsque les taux de cut-off augmentent, les géométries de cuve restent similaires. La seule différence concerne les diamètres de particules qui restent faibles pour l'optimisation exergetique mais augmentent sensiblement pour l'optimisation environnementale. Quel que soit le taux de cut-off, l'optimisation économique est choisie comme solution multicritère, à l'aide de la méthode TOPSIS. L'efficacité exergetique est réduite lorsque le taux de cut-off augmente, alors que les impacts environnementaux et le LCOE diminuent.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-021>

Production thermique d'électricité et cycles thermodynamiques alternatifs

Michel Moliere¹, Romain Privat¹, Jean-Noël Jaubert¹, Frédéric Geiger²

* ✉ : moliere.michel.90@gmail.com

¹ Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

² Université de Franche-Comté

Mots clés : cycle de Brayton ; turbine à combustion, sCO₂, cycle d'Allam

Résumé :

Les turbines à gaz (ou "à combustion") actuelles opèrent selon des cycles de Brayton ouverts dans lesquels le fluide moteur est constitué par de l'air et par les produits de combustion. Durant les dernières décennies, cette technologie a réalisé des progrès remarquables et a produit de nouvelles générations de machines dont les rendements ont franchi la barre des 60 % en cycle combiné et dont les émissions de NO_x au gaz naturel ont pu être plafonnées à 25 parties par million. En outre, ces turbines sont capables de brûler un large éventail de combustibles et tout particulièrement de l'hydrogène dilué ou pur ainsi que des biocombustibles gazeux (biogaz) et liquides (éthanol, biodiesel...).

A l'échelle mondiale, ces progrès ont permis de réduire l'empreinte CO₂ des parcs de centrales électriques car de nombreuses chaudières au charbon ont été remplacées par ces générations de turbines qui ont des rendements sensiblement supérieurs et émettent nettement moins de CO₂.

Cependant, les énergies fossiles font face à présent à un « défi existentiel » en raison des menaces de plus en plus lourdes que les gaz à effet de serre font peser sur le climat. De ce fait, le secteur de la production électrique entame de profonds changements dans le cadre d'une transition énergétique accélérée qui se traduira notamment par le développement rapide des énergies renouvelables, le déploiement de modes de production d'électricité décentralisés et l'évolution des réseaux électriques, actuellement du type vertical (de producteur à consommateur) vers des réseaux intelligents.

Toutefois, la production thermique restera nécessaire pour deux raisons principales :

- l'électrification rapide des économies et notamment du transport qui va créer des appels de puissance électrique sans précédents
- le besoin de pallier le caractère intermittent des renouvelables et d'assurer la stabilité des réseaux avec, en premier lieu, la régulation de leur fréquence.

Mais ceci ne dispensera pas le segment de production thermique d'opérer des mutations vitales qui imposeront de nouveaux gains accrus de rendement et une réduction drastique des émissions de CO₂ par capture et séquestration. Dans ce contexte difficile qui pèse sur le futur de la production thermique, certains cycles thermodynamiques alternatifs ont cependant des points forts en termes d'efficacité énergétique et de sobriété carbone. En particulier, les cycles de Brayton semi-ouverts qui, tels le cycle d'Allam, font appel à l'oxy-combustion, sont capables de fournir des centrales à « capture inhérente » du CO₂ et les cycles fermés basés sur du CO₂ supercritique (« sCO₂ ») ont de forts potentiels de rendement dans le cadre de la récupération de flux de chaleur secondaires.

Cet article résumera l'évolution récente des cycles de Brayton à l'air et présentera ensuite les atouts des cycles de Brayton alternatifs du type oxyfuel et sCO₂.

Etude expérimentale et numérique d'un Cycle de Rankine à fluide Organique (ORC) appliqué aux Réacteurs à Eau Pressurisés (REP)

Guillaume Lhermet^{1,*}, Nicolas Tauveron¹, Nadia Caney¹, Franck Morin²

* ✉ : guillaume.lhermet@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France, CEA, LITEN, F-38054, Grenoble, France

² CEA, DES, DER, SESI, F-13108 Saint Paul Lez Durance, France

Mots clés : Cycle Organique de Rankine, ORC, Échangeur immergé, Valorisation chaleur fatale, Puissance résiduelle, Sûreté nucléaire, Réacteur à eau pressurisé, REP

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la mise au point de systèmes passifs dans l'architecture de systèmes de sauvegarde de réacteurs à eau pressurisés (REP) avancés.

Lors de l'arrêt de la réaction nucléaire au sein du cœur du réacteur, les produits de fission présents dans le cœur continuent de produire de la chaleur : il s'agit de la puissance résiduelle du cœur du réacteur. Ainsi un système existant consiste à venir utiliser une grande quantité d'eau placée en hauteur, qui par convection naturelle, va permettre d'évacuer cette chaleur résiduelle : on parle de condenseurs passifs de sûreté. On dispose ainsi de volumes d'eau très importants qui s'échauffent jusqu'à ébullition et pendant une durée relativement longue.

L'idée motrice est donc d'utiliser une partie de l'énergie stockée dans ce volume d'eau bouillante pour servir de source chaude à un cycle thermodynamique au travers d'un échangeur de chaleur immergé. La puissance produite par le cycle permettra d'alimenter en électricité et de façon autonome divers organes utiles au fonctionnement, en complément de moyens existants.

Cette problématique rejoint un enjeu majeur de l'efficacité énergétique : celui de la valorisation de la chaleur fatale industrielle ou renouvelable (biomasse, solaire, géothermale) à faible et moyenne température (<150°C) en électricité. Une solution existante pour exploiter cette chaleur est l'utilisation d'un cycle de Rankine à fluide organique (ORC), système mis en œuvre tant à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle industrielle depuis une dizaine d'années.

Deux singularités liées au contexte de ce travail résident dans la nature de la source chaude et dans l'exigence de fiabilité et de robustesse de ce système ; ces deux difficultés majeures s'ajoutent aux contraintes habituellement demandées à ce type de cycle : maximisation de la performance énergétique, respect de l'environnement et minimisation de l'encombrement.

Les premiers résultats de cette étude portent sur l'élaboration d'un modèle thermodynamique de l'ORC réalisé avec le logiciel EES (Engineering Equation Solver). Ce modèle a permis notamment de mesurer l'impact du fluide de travail sur les performances ainsi que sur les dimensions de l'ORC. Une grande variété de fluides de travail a pu être comparée : HFC – HFE – HFO – HC ...

Parallèlement à ces travaux théoriques, une série d'essais expérimentaux a été réalisée pour mesurer l'impact des conditions externes sur les performances de l'ORC. On peut notamment citer la variation de la température de la source froide. Ces résultats expérimentaux, ajoutés à des essais paramétriques (débit fluide de travail, débit source ...) sont utilisés pour évaluer la robustesse et la fiabilité de notre système.

L'ensemble de ces résultats expérimentaux est ensuite utilisé pour valider le modèle théorique de l'ORC (condenseur – évaporateur – turbine).

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-030>

Can flashback be avoided with humidification in an original micro Gas Turbine combustor ? – 1D predeterminations and LES validation

Alessio Pappa^{1,*}, Laurent Bricteux¹, Ward De Paepe¹

* ✉ : alessio.pappa@umons.ac.be

¹ Université de Mons

Mots clés : Micro Gas Turbine, Combustion, Hydrogen, Humidification, Large Eddy Simulation

Résumé :

The high temperatures and reaction rates reached during hydrogen (or hydrogen enriched methane) combustion is well known to lead to flame and combustion instabilities, with increased emissions and potential flashback as result. Air humidification, typically applied to the micro Gas Turbines (mGTs) to increase electric efficiency by recovering additional waste heat from the flue gases, is proven to lead to reduced reaction rates and temperatures in classical mGT combustors fired with classical fossil fuels. However, these were mainly considered before as negative side effects. Using these effects to stabilize hydrogen combustion in mGTs without having to redesign the combustor is a promising, but still to explore route. Hence, this work presents a feasibility study on the use of combustion air dilution using combustion air humidification to reduce temperature and flame speed of hydrogen combustion in a typical mGT combustion chamber (Turbec T100) using a combined 1D-3D approach. First, the 1D laminar flame benchmarking allows a predetermination of the necessary minimal water dilution of the combustion air to avoid flashback for several H₂/CH₄ blends (25/75, 50/50, 75/25 and 100/0 %) at reduced cost. The predefined operating conditions are then tested and validated using high fidelity 3D Large Eddy Simulations of the actual combustor geometry of the T100 mGT. The 1D simulation results show that the combustion, at nominal operating conditions of the T100 (air mass flow rate of 800g/s, and a fuel consumption of 333kW, fuelled with different H₂/CH₄ blends) can indeed reach the same level of flame speed as pure methane combustion by humidifying the combustion air (using a water-to-air ratio of 3, 7, 12 and 23 % respectively). Finally, the 3D simulation results show stable combustion for these predetermined levels of humidification. Similar temperature and reaction rate levels to those of pure methane combustion are reached in the combustor. Hence we can conclude that this dilution method allows to stabilize H₂ combustion, and the 1D approach provides accurate and low cost predetermination of the operating parameter to avoid flashback apparition.

Modélisation et analyse paramétrique d'une machine Stirling frigorifique

Florian Tarby¹, Sylvie Begot¹, François Lanzetta¹, Steve Djetel-Gothe¹

* ✉ : sylvie.begot@univ-fcomte.fr

¹ FEMTO-ST

Mots clés : Machine frigorifique ; Stirling ; Modélisation

Résumé :

De nos jours la production de froid à température modérée est largement dominée par les machines à compression de vapeur utilisant des fluides de travail impactant le réchauffement climatique. Les machines Stirling, déjà utilisées en cryogénie, pourraient être une alternative pour cette application dans le domaine frigorifique.

Dans ce but, nous travaillons sur une machine Stirling de type Beta.

Nous avons modélisé cette machine à l'aide d'un modèle monodimensionnel développé dans le logiciel SAGE. Les composants du modèle sont un piston, un déplaceur, un échangeur chaud, un échangeur froid, un régénérateur, ainsi que les volumes de compression, détente et volume de rebond. Les différents composants sont reliés par des débits de gaz de travail et des flux thermiques. Pour le gaz de travail, les équations résolues dans le modèle sont les équations de conservation de la masse, de la quantité mouvement et de l'énergie ainsi que l'équation d'état du gaz. Le régime est harmonique. Des corrélations empiriques sont utilisées pour déterminer les coefficients d'échange thermique et de pertes de charge.

Le modèle a été validé grâce aux résultats expérimentaux obtenus à l'aide du prototype FEMTO-60 développé au laboratoire. Il s'agit d'une machine de type Beta, de puissance frigorifique de l'ordre de 450 W à 5°C fonctionnant à l'azote comme gaz de travail, sous une pression de 15 à 20 bar, à une fréquence de rotation de 5 à 13 Hz. Le diamètre du piston est de 60 mm, le volume balayé est de 120 cm³. Le régénérateur est constitué de grilles métalliques.

Une analyse de sensibilité a ensuite été conduite en faisant varier les paramètres opérationnels et les paramètres géométriques de la machine. Pour les paramètres opérationnels, les effets du changement de gaz de travail, de pression, de fréquence de rotation ont été évalués. Pour les paramètres géométriques, les effets de la longueur du régénérateur, de sa porosité, des diamètres du piston et du déplaceur ainsi que le nombre et longueur des canaux des échangeurs ont été évalués. Grâce aux résultats de cette étude, une nouvelle conception de machine a été proposée sur le plan théorique. Elle permet d'augmenter la valeur de la puissance froide produite et du COP.

Analyse des performances de combustion de gaz synthétiques non-conventionnels dans une micro turbine à gaz

Jeremy Bompas^{1,*}

* ✉ : jeremy.bompas@umons.ac.be

¹ UMONS

Mots clés : micro turbine à gaz, syngaz, CFD, émission

Résumé :

La disponibilité limitée des combustibles fossiles conventionnels comme le gaz naturel a renforcé l'intérêt de la diversification des sources d'énergie afin d'assurer des ressources durables suffisantes à la demande combinée en chaleur et en électricité. Les ressources renouvelables non-conventionnelles que sont les biogaz, les syngaz and les biocarburants sont de bons postulants à ces objectifs de diversification énergétique, particulièrement dans un contexte de production décentralisée telle que l'utilisation de micro turbines à gaz dans une application de cogénération de faible puissance. De plus, ils présentent l'avantage majeur de réduire les émissions de CO₂ afin d'atteindre les objectifs climatiques à l'horizon 2050. Cependant, dus à leurs propriétés spécifiques telles leur pouvoir calorifique inférieur, leur composition variable ainsi que leur fraction de vapeur d'eau importante quand ils ne sont pas correctement post-traités, une meilleure caractérisation des sources d'énergies renouvelables non-conventionnelles est requise.

L'objectif de ce travail est donc d'identifier le comportement de plusieurs syngaz dans une chambre de combustion industrielle, spécifiquement conçue pour le gaz naturel. Dans ce travail, l'analyse des résultats de simulations numériques d'une chambre de combustion alimentée au syngaz est présentée. Les performances de la chambre de combustion est analysée pour différentes compositions de syngaz avec injection progressive de vapeur d'eau dans le but de déterminer la teneur maximale admissible en vapeur et limiter le post-traitement dans la production des gaz synthétiques. L'allumage et la stabilité de flamme ont été particulièrement étudiés avec une distribution de gaz variée entre la flamme pilote et la flamme principale. Les résultats montrent le champ de température, les prédictions précises des espèces de réactions intermédiaires et des NO_x, CO, CO₂ et H₂O dans les fumées, qui sont de même nature que les précédentes observations. Plus spécifiquement, il a été trouvé que le NO_x sont particulièrement sensibles aux modifications de distribution de combustible entre la flamme pilote et la flamme principale. Ces résultats obtenus pourront servir de références pour la caractérisation future de gaz synthétiques bruts dans une large gamme de conditions d'utilisation, ce qui permettra d'exploiter entièrement leur potentiel dans des applications de cogénération de faible puissance.

Etude théorique et expérimentale de l'utilisation de la biomasse solide comme source d'énergie renouvelable : le cas de la Roumanie

Stefan-Dominic Voronca¹, Monica Siroux¹, George Darie²

* ✉ : monica.siroux@insa-strasbourg.fr

¹ INSA STRASBOURG ICUBE

² Université Politehnica de Bucharest

Mots clés : biomasse, énergie renouvelable, puissance calorifique, humidité, coût

Résumé :

La biomasse est une source d'énergie neutre en gaz à effet de serre . Lorsqu'il est brûlé, le carbone de la biomasse ne réagit qu'avec l'oxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone, qui est libéré dans l'atmosphère, la quantité de CO₂ produite étant égale à celle qui a été absorbée lors de la phase de croissance. L'opérateur économique peut déclarer ou estimer la quantité utilisée ou déclarer la chaleur qu'il en tire. La biomasse solide (principalement le bois de chauffage utilisé pour la cuisson dans les pays en développement) est de loin la source d'énergie renouvelable la plus importante, représentant plus de 10 % de l'approvisionnement mondial total en énergie primaire (ATEP), soit les trois quarts de l'approvisionnement mondial en sources renouvelables. L'article présente une étude théorique et expérimentale de plusieurs types de biomasse : déchets forestiers, granulés de sapin, briquettes de chêne, sciure de hêtre, granulés de hêtre, briquettes de hêtre. Six combustibles disponibles chez les fournisseurs ont été analysés en termes de pouvoir calorifique supérieur. Plusieurs caractéristiques sont prises en compte dans le cadre de cette étude : l'influence de l'humidité, le coût, la complexité de l'équipement nécessaire sur place pour transporter et brûler le combustible, la disponibilité du combustible, les problèmes associés au stockage du combustible, les émissions causées par la combustion, le succès historique de la technologie des chaudières utilisant ce combustible. Une option intéressante à considérer est celle des résidus de biomasse provenant d'activités industrielles, telles que les usines de bois et de meubles. Les déchets de bois peuvent résulter de diverses circonstances industrielles et commerciales et sont rarement commercialisés et utilisés sur le lieu de production. Des calculs économiques décrivant la rentabilité d'un investissement dans une nouvelle centrale de chauffage utilisant de la biomasse solide sont développés. Pour chaque essence de bois, la projection du cash-flow est réalisée. Les résultats montrent des performances financières attrayantes.

Thème 3

Modes de transfert

Influence du rapport de forme sur la convection naturelle de double diffusion dans un mélange gazeux non-gris	26
Etude expérimentale des instationarités au sein d'un écoulement de convection naturelle dans une cavité cubique comprenant un obstacle partiellement chauffé	27
Caractérisation expérimentale des transferts de chaleur dans un canal d'eau avec changement de phase	28
Etude CFD de l'impact des conditions d'injection pour un stockage thermocline en eau	29
Hétérogénéité des modes de transferts convectifs au sein des centrales solaires photovoltaïques	30
Contribution à l'étude expérimentale et numérique de l'écoulement d'air dans une fenêtre pariéto-dynamique chauffante	31
Cavity size influence on Rayleigh-Bénard convection under the effect of wall and gas radiation	32
Caractérisation des cinétiques de cristallisation du poly(éther éther cétone) (PEEK) par mesure de la chaleur spécifique en calorimétrie différentielle à balayage rapide	33
Modélisation de la cinétique de cristallisation d'un matériau à changement de phase dopé en conductivité par méthode inverse	34
Premiers résultats d'échauffement et d'usure d'un banc représentatif du contact électrique glissant caténaire-pantographe	35
Formulation et caractérisation thermophysique et mécanique d'un mortier renforcé par des fibres naturelles végétales de Posidonia-Oceanica et animales de Plumes de Poulet	36
Convection naturelle en cavités scalène différentiellement chauffée : application au refroidissement des panneaux solaires photovoltaïques.	37
Lattice Boltzmann Method investigations of natural convection heat transfer instabilities in a rectangular cavity heated from below	38
A genetic algorithm-based topology optimization method for convective cooling of a heating surface with multiple-peak heat flux	39
Modelling of coupled Heat transfer - Application to Porous media at high temperatures	40
Analyse théorique des échanges convectifs forcés en conduites chauffées : application aux thermosiphons hydrauliques et aux échangeurs diphasiques	41

Influence du rapport de forme sur la convection naturelle de double diffusion dans un mélange gazeux non-gris

Siham Laouar-Meftah^{1,*}, Denis Lemonnier², Amina Laouti¹

* ✉ : s.laouar@univ-boumerdes.dz

¹ M'Hamed Bougara University, Faculty of Hydrocarbons and Chemistry

² Institut Pprime, CNRS, ENSMA, University of Poitiers

Mots clés : Rayonnement volumique, mélange non-gris, convection naturelle, transfert de masse, modèle SLW

Résumé :

Dans ce travail, nous procédons à l'analyse de l'influence du rapport de forme de la géométrie sur la convection naturelle de double diffusion, dans un mélange gazeux non-gris air-H₂O (à 13 % H₂O en moyenne). Le modèle physique considéré est une cavité rectangulaire (de hauteur H et largeur L) soumise à des gradients horizontaux de température et de concentration. Les conditions aux frontières thermique et massique de type Dirichelet (température et concentration constantes) sont placées sur les parois verticales noires, de façon à créer un écoulement aidant (forces thermique et massique qui coopèrent). Les parois horizontales, quant à elles, sont adiabatiques, imperméables et parfaitement réfléchissantes. Ici, l'écoulement est supposé laminaire, stationnaire et bidimensionnel et la variation de la masse volumique soumise à l'approximation de Boussinesq. Les équations régissant la dynamique du fluide et les transferts de chaleur et de masse, formulées en terme de vorticité - fonction de courant, sont résolues par la méthode des différences finies selon un schéma ADI. L'équation du transfert radiatif (ETR) est résolue par la méthode des ordonnées discrètes et la dépendance spectrale de l'absorption du milieu est prise en compte par le modèle de gaz SLW (Spectral Line-Based Weighted-sum-of-gray-gases) de Denison et Webb. La cavité est discrétisée suivant une grille variable avec une loi de distribution des points en tangente hyperbolique. Les résultats obtenus, sous forme de champs de température, de concentration, de lignes de courant, de nombres de Nusselt et de Sherwood moyens sont discutés dans différentes situations correspondant à une cavité de largeur L= 0.1m et 0.3m, un rapport de forme Ar = 0.5, 1 et 2 et un régime d'écoulement d'origine thermique. Les effets du rayonnement volumique sont déterminés par comparaison avec le cas de la convection naturelle de double diffusion dans un fluide transparent ayant les mêmes caractéristiques que le mélange air-H₂O mais de coefficient d'absorption nul.

Etude expérimentale des instationarités au sein d'un écoulement de convection naturelle dans une cavité cubique comprenant un obstacle partiellement chauffé

Alexandre Weppe¹, Florian Moreau^{1,*}, Didier Saury¹

* ✉ : florian.moreau@ensma.fr

¹ Institut Pprime

Mots clés : Convection naturelle, Etude expérimentale, Instabilités

Résumé :

Les écoulements soumis à des effets de flottabilité prépondérants sont observés dans de nombreux secteurs industriels, tels que le nucléaire ou encore l'automobile. On peut par exemple citer la problématique du refroidissement d'un compartiment moteur qui est un point essentiel dans le dimensionnement d'un véhicule. Suite à un arrêt brutal du moteur après une forte sollicitation, l'intégrité du moteur doit être préservée alors même qu'il n'est plus refroidi par un écoulement externe forcé. Pour de telles situations, la convection naturelle, souvent en régime turbulent, doit permettre d'assurer le refroidissement (cas dimensionnant).

Le projet ANR MONACO_2025, au sein duquel s'inscrit cette étude expérimentale, a pour ambition de résoudre les problèmes rencontrés par les partenaires industriels lors de simulations d'écoulements turbulents avec effets de flottabilité dominants en espace confiné ainsi que d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques observés pour ce type d'écoulement. En effet, à ce jour, les modèles RANS développés et compatibles avec des temps de calculs adaptés à un contexte industriel ne rendent pas compte avec une précision suffisante des interactions entre la turbulence et les effets de flottabilité et par conséquent les transferts sont souvent mal quantifiés.

Une configuration de référence est définie, permettant d'étudier un écoulement d'air en espace confiné représentatif des régimes rencontrés dans le domaine automobile. Le compartiment moteur a été simplifié en une cavité cubique comportant en son sein un obstacle cubique partiellement chauffé sur l'une de ses faces verticales. Cet obstacle occupe plus de 50 % du volume interne disponible.

Pour cette étude, un écoulement caractérisé par un nombre de Rayleigh basé sur la hauteur du bloc chauffant $Ra_H = 1,37(0,1) \times 10^9$ est étudié. Pour obtenir cet écoulement, un obstacle cubique de dimension $H^3 = (0,8m)^3$ est placé au centre d'une cavité cubique de dimensions supérieures $L^3 = (1m)^3$. Cet obstacle est exclusivement chauffé sur l'une de ses faces verticales à une température T_c tandis que deux parois verticales et opposées de la grande cavité le contenant sont maintenues à une température $T_f (= T_{amb})$. Une des parois à T_f de la grande cavité est alors en vis-à-vis de la face de l'obstacle à T_c de sorte que l'on obtient une différence de température $\Delta T = T_c - T_f (= 32,5C)$ dans le canal chauffé. Les parois verticales avant et arrière ainsi que les parois horizontales haute et basse de la grande cavité sont adiabatiques. Les champs de vitesses sont obtenus par Vélocimétrie par Images de Particules (PIV). Ils mettent en évidence, l'émergence d'une instabilité de couche limite le long de la paroi chaude. La fréquence de cette instabilité est comparée aux résultats théoriques obtenus pour une instabilité de couche limite de convection naturelle sur plaque plane verticale isotherme. Enfin, lorsque l'écoulement issu de cette couche limite atteint le bord haut de l'obstacle un jet battant chaud est observé. La dynamique de ce dernier est analysée.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-012>

Caractérisation expérimentale des transferts de chaleur dans un canal d'eau avec changement de phase

Philippe Reulet^{1,*}, Baptiste Dejean¹, Pierre Berthoumieu¹, Davide Zuzio¹

* ✉ : philippe.reulet@onera.fr

¹ ONERA/DMPE Université de Toulouse

Mots clés : Canal liquide, Vaporisation, Visualisation, Coefficient d'échange thermique, Méthode inverse

Résumé :

Dans cet article, nous présentons une étude expérimentale réalisée dans le cadre d'un projet de recherche interne ONERA et traitant de l'analyse d'un écoulement liquide dans un canal de section rectangulaire contenant une forêt de picots, soumis à un fort flux de chaleur permettant la vaporisation d'une partie du liquide. L'objectif du projet est la meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu dans ce type de configuration et de la création d'une base de données expérimentale pour valider les simulations numériques associées.

Une maquette de canal chauffé avec picots a été réalisée. Le canal de section est alimenté en amont par un débit d'eau contrôlé, à température ambiante. La paroi basse du canal est chauffée à l'aide de 31 cartouches chauffantes alimentées par deux boîtiers électriques permettant de régler la puissance fournie entre 0 et 100 % de la puissance maximale. La paroi supérieure est percée par un hublot permettant la visualisation de l'écoulement interne. De nombreux thermocouples sont insérés dans les parois inférieure et supérieure du canal afin de mesurer les conditions de température de l'expérience. L'ensemble de la maquette a été inséré dans un support isolant afin de minimiser les pertes thermiques vers l'environnement. A la sortie du canal, l'installation permet la mesure du débit de liquide non vaporisé. Enfin un capteur de pression différentielle enregistre les pertes de charge entre l'entrée et la sortie du canal.

La campagne d'essais a été réalisée en faisant varier les débit d'eau et la puissance d'alimentation des cartouches. Pour chaque condition de débit, 6 ou 7 paliers de puissance ont été réalisés jusqu'à atteindre un état stationnaire. Dans chaque condition d'essais, toutes les mesures sont acquises et des visualisations de l'écoulement sont enregistrées par caméra vidéo classique ou rapide, avec injection d'acide aminoG pour augmenter le contraste entre les zones liquides et gazeuses.

Une grandeur intéressante pour comparer aux simulations numériques est le coefficient d'échange pariétal à l'interface fluide-solide, en présence du phénomène de vaporisation. En effet la littérature montre une très forte augmentation du transfert de chaleur pariétal dans ces conditions. Pour identifier ce coefficient d'échange, il est nécessaire de connaître le flux de chaleur échangé entre la paroi inférieure et le fluide. Dans ce but, une méthode inverse de conduction de la chaleur a été utilisée pour identifier ce flux de chaleur, à partir des températures mesurées au sein de la paroi. Une hypothèse d'uniformité latérale des températures a conduit au développement d'un modèle thermique 2D plan, avec prise en compte de la puissance générée par les 31 cartouches électriques. Le coefficient d'échange pariétal efficace est identifié à partir du flux de chaleur et de la température locale du fluide. L'évolution de cette dernière le long du canal est calculée par un bilan d'enthalpie depuis l'entrée, en intégrant les flux de chaleur identifiés par la méthode inverse. La présence des picots est prise en compte a posteriori dans le post-traitement en considérant un modèle d'ailette soumise à un coefficient d'échange uniforme, ce qui permet de remonter au coefficient d'échange pariétal.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-035>

Etude CFD de l'impact des conditions d'injection pour un stockage thermocline en eau

Alexis Ferré^{1,*}, Rémi Manceau², Sylvain Serra³, Jérôme Pouvreau¹, Arnaud Bruch¹

* ✉ : alexis.ferre@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, DT_CH, 38000 Grenoble, France

² Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, CNRS, Inria, équipe CAGIRE, LMAP, Pau, France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, LaTEP, Pau, France

Mots clés : chaleur sensible, stockage thermique thermocline, stratification, distributeur, CFD, turbulence, flottabilité

Résumé :

Un réservoir thermocline stocke de la chaleur sensible. Son fonctionnement est basé sur la coexistence de deux zones : une froide (en bas) et une chaude (en haut). Celles-ci sont maintenues grâce à l'écart de masse volumique du fluide, causé par la différence de température. La zone intermédiaire, celle du gradient thermique, est appelée zone thermocline. Plus la stratification est faible, plus le gradient thermique est étalé, et plus l'énergie valorisable diminue. La zone thermocline est donc directement reliée aux performances du stockage. La littérature s'accorde sur le fait que l'épaisseur de cette zone résulte d'une phase initiale de formation (écoulement turbulent) puis d'une phase de dégradation (écoulement laminaire) causée par la conduction au sein du fluide, des phénomènes de mélanges à l'interface chaud/froid et des pertes thermiques aux parois. La formation de la thermocline est le phénomène prépondérant dans son épaisseur d'où la nécessité d'étudier localement la distribution du fluide.

Les distributeurs (géométrie, position) et les paramètres opératoires (vitesse d'écoulement, ΔT) sont déterminants dans la stratification mais leur interaction n'est pas encore bien comprise. La vitesse d'écoulement est directement reliée à la puissance extractible du stockage. Actuellement, une vitesse limite d'écoulement de 2 mm/s est communément adoptée pour ne pas déstabiliser la thermocline. Les questions du dépassement de cette limite ainsi que sa dépendance à la température se posent. A ce jour, les données disponibles sont incomplètes pour étudier précisément la formation de la thermocline, notamment en raison d'absence d'instrumentation fine à proximité des distributeurs et de gamme d'essais dont l'étendue n'est pas suffisante. Déterminer la limite de non-stratification, couvrir des essais avec une vitesse d'écoulement supérieure à 2mm/s et une gamme de ΔT suffisante, est la motivation du développement de notre nouvelle installation expérimentale.

La CFD est utilisée pour étudier localement la distribution du fluide. Cependant, la turbulence anisotrope imposée par la stratification thermique ainsi que la coexistence d'une zone turbulente avec une zone laminaire au sein du stockage sont des phénomènes complexes à modéliser. Pour obtenir un modèle CFD capable de retranscrire ces phénomènes, l'influence des différentes approximations physiques est dans un premier temps étudiée dans les conditions opératoires issues d'une publication dans laquelle une phase de charge est considérée et le distributeur est un jet impactant. L'eau est injectée à 50.8°C dans une cuve à 25.9°C. La vitesse d'écoulement dans la cuve est de 0.76 mm/s. Dans cette configuration, les conditions d'entrée (variables turbulentes, rampe et marche en débit) sont étudiées.

Hétérogénéité des modes de transferts convectifs au sein des centrales solaires photovoltaïques

Baptiste Amiot^{1,*}, Martin Ferrand², Rémi Le-Berre³, Stéphanie Giroux-Julien⁴

* ✉ : baptiste.amiot@edf.fr

¹ EDF R&D, CETHIL

² EDF R&D, CEREAS

³ EDF R&D

⁴ CETHIL, UCBL

Mots clés : Photovoltaïque, Micro-relief, Régimes convectifs, Renouvelables

Résumé :

Dans le contexte de la transition énergétique, les installations solaires photovoltaïques de plusieurs hectares bénéficient d'une viabilité économique accrue du fait des gains d'échelle réalisables. Malgré la bonne fiabilité des modèles de production électrique à l'échelle locale (module photovoltaïque), l'hétérogénéité des conditions météorologiques à l'échelle de la centrale photovoltaïque entraîne une incertitude sur le productible réel. L'hétérogénéité de l'irradiation est ainsi de plus en plus étudiée numériquement et expérimentalement, et permet de pondérer le flux solaire reçu par les modules, notamment lorsque le ciel est partiellement nuageux. Cette technique permet de réguler le productible initialement estimé via des mesures localisées et ponctuelles. La modification du champ de vent à l'intérieur des parcs solaires est une seconde hétérogénéité qui amène une incertitude sur le mode de transfert convectif qui s'établit à l'échelle du module. Sachant que le rendement électrique des cellules en silicium est négativement corrélée à la température d'opération des jonctions, la détermination des modes convectifs au sein des centrales permet de mieux définir la température d'opération de chaque module et prédire plus précisément le productible électrique. La question de l'hétérogénéité induite par les effets aérodynamiques est cependant complexe à appréhender que ce soit expérimentalement et numériquement (nombre de mesures, positionnement des sondes, modélisation de la turbulence, de la dynamique et des flux thermiques turbulents). Dans ce travail, deux expériences numériques réalisées à l'aide du code de calcul CFD code saturne sont présentées. Dans un premier temps, un module unitaire est modélisé suivant une coupe 2-D. Celui-ci est soumis à un champ de vitesse de vent transversal et des conditions de périodicité permettent de simuler l'agencement d'une infinité de modules, en situation de centrale solaire. Une comparaison avec les champs de vent obtenus dans une configuration similaire en soufflerie est produite et une importante disparité des caractéristiques du vent sous les modules photovoltaïques est démontrée. Cette étude apporte une solution simple pour réduire le coût de calcul nécessaire pour simuler le comportement dynamique et thermique des grandes centrales. Dans la seconde expérience numérique, la soufflerie existante est entièrement modélisée suivant une coupe 2-D. Le nombre de module photovoltaïque est cependant porté à 40, comparativement aux 10 modules présents dans la soufflerie réelle. L'objectif de la simulation est de déterminer si les champs de vitesse du vent obtenus lors de l'expérience réelle sont établis et statistiquement homogènes. Avant la 10ème rangée de module, le modèle de soufflerie est en concordance avec la dynamique de l'écoulement obtenu expérimentalement. Une évolution du régime de vent est constatée après la 10ème rangée et l'adéquation du profil moyen avec le cas périodique est obtenu autour de la 40ème rangée, variant en fonction du modèle de turbulence adopté. A partir de ces résultats, une modification des modes convectifs à considérer dans le cas des centrales solaires est proposée en fonction des caractéristiques du vent incident.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-047>

Contribution à l'étude expérimentale et numérique de l'écoulement d'air dans une fenêtre pariétodynamique chauffante

Salem Zeiny¹, Yassine Cherif¹, Stéphane Lassue¹

* ✉ : yassine.cherif@univ-artois.fr

¹ Laboratoire Génie Civil et géo-Environnement (EA-4515), Faculté des Sciences Appliquées-Université d'Artois Technoparc Futura 62400 Béthune-France

Mots clés : fenêtre pariétodynamique ; composant d'enveloppe multifonctionnel, expérimentation ; simulation numérique ; régime turbulent, recirculation, coefficient d'échange.

Résumé :

Devant le défi majeur de la réduction de l'impact des activités humaines sur le changement climatique, le secteur des bâtiments représente en France un domaine dans lequel il existe un fort potentiel en termes de réduction des consommations d'énergies fossiles et de production de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, l'enveloppe de bâtiment figure parmi les principaux axes d'amélioration, en matière d'isolation mais aussi en gérant de manière efficace les interactions avec l'environnement. L'équipe habitat du LGCgE à Béthune travaille depuis plusieurs années sur la conception et le développement de parois multifonctionnelles, actives ou passives (murs solaires, parois ventilées, etc. . .). Ces parois sont moins déperditives, voir même à bilan positif du fait de la récupération d'apports solaires et d'énergies fatales. Le travail présenté ici s'inscrit dans le cadre du projet « VARIETO » - ADEME NTE Nouvelles technologies émergentes, réalisé par un consortium de deux équipes universitaires et un industriel de la menuiserie. Le but est de concevoir et analyser le comportement d'une fenêtre pariétodynamique à triple vitrage chauffant. Celle-ci est conçue pour assurer à la fois le chauffage, la ventilation et l'éclairage naturel à l'intérieur d'un bâtiment. Son principe de fonctionnement consiste à faire circuler et à chauffer de l'air neuf provenant de l'extérieur entre les lames de vitrage avant son introduction dans le local à chauffer. La recherche présentée dans cette communication via les approches numériques et expérimentales, concerne plus particulièrement le comportement thermique et dynamique de l'écoulement d'air interne lorsque la fenêtre est équipée d'un vitrage chauffant. Du fait de la géométrie du composant, des zones de recirculation, dites « zones mortes », se forment et perturbent la dynamique de l'écoulement et les échanges de chaleur. On discutera ici de la notion de coefficient d'échange convectif dans ces zones, et des difficultés qui se présentent au niveau de la définition des températures de fluide de référence. En particulier, les températures de mélanges dans ces zones hétérogènes, s'avèrent très complexes à déterminer. Un modèle numérique a été établi en comparaison avec des expérimentations réalisées en cellules climatiques. Plusieurs pistes ont été explorées numériquement pour montrer qu'il est possible de faire fonctionner la fenêtre à différents débits optimaux.

Cavity size influence on Rayleigh-Bénard convection under the effect of wall and gas radiation

Maxime Delort-Laval^{1,*}, Laurent Soucasse², Philippe Rivière², Anouar Soufiani²

* ✉ : maxime.delort-laval@centralesupelec.fr

¹ ADEME, CentraleSupélec, CNRS

² CentraleSupélec, CNRS

Mots clés : Natural convection, gas radiation, Proper Orthogonal decomposition

Résumé :

We investigate Rayleigh-Bénard convection in a cubical cavity under the effect of wall and gas radiation. Coupled direct numerical simulations are carried out for a radiating air / H₂O / CO₂ mixture at room mean temperature, using a Chebyshev spectral method for the flow and a ray-tracing method for the radiation field. The global absorption distribution function (ADF) model is used to represent the spectral radiative properties of the mixture. Time-averaging is then applied to compare the results, regardless of the multiple flow configurations obtained. Three different Rayleigh numbers are studied, from $Ra = 1E7$ to $Ra = 1E9$. Under the Boussinesq approximation, solutions to the uncoupled simulations only depend on the Rayleigh and Prandtl numbers and are not affected by the size of the cavity. However, it goes otherway when radiation is taken into account; two cavity sizes are then considered with edges of 1 and 3 meters long. As the cavity size increases, at fixed Rayleigh number, so does the effects of radiation on the flow. Radiation has a stabilizing effect on the large-scale circulation. The large-scale circulation settles in vertical mid-planes or diagonal planes depending on the radiation conditions, and reorientations are occasionally observed in the cavity. In the same time, the convective flux in the core, as well as the conductive flux at the walls and the kinetic energy, are increased as radiation is taken into account, and this increase is more important for the larger size of the cavity. The contribution of radiation to the potential energy balance and to the "thermal energy" balance are presented. Proper orthogonal decomposition (POD) analysis is then used in order to better understand the evolution of the flow structures and the influence of radiation. The shape of the modes, as well as their symmetries and temporal dynamics, are discussed. The influence of the modes in the reorientation process is also studied.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-076>

Caractérisation des cinétiques de cristallisation du poly(éther éther cétone) (PEEK) par mesure de la chaleur spécifique en calorimétrie différentielle à balayage rapide

Théo Baumard^{1,*}, Elissa El Rassy¹, Nicolas Boyard¹, Steven Le Corre¹, Jean-Luc Bailleul¹, Jérôme Bikard², Lise Trouillet-Fonti²

* ✉ : theo.baumard@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes

² Solvay R&I

Mots clés : Cristallisation; Chaleur spécifique; Polymère thermoplastique; Cinétique non-isotherme

Résumé :

La caractérisation de la cristallisation des polymères semi-cristallins pendant leur mise en forme est nécessaire pour la compréhension des relations entre les paramètres procédé et les propriétés des pièces réalisées. Dans les procédés de soudage de pièces thermoplastiques par exemple, l'interaction entre la diffusion des chaînes à l'interface et la cristallisation peut entraîner des variations significatives de la qualité de l'adhésion en fonction du cycle de température imposé. Le poly(éther éther cétone) (PEEK) est un polymère thermoplastique semi-cristallin haute performance présentant d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne stabilité thermique, utilisé notamment pour des applications structurelles dans l'industrie aérospatiale et automobile. La cristallisation du PEEK en conditions isothermes et non-isothermes à des vitesses jusqu'à 30K/min a été étudiée de manière extensive en calorimétrie différentielle à balayage (DSC); cependant, aucune étude ne présente de résultats en conditions non-isothermes pour des vitesses de refroidissement proches de celles des procédés industriels (10-100K/s).

Dans ce travail, la cinétique de cristallisation non-isotherme du PEEK est étudiée à l'aide d'un calorimètre différentiel à balayage rapide (FSC) permettant des vitesses de chauffe et refroidissement jusqu'à 10000K/s. Des essais préliminaires ont montré que l'analyse directe des courbes de refroidissement n'est pas possible à cause d'un ratio signal/bruit trop faible; par conséquent, une nouvelle méthode de cristallisation par paliers a été employée pour quantifier le degré de cristallinité à partir des courbes de chauffe. Le protocole utilisé consiste à maintenir l'échantillon au-dessus de la température de fusion pour effacer l'historique thermique, puis refroidir à la vitesse d'intérêt jusqu'à une température fixée ($150^{\circ}\text{C} < T_q < 300^{\circ}\text{C}$) avant de tremper la microstructure obtenue. L'échantillon est ensuite chauffé pour fondre les cristaux formés lors du refroidissement. L'essai est répété pour plusieurs valeurs de T_q afin de reconstruire de manière discrète la cinétique de cristallisation. A des vitesses de refroidissement élevées, ou pour un haut degré de surfusion, la présence de deux pics de fusion est observée. Des travaux précédents ont montré que ceci est dû à un phénomène de fusion/recristallisation pendant la phase de chauffage; l'intégration directe des pics de fusion n'est donc pas adaptée pour évaluer la cristallinité induite par le refroidissement. Une méthode consistant à évaluer la variation de la chaleur spécifique du matériau sous la température de transition vitreuse est donc proposée. Ce travail expérimental a permis l'édition de diagrammes procédés (TTT, TRC) à des vitesses de refroidissement identiques à celles des procédés industriels. Un modèle analytique de la cinétique de cristallisation est également proposé pour prendre en compte cristallisation primaire et secondaire.

Modélisation de la cinétique de cristallisation d'un matériau à changement de phase dopé en conductivité par méthode inverse

Mariam Jadal¹

* ✉ : mariam.jadal@uir.ac.ma

¹ Université Internationale de Rabat

Mots clés : Stockage de chaleur - Chaleur latente - Matériaux à changement de phase - Graphite naturel expansé - Cinétique de cristallisation - Méthode inverse

Résumé :

Un matériau composite à base d'une structure conductrice de Graphite Naturel Expansé (GNE), et de Matériau à Changement de Phase (MCP) de type paraffine RT70 HC, dédié pour le stockage de la chaleur latente est présenté dans cette communication. La particularité de ce MCP est qu'il possède une surfusion et une cristallisation présentant deux transformations différentes. Et, afin de modéliser correctement le changement de phase de ce type de MCP, un terme source est ajouté à l'équation de l'énergie. Ce terme source est exprimé avec la forme différentielle de Nakamura pour prédire la cinétique de cristallisation de chaque transformation du MCP. Pour la première transformation, l'identification des paramètres de ce modèle a été obtenue à l'aide de la DSC. Pour la deuxième transformation, seule une plage de températures restreinte et incomplète a pu être étudiée par DSC. En dehors de cet intervalle de température, la transformation était observée hors isotherme empêchant la détermination des paramètres de cinétique. Pour contourner cet écueil, ces paramètres sont identifiés à l'aide d'une méthode inverse basée sur des résultats expérimentaux. Pour cela, un dispositif expérimental qui permet de chauffer et refroidir un échangeur-stockeur de type lit fixe a été développé. Le lit fixe est composé de cylindres de GNE-MCP, encapsulés d'aluminium dont deux cylindres ont été instrumentés. Un modèle numérique du changement de phase de ce matériau développé sous Comsol Multiphysics est utilisé pour la simulation du transfert thermique et une méthode inverse est développée sous Matlab pour l'identification des inconnues du système. Les valeurs trouvées des coefficients de cinétiques seront confrontés aux résultats trouvés à l'aide de la DSC et la méthode d'extrapolation. Ce système est utilisé pour la détermination de l'évolution de la cinétique de cristallisation de la deuxième transformation. Enfin, ce dispositif et son modèle numérique sont utilisés pour valider le comportement thermique du matériau, en particulier pendant la phase de solidification.

Premiers résultats d'échauffement et d'usure d'un banc représentatif du contact électrique glissant caténaire-pantographe

Théo Kziazzyk¹, Didier Chamagne¹, Philippe Baucour¹, Eric Gavignet¹

* ✉ : theo.kziazzyk@femto-st.fr

¹ Institut FEMTO-ST (CNRS-UMR6174), Département Energie

Mots clés : Banc d'essais, Mesures thermiques, Instrumentation, Résistance thermique de contact

Résumé :

L'usure et l'échauffement des bandes de captage lors du contact électrique glissant pantographe-caténaire sont des problématiques encore mal comprises. Ils sont causés par un frottement mécanique, un échauffement par effet joule et par des arcs électriques. Cela entraîne notamment une usure prématurée, une maintenance accrue et de multiples casses. L'usure est aussi associée à d'autres grandeurs électriques, thermiques ou tribologiques telles que les résistances électrique et thermique de contact, le coefficient de partage de flux thermique, le glissement magnétique, le coefficient de frottement, etc. Ces grandeurs sont influencées par de nombreux facteurs comme la vitesse linéaire, le courant électrique, la force de contact ou la raideur de contact. Pour étudier expérimentalement cette liaison électrique glissante, un banc d'essai a été développé et réalisé. Il est constitué de trois éléments principaux : (1) un disque en cuivre mis en rotation représentant le fil de contact de la caténaire (2) un échantillon de bande de captage mis en contact avec le disque en cuivre et étant dans un mouvement de balayage sur celui-ci et (3) une charge et une alimentation permettant de faire circuler un courant dans les deux entités précédentes. Le banc d'essais est conçu en reproduisant de manière détournée un contact entre un pantographe et une caténaire. Il est aussi créé pour être modulable et flexible, en pouvant par exemple agir sur le courant électrique passant dans la liaison, sur le type de matériau étudié ou sur la force appliquée entre les deux structures.

Les caractéristiques, les solutions techniques et la configuration de cette machine sont ici présentées en comparaison avec la liaison étudiée. Les premiers résultats d'échauffement et d'usure observés sur deux types différents de bande de captage sont présentés. Une critique de ces résultats est ensuite réalisée. Le matériau des bandes de captage étant anisotropique, l'analyse des résultats s'appuie sur des mesures de diffusivité thermique selon les trois axes.

Formulation et caractérisation thermophysique et mécanique d'un mortier renforcé par des fibres naturelles végétales de *Posidonia-Oceanica* et animales de Plumes de Poulet

Hassen Zeiri², Ons Hamdaoui¹, Atef Mazioud¹, Laurent Ibos¹, Abdallah Mhimid²

* ✉ : ons.hamdaoui@u-pec.fr

¹ CERTES - IUT Sénart-Fontainebleau, 240 rue de la Motte, 77550 Moissy-Cramayel

² Laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques LESTE, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir Tunisie

Mots clés : mortier, fibres végétales, fibres animales

Résumé :

Dans des précédents travaux, nous avons étudié l'utilisation des fibres naturelles de *Posidonia-Oceanica* (notées PO) dans des matériaux de construction (isolants, composites). Nous avons étudié les propriétés thermophysiques, mécaniques, acoustiques et hygroscopiques des composites cimentaires incluant des fibres de PO. Nous avons également étudié dans un travail récent le renforcement d'un mortier de ciment par des fibres animales de plumes de poulet (notées PP). Ces fibres ont été traitées avec un traitement chimique à base de dodécylsulfate (SDS) afin d'éliminer le risque de contamination microbienne due à l'existence d'agents pathogènes transmissibles par le sang. Les caractéristiques thermophysiques et mécaniques de ces matériaux ont été par la suite étudiés.

Le présent travail porte sur le développement d'un mortier incluant des fibres végétales de PO et des fibres animales de PP. En se basant sur les différentes formulations testées précédemment, nous avons choisi de fixer la fraction massique de renforcement (PO + PP) à 4 %. Sept formulations ont été testées en variant le taux de fibres de PP et celui de fibres de PO : 0 % PO + 0 % PP ; 0 % PO + 100 % PP ; 25 % PO + 75 % PP ; 50 % PO + 50 % PP ; 75 % PO + 25 % PP ; 100 % PO + 0 % PP. Trois éprouvettes de dimensions 40 40x40x160 mm³ ont été fabriqués pour chaque formulation et stockés dans le laboratoire. Les composites sont considérés durcis après 28 jours de séchage. Les propriétés thermiques de ces matériaux (conductivité thermique, diffusivité thermique et capacité thermique massique) sont mesurés avec le dispositif du Hot-Disk. La résistance à la compression et la résistance à la flexion des matériaux sont mesurées avec une machine d'essais de flexion/compression.

Le but de ce travail est de comparer les propriétés thermiques et mécaniques des composites en fonction de la formulation et choisir les formulations optimales en fonction des applications visées.

Convection naturelle en cavités scalène différentiellement chauffée : application au refroidissement des panneaux solaires photovoltaïques.

Sandra Elizabeth Garcia¹, Anne Migan Dubois¹, Marie-Christine Duluc², Jordi Badosa³

* ✉ : sandra.garcia@universite-paris-saclay.fr

¹ Université Paris-Saclay, Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris

² Lafset, Conservatoire National des Arts et Métiers

³ Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, École Polytechnique

Mots clés : convection naturelle, transfert thermique, cavité non-symétrique

Résumé :

Le dispositif expérimental ALEPH (Amélioration de l'Efficacité Photovoltaïque) implanté au SIRTÀ (Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique) sur le campus de l'École Polytechnique à Palaiseau, est composé de rangées de modules solaires photovoltaïques équipés de miroirs plans en interrangées. Ces réflecteurs renvoient sur les modules photovoltaïques une partie du flux solaire permettant un renforcement de l'éclairage et par la suite un gain annuel sur l'énergie électrique produite d'environ 20 %. Néanmoins, le rendement des modules photovoltaïques décroît avec l'échauffement des panneaux à raison de $-0,5 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ pour les panneaux de silicium polycristallin et d'environ la moitié pour le silicium amorphe. La maîtrise de la température et de son homogénéité sur la surface du panneau sont des éléments essentiels pour l'optimisation de la performance et pour prédire au mieux la production électrique. La modélisation nous permettra d'optimiser la géométrie afin d'améliorer le refroidissement estival des modules et, si possible, d'exploiter la production hybride photovoltaïque-thermique.

Dans ce travail, nous avons étudié numériquement l'écoulement de convection naturelle 2-D généré à l'intérieur de cavités symétriques ou scalènes. La simulation 2-D des écoulements est une première approximation des écoulements réels permettant de réduire les temps de calcul. Les simulations numériques utilisent la méthode des éléments finis (COMSOL Multiphysics) et permettent de déterminer quantitativement les coefficients d'échange pour différentes géométries et conditions aux limites. Le fluide de travail est l'air ($Pr = 0,7$).

Tout d'abord, nous présenterons brièvement la validation de l'outil numérique en considérant des écoulements en convection naturelle dans des cavités isocèles telles qu'étudiées par Hoffman et al. Trois rapports d'aspect (définis comme la hauteur de la cavité divisée par la base) $A1=0.5$; $A2=1$; $A3=2.25$, et un nombre de Rayleigh compris entre 10^0 et 10^{10} ont été considérés.

L'étude principale porte sur des écoulements d'air en cavité non symétrique (scalène) définie par deux rapports d'aspect. Des conditions aux limites de type Neumann sur le panneau sont considérées permettant pour s'approcher de la réalité. Le nombre de Nusselt moyen sur les différentes parois, les moyennes de l'énergie cinétique et la température dans la cavité sont évalués en fonction du nombre de Rayleigh. Les lignes de courant et les isothermes obtenues en fonction du nombre de Rayleigh sont également présentées.

Des simulations numériques en cavité scalène considérant un flux de chaleur non-uniforme imposé sur le panneau photovoltaïque seront également présentées. Elles visent à représenter le cas fréquent d'un éclairage non uniforme sur le panneau PV. Les résultats seront comparés à des mesures issues des capteurs de températures implémentés sur le dispositif ALEPH.

Lattice Boltzmann Method investigations of natural convection heat transfer instabilities in a rectangular cavity heated from below

Mustapha Faraji^{1,*}, El Mehdi Berra¹

* ✉ : farajimustapha@yahoo.fr

¹ Hassan II university

Mots clés : LBM ; Natural convection ; aspect ratio ; oscillation ; Square cavity.

Résumé :

In this paper a numerical study with Lattice Boltzmann Method (LBM) of the natural convection flows into a square cavity filled by air and cooled by the top wall with a heat source attached to the bottom wall of the cavity presented as an electronic component. In order to observe the change of the heat transfer into the cavity with time, in a first step a series of numerical simulations are done by varying the aspect ratio of the cavity while $A=1, 1.6, 1.7$ and 2 . Results show that the cavity's aspect ratio has an impact on the heat transfer behavior and for the aspects ratio $A=1$ and $A=1.6$ the numerical results show a stable steady state on the temperature distribution into the cavity and for $A=1.7$ and $A=2$ a stable oscillatory state is found. In a second step a numerical simulation is done to study the oscillation of heat transfer into the cavity for the aspect ratio $A=2$. The choice of Lattice Boltzmann Method (LBM) as a simulation method which experienced great progress and has become an alternative method for solving fluid dynamics problems and has challenged traditional methods in many sectors by its simplicity of implementation.

In the present work, the Lattice Boltzmann Method is used to do a numerical study of natural convection flows in a square cavity cooled by the upper wall and heated from below by a heat source considered as an electronic component. In the first step we study the effect of the aspect ratio on heat transfer with time, four different aspect ratio values are considered $A=1, A=1.6, A=1.7$ and $A=2$. In a second step we choose the configuration $A=2$ that we get a stable oscillatory state with time and we try to study the oscillation by choosing four points on the oscillation curve. Therefore, it should be noted that the objective of this present work resident in the observation of the change of natural convection heat transfer into the cavity with time by changing the aspect ratio. The numerical simulations are done with a computational FORTRAN code that it's validated with a result from a published paper.

A genetic algorithm-based topology optimization method for convective cooling of a heating surface with multiple-peak heat flux

Yijun Li¹, Stéphane Roux¹, Cathy Castelain¹, Lingai Luo¹, Yilin Fan¹

* ✉ : yijun.li@univ-nantes.fr

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR6607, F-44000 Nantes, France

Mots clés : Topology optimization ; Genetic algorithm ; Convective cooling ; Heat exchanger

Résumé :

The heat-generating surface with a multiple peak heat flux is commonly encountered in many thermal devices, including electronic components, PV/T panels, Lithium-ion battery packs of electric vehicles, etc. If not properly cooled, the uneven heating condition would cause the existence of local hot spots in these devices, resulting in lowered working performance and shortened service time. The convective cooling of the heating surface using a single-phase fluid-based heat sink is often considered as an effective thermal management method to handle this issue due to its simplicity of design, high cooling performance, and compact size. In particular, the cooling performance improvement by optimizing the fluid flow configuration in the heat sink has become an important area of research.

This study presents the development of a genetic algorithm based topology optimization (GATO) method for convective cooling of a heating surface under multiple-peak heat flux. In more detail, the middle area of the heat sink receiving heat flux is treated as the design area and represented as a 50 x 50 binary matrix. Each element in the matrix is considered either as fluid or as solid, and their allocation is optimized with the objective of minimizing the peak temperature at the heating surface of the heat sink under the constraint of constant void volume for the fully-connected fluid domain. For each optimization step, the fluid flow and temperature characteristics are obtained by CFD simulation using OpenFoam and the GA operations (selection, crossover, mutation, etc.) are applied.

The numerical results obtained show that the proposed GATO method could successfully determine the optimal distribution of the fluid/solid elements in the design area, leading to the minimized peak temperature of the heating surface at the cost of a reasonable pressure drop increase. Compared to a conventional parallel straight mini-channel heat sink, better cooling performance (lower peak temperature, higher temperature uniformity) can be achieved by the topologically optimized heat sink.

A design parametric study has also been performed and the effects of some influencing factors (porosity, fluid inlet velocity, matrix dimension, etc.) on the performance of the topologically optimized heat sink are evaluated. The testing and performance comparison of different heat sink prototypes are our on-going work, in order to experimentally validate the developed GATO method. This study could be a useful contribution to the optimization of heat exchangers/heat sinks in general.

Modelling of coupled Heat transfer - Application to Porous media at high temperatures

Raj Narayan Konduru¹, Olivier Farges¹, Vincent Schick¹, Yves Gaillard², Patrick Hairy², Gilles Parent¹

* ✉ : raj-narayan.konduru@univ-lorraine.fr

¹ University of Lorraine, LEMTA, F-54000, Nancy, France

² CTIF - 44 avenue de la Division Leclerc - F-92318 SEVRES CEDEX

Mots clés : Porous Media, Radiation, Conduction, Convection, Monte Carlo, Deterministic, Coupling.

Résumé :

In the current context of greenhouse gas reduction, the improvement of energy efficiency in industries using high temperature processes (metallurgy, iron and steel, cement, glass) requires, among other things, the development of high temperature heat recovery/storage/transport solutions. For high temperature heat recovery on an industrial scale, the use of porous materials could be an interesting solution due to their high specific surface area. For better heat recovery, the foams should be designed to have a lower pressure drop and a high temperature difference between the inlet and outlet of an element filled with such foams. Numerical methods are used to solve the heat and fluid flow through the porous heat exchanger that provides the solution. Two different types of steady-state numerical simulations have been performed on the Kelvin cell foam that solve for conjugate heat transfer, i.e. the coupling of conduction, convection and radiation. One is the deterministic method which solves using the finite volume method with density variation based on temperature and pressure changes (equation of state) using the OpenFOAM toolkit and the other is the Monte Carlo – Meshless method keeping a constant density using the reference based algorithm adapted to our case. We performed simulations at 0.1 m/s and 2 m/s at imposed temperatures of 373 K, 473 K and 1073 K. We found that the error between the two methods increases as the velocity and the imposed temperature increase. We also found that the Monte Carlo method takes very little computation time compared to the deterministic methods.

Analyse théorique des échanges convectifs forcés en conduites chauffées : application aux thermosiphons hydrauliques et aux échangeurs diphasiques

Franck Plouraboué², Martin Rudkiewicz^{1,*}, Franck David¹, Gérald Debenest²

* ✉ : martin.rudkiewicz@edf.fr

¹ EDF R&D

² IMFT

Mots clés : Modélisation, Echangeur diphasique, minicanaux, thermosiphon

Résumé :

Le développement des nouvelles centrales de production électrique s'accompagne de l'apparition d'échangeurs-générateur de vapeur, plus compacts, en rupture avec les technologies usuelles. Ces échangeurs reposent sur l'évaporation forcée en micro-canaux qui est apte à prélever de fortes densités de flux et connaît, elle aussi, un essor considérable dans les domaines des transports et des systèmes de refroidissement électronique. Dans ce contexte, c'est la combinaison entre échanges thermiques convectifs et augmentation des surfaces d'échanges qui permet un transfert performant. De façon analogue, les boucles en circulation naturelle (thermosiphons) sont des systèmes passifs pilotés par des effets de flottabilités, qui peuvent également transférer de la puissance thermique sans forçage extérieur. Robustes, simples, bon marché, elles sont utilisées dans de nombreux domaines tels que la géothermie, l'ingénierie nucléaire, les moteurs à combustions, etc.

Pour modéliser les échanges thermiques dans ces systèmes on utilise la méthode des modes de Graetz généralisée. L'approche a été appliquée à trois familles de boucle en circulation naturelle, fonctionnant soit en flux imposé, température imposée, ou en situation mixte. Quand $Gz \gg 1$, l'efficacité des échanges calculée numériquement vérifie $\epsilon \sim Gz^{-1/3}$. Cette loi de transfert contrôlée par les couches limites, formées dans les zones d'entrée des sections chaudes et froides de la boucle, peut aussi être dérivée asymptotiquement. Dans chaque cas, une loi universelle, $Re \sim Gr^{3/7}$, exprimant le nombre de Reynolds en fonction du nombre de Grashof (ou, de façon équivalente, le nombre de Graetz Gz en fonction du nombre de Boussinesq Bo) et présentant un très bon accord avec les corrélations expérimentales a été obtenue.

Dans un second temps nous avons étudié l'évaporation convective en mini-canal chauffé où une localisation du changement de phase, observée expérimentalement dans les microcanaux, est modélisée par une interface frontale liquide-vapeur séparant un domaine amont liquide d'un domaine aval vapeur. Les solutions numériques obtenues par la méthode des modes de Graetz généralisée, étendue à ce problème, permettent de prédire des profils de températures comparables avec les mesures. Les résultats numériques montrent le développement d'une couche limite thermique à l'interface liquide-gaz, qui peut aussi être analysée asymptotiquement. Les résultats obtenus sont comparés avec un modèle analytique monodimensionnel et des données expérimentales.

Thème 4

Modélisation et Simulation Numérique

Conductivité thermique d'une céramique affectée par un réseau de fissures localisées aux joints de granulats : simulations 2D de l'effet d'une distribution bimodale de taille de granulats	44
Furnace thermal piloting management in siderurgy	45
Modélisation thermique d'un matériau composite semi-transparent soumis un laser de haute énergie	46
Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion using Adaptive Mesh Refinement in a typical Micro GasTurbine Combustor	47
Identification de modèles paramétriques monodimensionnels d'un four de brasage et de sa charge .	48
Comparaison de méthodes de modélisation système d'un stockage de vapeur par Matériaux à Changement de Phase	49
Modélisation du chauffage de polymères par micro-ondes : approches numérique et expérimentale	50
Simulation du refroidissement d'une zone représentative d'un assemblage de cœur de REP par un écoulement dispersé vapeur/gouttes	51
Simulation numérique de dépôts de particules dans un échangeur par approche Euler – Lagrange .	52
Insight into prediction of unsteady forced convection in a porous straight channel subjected to an inlet flow modulation : A REV lattice Boltzmann investigation	53
A REV-scale assessment of metal foam porosity effect on a PCM's melting in an latent heat energy storage unit	54
Tests et améliorations de modèles mixtes de Simulation des Grandes Échelles d'un écoulement à fort nombre de Reynolds en canal asymétriquement chauffé	55
Modélisation numérique du transport de particules fines dans un milieu gazeux en considérant l'effet thermique	56
Design of the HIFU thermal ablation treatment of cancer with stochastic simulations	57
Implémentation de modèles de boîte noire adaptés pour la caractérisation des performances de refroidisseurs commerciaux à sorption	58
Réduction modale d'un modèle non-linéaire de composant électronique : Application à une micro-puce activée de 4 sources	59
Optimisation de forme d'échangeurs thermique en régime turbulent	60
Simulation numérique du comportement du corps humain en état de stress thermique	61
Modélisation et validation expérimentale d'un bassin sportif à la Réunion	62
Présentation d'un cycle thermomécanique innovant mettant en œuvre des écoulements pulsés de fluide organique destiné à la récupération de chaleur fatale basse température	63
Modélisation des transferts radiatifs par réseaux de neurones en présence de phénomènes rares et discontinus	64

Conductivité thermique d'une céramique affectée par un réseau de fissures localisées aux joints de granulats : simulations 2D de l'effet d'une distribution bimodale de taille de granulats

Léo Moutin^{1,*}, Renaud Masson¹, Christelle Duguay¹, Vincent Bouineau¹, Laurent Fayette¹, Frédéric Adenot¹, Marc Josien¹, Michel Bornert²

* ✉ : leo.moutin@cea.fr

¹ Cea Cadarache

² Laboratoire Navier

Mots clés : Céramiques poreuses, UO₂, caractérisation, simulation, modélisation

Résumé :

Les matériaux céramiques obtenus par frittage présentent une porosité qui peut être plus ou moins marquée et dont les caractéristiques morphologiques varient fortement d'un matériau à l'autre. Cette porosité peut avoir une forte influence sur leur comportement thermique en dégradant leur conductivité thermique. Il est alors important de comprendre précisément le rôle que joue cette porosité sur le comportement thermique de ces matériaux.

Les matériaux étudiés sont des céramiques de dioxyde d'Uranium (UO₂) susceptibles de présenter un réseau de porosité très développé à l'issue du frittage. Pour les céramiques caractérisées ici, ce réseau se particularise par la présence d'une porosité de forme fine et allongée qui peut être assimilée à un réseau de fissures. Cette porosité est appelée porosité "filamentaire" en référence à sa forme.

Un modèle numérique a été développé pour évaluer l'influence de la porosité de céramiques UO₂ sur leur comportement thermique. Ce modèle repose sur des simulations numériques par champs complets (méthode FFT) réalisées sur des microstructures synthétiques. Pour que le modèle prédise correctement la conductivité thermique de ces céramiques, il est essentiel que les microstructures synthétiques soient fidèles aux microstructures des céramiques étudiées.

Par rapport aux microstructures synthétiques de référence, présentées dans des travaux antérieurs, de nouvelles considérations sont faites. Sont notamment étudiés, la possibilité de considérer une distribution bimodale de taille de granulats ainsi qu'une orientation préférentielle de la porosité. L'influence de ces deux ingrédients sur les paramètres morphologiques des microstructures sont ensuite évalués en comparant les résultats obtenus par caractérisation sur ces microstructures à ceux obtenus sur les microstructures de référence et sur les microstructures des céramiques étudiées.

L'influence d'une distribution bimodale de taille de granulats et d'une orientation préférentielle de la porosité sur le comportement thermique des différentes microstructures est également évalué en réalisant des simulations numériques 2D (méthode FFT) sur des coupes des microstructures. Les simulations thermiques caractérisent ainsi le comportement de microstructures virtuelles présentant des fissures rubans (infinies dans la direction opposée au plan d'observation), ce qui exacerbe l'effet de ces fissures sur les propriétés thermiques simulées.

Furnace thermal piloting management in siderurgy

Thomas Lenne¹, Guy Druart¹, Marcello Bentivegna^{1,*}

* ✉ : marcello.bentivegna@vallourec.com

¹ Vallourec Research Center France

Mots clés : thermal simulation, furnace piloting, level 2 models, piloting algorithm

Résumé :

In the premium steelmaking industry, the heat treatment of steel products is a key process to obtain the good final physical properties and in a correct range of values. Over the years, Vallourec has known a paradigm change in his production organization linked to the carbon steel market evolution. Reduced-order sizes, simultaneous heating of different products and frequent stoppages made the production more discontinuous than in the past and increase the critical quality-related phases. The necessary changes for furnace management requires now improved flexibility and dynamism to ensure the heating quality of the products but bring opportunities for energy savings. One of Vallourec's Industry 4.0 targets is a complete management and control of the production. Furnace level 2 modelling is one of the keystones for process data generation : in a heating process we know the charging and discharging state by sensors, what is unknown is the physical evolution in between. The Vallourec L2 model fulfils this lack.

The mastering of the processes requires the best comprehension of the temperature field's evolution and the correlated mechanism. All thermal processes are submitted to the same partial-differential equation, the well-known heat equation. Between the heating, the natural cooling or the quenching of a product, the only mathematical difference comes from the applied boundary conditions which are related to the considered thermal flows on the limits (radiation, convection, conduction). This equation can be analytically solved only in some particular cases which are not relevant for industrial purposes. Some dedicated commercial software can solve the heat equation in a very precise way, but they are not adapted to the specific needs of real-time computation and aren't consistent with the measurement precision in the plants. The necessity of a model dedicated to the thermal physic, to the specific geometries and the furnace configurations is based on these plant-oriented requirements. The choice of the numerical methods has been based on criteria such as calculation speed, maintainability, the ability to improve and precision. The models are then tested on temperature uniformity survey trials as a validation gauge.

Most Level 2 models for furnaces are comparing the real-time simulation results with ideal "static" heating curves to adapt the piloting of the furnace. This method showed great results and robustness over the years but showed a lack of flexibility when a deviation from the ideal production situation occurs. The new generation of Vallourec Level 2 models for billets reheating furnaces, uses another principle and removes the ideal heating curve as an ideal case that rarely happens. Based on the real-time simulation results and the on-line production data, the computed forecast of the future discharging state of the products allows the software to provide a dynamic prediction of the heating quality with irregular production parameters. For sure these results are obtained with an higher computational cost that were not affordable in the past but are acceptable today with the most recent evolution of information technology, as for example parallelization of the simulations.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-032>

Modélisation thermique d'un matériau composite semi-transparent soumis un laser de haute énergie

Florent Retailleau^{1,*}, Vadim Allheily¹, Lionel Merlat¹, Jean-François Henry², Jaona Randrianalisoa²

* ✉ : florent.retailleau@univ-pau.fr

¹ Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL)

² Institut de Thermique, Mécanique et Matériaux (ITheMM)

Mots clés : transfert radiatif, transfert thermique, modélisation, matériau composite, cinétique

Résumé :

A différentes étapes de la vie d'un matériau, on peut faire appel au rayonnement laser comme système de chauffage (élaboration et/ou mise en forme), outil de diagnostic (contrôle qualité), voire même comme arme de destruction (applications militaires).

Dans le cas des composites semi-transparentes constitués de fibres de verre et de résine époxy, l'interaction avec un flux radiatif est un processus complexe car une partie de l'énergie incidente est absorbée et génère des sources volumiques de chaleur variables dans le matériau tandis que l'autre partie est transmise et/ou réfléchi vers le milieu environnant. Comprendre la propagation du rayonnement laser et plus particulièrement déterminer le profil d'absorption du flux est donc essentiel pour prédire son comportement thermique. Les propriétés radiatives et thermiques de ce type de matériau composite sont thermo dépendantes, ce qui complique d'autant le problème. Dans ce travail, nous avons utilisé un modèle thermique pour prédire le champ de température au sein d'un matériau composite fibre de verre/résine époxy soumis à rayonnement laser de haute énergie en prenant en compte l'évolution des propriétés radiatives et thermiques. Le modèle thermique est basé sur la résolution de l'équation de la chaleur par la méthode des éléments-finis (logiciel COMSOL Multiphysics). Le terme source de l'équation de la chaleur est calculé à partir des profils tridimensionnels d'absorption obtenus en résolvant l'équation de transfert radiatif par une méthode de Monte Carlo. Les propriétés radiatives utilisées ont été identifiées entre 20 et 450 °C. Les propriétés thermiques, à savoir l'émissivité, la masse volumique, la chaleur spécifique et la diffusivité thermique, ont été déterminées entre 20 et 400 °C à partir de différents dispositifs expérimentaux (DSC, ATG, méthode flash, spectrophotomètres, dilatomètre).

Afin de valider le modèle théorique, nous avons mis en place une expérience pour mesurer les températures sur les deux faces d'un échantillon plan soumis à de forts flux laser. Au cours de cette expérience, l'échantillon est soumis à trois densités de flux différentes, 75, 150 et 300 W/cm^2 sur une zone circulaire de 20 mm de diamètre au centre de l'échantillon pendant respectivement 10, 5 et 2.5 secondes. En raison de la différence de vitesse de chauffe utilisée lors des caractérisations des propriétés thermiques et radiatives et des tests en conditions réelles, la cinétique de chauffe est un paramètre important qui ne peut être négligé. Pour ce faire, nous avons utilisé la loi empirique d'Arrhenius qui permet d'associer les propriétés du matériau à l'évolution du taux de dégradation plutôt qu'à la température. Ainsi, elle réduit l'impact de la cinétique de chauffe sur les propriétés thermiques et radiatives. Le dispositif expérimental mis en place permet également de mesurer la transmittance normale-normale de l'échantillon testé. Cette mesure confirme l'impact de la cinétique de chauffe et donc l'intérêt d'utiliser la loi d'Arrhenius. Les résultats théoriques et expérimentaux sont cohérents pour les trois densités de puissance utilisées. Le modèle obtient des résultats très proches des mesures pendant la première partie du chauffage jusque 200 °C, en particulier pour la plus faible vitesse de chauffe.

Large Eddy Simulation of Turbulent Combustion using Adaptive Mesh Refinement in a typical Micro Gas Turbine Combustor

Antoine Verhaeghe^{1,*}, Alessio Pappa¹, Ward De Paepe¹, Pierre Bénard², Laurent Bricteux¹

* ✉ : antoine.verhaeghe@umons.ac.be

¹ Université de Mons

² INSA Rouen

Mots clés : Large Eddy Simulation (LES), Turbulent Combustion, micro Gas Turbine (mGT), Adaptive Mesh Refinement (AMR), Thickened Flame Model (TFLES)

Résumé :

The past few years developments in advanced cycle modifications aimed at making micro Gas Turbines (mGTs) more fuel and operational flexible. However, accurate data, on real industrial combustor configuration, assessing the performances and emissions of the combustion under unconventional diluted conditions or fuels involved by these novel cycles are still missing. In this framework, Large Eddy Simulations, which allow to accurately assess the unsteady effects coupled to turbulent-chemistry interaction of reacting flows, offer an opportunity to better assess the combustion behavior under these specific conditions. However, the computational cost still remains much higher than RANS simulations. Moreover, an adequate mesh has to be generated to perform valid LES. However, for such complex geometries, the mesh generation might be complex, especially when the region of interest is not intuitively known. In this work, a dynamic adaptive mesh refinement strategy is proposed and applied on the LES of a typical industrial mGT combustor, the Turbec T100. This strategy consists in automatically refining the mesh along the simulation only in regions where finer cells are required to capture essential effects, i.e. the flame front, at a reasonable cost. Thus, the flame sensor, allowing to identify the flame front location, is used as adaptation criterion. The triggering of the mesh adaptation over time is based on the relative metric error, representing the deviation from the desired mesh metric. The results show that the adaptation strategy allows to generate automatically a dynamic mesh that is able to capture correctly the flame. Moreover, although the mesh adaptation process has a non-negligible calculation cost, a much heavier static mesh would be required to achieve the same resolution accuracy. However, this strategy, simply based on the flame sensor, does not allow the automatic and correct meshing of the dilution zone at the combustion chamber outlet, which is necessary to predict emissions and flue gas properties precisely. Therefore, to ensure a fully automatic meshing of the combustion chamber to avoid human intervention, an additional adaptation criterion must be considered.

Identification de modèles paramétriques monodimensionnels d'un four de brasage et de sa charge

Adrien Barthélémy^{1,*}, Benjamin Rémy², Vincent Schick², Thierry Mazet³, Gaëtan Bergin³, Célien Zacharie³

* ✉ : adrien.barthelemy@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine

² LEMTA

³ Fives Cryo

Mots clés : Techniques inverses, identification de modèles, métrologie thermique, échangeur en aluminium à plaques et ondes brasées, modélisation et simulation numérique

Résumé :

Lors de la fabrication industrielle d'échangeurs de chaleur en aluminium à plaques et ondes brasées, l'étape du brasage permet la liaison définitive des plaques et des ondes entre elles et doit assurer la tenue mécanique du futur échangeur. Le brasage s'opère dans un four sous vide où les échanges thermiques s'effectuent par rayonnement entre la charge (le futur échangeur) et des dizaines de panneaux radiants l'entourant ainsi que par conduction au sein de la charge. La consigne de chauffe est assurée par un système de régulation exploitant les mesures de dizaines de thermocouples disposés au cœur et en surface de la charge.

Cependant, un dysfonctionnement métrologique (thermocouple mal étalonné, en panne, etc. . .) peut perturber la chauffe, générant des gradients thermiques mécaniquement dangereux dans la charge ou empêchant un brasage complet. Dès lors, l'échangeur peut être rebuté car incapable de passer les contrôles de qualité, ce qui constitue un préjudice notable pour l'industriel.

Une solution prometteuse pour parer à ce problème est l'utilisation en temps réel de modèles thermiques paramétriques ARX. Rapides à estimer et contournant l'estimation ardue des caractéristiques thermiques du système complexe qu'est la charge, des modèles ARX dits « globaux » ont déjà été identifiés avec succès au cours d'une thèse : ils offrent la connaissance de la moyenne des mesures des thermocouples sur toute la surface de la charge.

L'étude proposée s'attaque à déterminer des modèles plus « locaux », permettant l'accès à la mesure d'un seul thermocouple. En effet, il s'agit de l'information la plus intéressante industriellement afin de remplacer les données d'un thermocouple défaillant par les valeurs synthétiques d'un ARX durant l'étape du brasage.

Suivant ce principe d'étude « localisée » dans la charge, des modèles FlexPDE monodimensionnels du système four + charge sont construits et simulés. Les données issues des simulations (sur les puissances de chauffe et les températures) permettent d'élaborer un grand nombre possible de modèles ARX reliant les différentes grandeurs entre elles, selon un processus « aveugle » se passant de toute considération physique restrictive. Les paramètres de ces modèles sont estimés. Par la suite, seuls quelques modèles ARX 1D sont sélectionnés selon des critères physiques et pratiques d'une part et selon un critère mathématique basé sur celui d'Akaike d'autre part. Les modèles ARX finaux sont alors éprouvés sur des données expérimentales fournies par l'industriel afin de valider ou d'infirmer leur performance. Ces ARX monodimensionnels, fournissant une information locale et étant déjà pertinents dans certaines zones de la charge tridimensionnelle, pourront dans une future étude être extrapolés à des cas 2D puis 3D.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-020>

Comparaison de méthodes de modélisation système d'un stockage de vapeur par Matériaux à Changement de Phase

Teddy Chedid^{1,*}, Erwin Franquet², Pierre Garcia¹, Jérôme Pouvreau¹, Jean-Pierre Bédécarrats³

* ✉ : teddy.chedid@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DT_CH, 38000 Grenoble, France

² Université Côte d'Azur, Polytech'Lab, France

³ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, LaTEP, Pau, France

Mots clés : Vapeur, Stockage thermique, MCP, Modélisation multi-échelles.

Résumé :

La vapeur figure parmi les fluides caloporteurs les plus répandus dans l'industrie grâce à sa capacité à transporter une grande quantité de chaleur. Dans de nombreux procédés, la fluctuation de la production et de la demande de cette vapeur rend indispensable l'intégration d'une solution de stockage thermique qui permet d'adapter la puissance produite par la source de chaleur aux besoins du procédé, et in fine de réaliser des économies d'énergie. Parmi les technologies envisagées, le stockage de type tubes-calandre par Matériau à Changement de Phase (MCP) est intéressant pour les applications de stockage de vapeur. Cela est dû à la capacité du MCP à stocker l'énergie à une température quasi constante, ce qui permet de limiter la perte de pression et de minimiser la différence de température de la vapeur entre charge et décharge. Néanmoins, la modélisation d'un système de stockage tubes-calandre par MCP exige des ressources de calcul conséquentes pour modéliser de façon représentative la géométrie et les phénomènes physiques du système. Par conséquent, la mise au point de modèles permettant de dimensionner rapidement et avec précision un module de stockage est essentielle pour faciliter le passage de cette technologie dans l'industrie.

Cette étude vise donc à développer et valider une méthode de modélisation rapide d'un stockage de vapeur par MCP. Le modèle développé représente à la fois l'écoulement diphasique d'eau liquide/vapeur à l'intérieur du tube ainsi que les transferts de chaleur dans la paroi du tube et dans la zone contenant un matériau homogène du MCP et des ailettes. L'intérieur du tube est discrétisé en 1D dans la direction de l'écoulement. Une homogénéité de la vitesse et de la température est supposée entre les phases liquide et gazeuse. A l'extérieur du tube, deux approches sont étudiées pour prédire les transferts thermiques et le changement de phase au sein du matériau homogène MCP + ailettes. La première méthode, décrite dans une thèse précédente, consiste à discrétiser radialement le domaine. Le changement de phase quasi isotherme du MCP est pris en compte par une capacité calorifique (C_p) équivalente. Les effets de la convection naturelle du MCP liquide ainsi que de la géométrie des ailettes sur le transfert de chaleur dans le MCP sont intégrés en calculant une conductivité thermique équivalente obtenue par une corrélation sur les transferts thermiques au niveau de la paroi externe du tube issue de calculs de mécanique des fluides numériques (CFD). La deuxième méthode consiste à ne pas mailler ce domaine dans la direction radiale, cela a pour intérêt de réduire davantage la complexité de la modélisation et par conséquent le temps de calcul. La corrélation issue de la CFD sert à estimer le flux échangé au niveau de la paroi du tube qui permet de prédire l'avancement de la fusion du MCP. Enfin, le modèle de l'écoulement diphasique couplé avec les modèles du transfert radial côté matériau homogène sont validés avec des résultats expérimentaux pour des cas de stockage en charge.

Modélisation du chauffage de polymères par micro-ondes : approches numérique et expérimentale

Pouya Jafari Fesharaki¹, M'Hamed Boutaous¹, Shihe Xin¹

* ✉ : pouya.jafari-fesharaki@insa-lyon.fr

¹ CETHIL, INSA-Lyon

Mots clés : simulation, modélisation, électromagnétique, équations de Maxwell, transferts thermiques, interaction micro-ondes polymère.

Résumé :

L'amélioration des réactions chimiques et le chauffage des polymères sous l'effet de micro-ondes (μ ondes) ont attiré de plus en plus d'attention au cours des deux dernières décennies. L'utilisation des μ ondes pour chauffer des polymères présente des avantages potentiels par rapport au traitement conventionnel (chauffage par conduction et advection). Dans l'industrie de transformation des polymères et composites, le chauffage conventionnel, notamment par collier chauffant, est peu efficace et énergivore, car les matériaux sont peu diffusants et les temps caractéristiques en thermique sont très longs. Dans le chauffage par μ ondes, l'onde électromagnétique (EM) a la capacité de pénétrer et même traverser la plupart des polymères, induisant une distribution d'énergie due à la polarisation moléculaire, conduisant à un chauffage volumétrique rapide. Des études sur divers matériaux ont mis en évidence une consommation d'énergie réduite, une homogénéité des températures (moins de gradient thermique dans le matériau), conduisant à une amélioration de l'homogénéisation des propriétés des matériaux. Par ailleurs, il a été démontré que l'interaction μ onde-polymère accélère les réactions de polymérisation. De ce fait, l'étude du chauffage des polymères par μ ondes et de ses effets sur la rhéologie des polymères et la polymérisation devient un sujet important qui pourrait notamment avoir des applications en pratique industrielle.

Dans cette étude, nous présenterons une modélisation et simulation de l'interaction microondes- polymères, par le couplage entre équation de propagation des ondes EM (équations de Maxwell) et l'équation du transfert de chaleur dans les matériaux. Toutes les propriétés thermo-mécaniques et thermoélectriques du matériau sont dépendantes de la température. Les propriétés diélectriques (permittivité) des polymères étant très faibles mais très sensibles à la température, une étude paramétrique permet de définir les conditions optimales de chauffage de ces matériaux ainsi que de quantifier les effets des différentes caractéristiques. La permittivité est mesurée au préalable grâce un banc expérimental utilisant la méthode de perturbation de cavité et à la définition de modèle de permittivité effective.

Afin de valider le modèle, un second banc expérimental est aussi réalisé. Il permet de mesurer les évolutions de températures sous μ ondes, dans des matériaux dans des conditions contrôlées. Ce banc nous fournira dans un premier temps, le socle d'une validation expérimentale d'un model numérique de couplage des équations de Maxwell avec celle d'énergie (chaleur) dans l'objectif d'une extrapolation pour des cas pratiques.

Cette étude aborde également les concepts numériques des transferts de chaleur dans les polymères sous μ ondes ainsi que les suivies des paramètres quantifiables dans les cas numérique et expérimental tels que la température, le coefficient de réflexion de puissance EM et l'amplitude de champ électrique.

Simulation du refroidissement d'une zone représentative d'un assemblage de cœur de REP par un écoulement dispersé vapeur/gouttes

Juan Esteban Luna Valencia^{1,*}, Arthur V.S Oliveira², Alexandre Labergue², Tony Glantz¹, Michel Gradeck²

* ✉ : lunavale1@univ-lorraine.fr

¹ IRSN

² Université de Lorraine

Mots clés : APRP, COLIBRI, Mechanistic model, NECTAR, Polydisperse flow, Thermohydraulic

Résumé :

Lors d'un accident hypothétique de perte de réfrigérant au primaire (APRP) dans un réacteur à eau pressurisée (REP), de l'eau est injectée dans le plenum du cœur afin de refroidir les assemblages. Due à l'élévation de la température des assemblages au cours du transitoire, un écoulement constitué de vapeur avec des gouttes dispersées se forme en aval du front de remouillage. Cet écoulement permet de refroidir les parties d'assemblages non encore immergées par l'eau. La caractérisation des transferts thermiques dans ces zones est indispensable pour s'assurer que les assemblages puissent être refroidis même s'ils sont déformés. Afin de caractériser ces transferts, une boucle expérimentale, appelée COLIBRI, a été construite. Cette boucle a permis de déterminer le flux de chaleur dégagé par un écoulement vapeur/gouttes à l'échelle d'un sous-canal combustible intact ou déformé en conditions thermo-hydrauliques typiques d'un APRP. D'autre part, COLIBRI a permis la validation d'un code, appelé NECTAR, qui a été développé dans le but de calculer le transfert de chaleur et de masse, ainsi que la dynamique des gouttes dans un écoulement polydispersé dans les mêmes conditions géométriques et thermo-hydrauliques que COLIBRI. L'analyse des premiers résultats expérimentaux avec NECTAR a montré que la convection entre la vapeur et la paroi est le mécanisme de transfert le plus important dans le calcul du flux interne de chaleur mais le transfert de chaleur par impacts de gouttes à la paroi est également non négligeable. Ces résultats obtenus avec une température d'entrée de vapeur et une fraction volumique des gouttes faibles qui ne permettent pas de valider l'ensemble des corrélations sur toute la gamme des écoulements attendus en APRP ($T_v=180^\circ\text{C}$ et $\alpha_g 10^{-4}$). Afin d'analyser l'influence des différents mécanismes de chaleur dans ces configurations thermo-hydrauliques étendues, la boucle expérimental COLIBRI a été modifiée, afin d'augmenter la fraction volumique des gouttes ($\alpha_g 2.10^{-3}$) et la température d'entrée de la vapeur ($T_v= 500^\circ\text{C}$). Finalement, le but de cet article est de comparer les résultats du code NECTAR avec les données expérimentales obtenues avec la nouvelle configuration de la boucle COLIBRI (sous-canal non bouché de 100mm de longueur). La dissipation thermique interne totale est évaluée et les contributions des différents mécanismes impliqués sont analysées.

Simulation numérique de dépôts de particules dans un échangeur par approche Euler – Lagrange

Souria Hamidouche¹, Rémi Gautier¹, Kousseila Atsaid¹, Rafik Ouchene², Serge Russeil¹

* ✉ : souria.hamidouche@imt-nord-europe.fr

¹ IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Université de Lille, CERI Energie Environnement, F-59000 Lille, France

² ELISA Aerospace, F-02100, Saint Quentin

Mots clés : Euler - Lagrange, URANS, LPT, Encrassement, Echangeur

Résumé :

Dans un contexte de transition énergétique, les objectifs nationaux et internationaux contraignent de trouver de nouvelles solutions et de repenser tout le cycle de vie des composants et systèmes énergétiques. Les pistes envisagées actuellement reposent notamment sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et les énergies renouvelable et de récupération (EnR&R) via notamment la valorisation de la chaleur fatale, l'énergie solaire thermique, etc. L'optimisation des échanges thermiques dans les récupérateurs de chaleur fatale s'appuie souvent sur le développement de surfaces d'échange à géométries complexes. Cependant l'encrassement reste un problème récurrent et très coûteux, à la fois sur le plan économique (maintenance) et énergétique (efficacité à long terme) qui est très peu pris en compte. Ainsi dans les travaux publiés visant à optimiser une géométrie pour intensifier les échanges de chaleur par voie numérique, les phénomènes d'encrassement sont rarement intégrés dans le processus d'optimisation. L'objectif de cette étude est de développer une approche de modélisation numérique visant à analyser les mécanismes locaux de déposition de particules solides en suspension dans un flux gazeux et permettant de mieux appréhender les phénomènes d'encrassement dans des composants thermiques à géométrie complexe en particulier un échangeur munis de tubes ailetés.

Dans la présente étude, le dépôt de particules solides est investigué dans un échangeur à tubes elliptiques et ailettes planes continues par l'approche Euler-Lagrange en mettant en œuvre la méthode des volumes finis. L'écoulement turbulent moyen du flux gazeux chargé en particules est prédit par des simulations URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) couplées à un suivi lagrangien des particules (Lagrangian Particle Tracking : LPT). Les interactions particules/turbulence sont prédites à l'aide d'un modèle de dispersion stochastique et l'hypothèse "two way coupling" est utilisée. La déposition des particules est calculée grâce à l'implémentation de modèles issus de la littérature qui prennent en compte la vitesse critique et l'angle de dépôt d'une particule. Les effets de la variation du nombre de Reynolds, du modèle stochastique et de la taille des particules sur la déposition ont été investigués, de même que l'influence de différents paramètres géométriques (espacement inter-ailettes et l'ellipticité des tubes). Enfin, l'effet du dépôt sur le transfert thermique est mis en évidence grâce au développement d'un modèle simplifié 1D. Les premiers résultats obtenus montrent la pertinence de l'approche développée : elle permet d'estimer la distribution locale sur les surfaces d'échange du taux de dépôt lié à chaque paramètre, et in fine l'effet d'une couche d'encrassement sur le nombre de Nusselt local et global dans une configuration géométrique tridimensionnelle complexe d'un échangeur à tubes elliptiques et ailettes planes continues.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-079>

Insight into prediction of unsteady forced convection in a porous straight channel subjected to an inlet flow modulation : A REV lattice Boltzmann investigation

Hassane Naji¹, Riheb Mabrouk², Hacem Dhahri²

* ✉ : hassane.naji@univ-artois.fr

¹ Univ. Artois, IMT Lille Douai, Junia, Univ. Lille, ULR 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement(LGCgE), F-62400 Béthune, France

² Laboratoire d'Études des Systèmes Thermiques et Énergétiques (LESTE), École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Rue Ibn Jazza, 5019 Monastir

Mots clés : latent heat thermal energy storage system, Brinkman-Forchheimer extended Darcy model, two-energy model, Pulsating flow, Energetic and exergetic efficiencies, thermal lattice Boltzmann method

Résumé :

The technologies involving unsteady forced convection with phase change in porous media with unsteady inlet flow are increasingly investigated. To gain further insight into this issue, the continuity, momentum and two-energy equations (LTNE model) describing the flow in the melted PCM and heat transfer between metal foam and PCM are solved within an open-ended straight porous channel as a latent heat thermal energy storage system (LHTES). The system is modulated by sin waves superimposed on a time-varying input flow. From a technical point of view, heat transfer under pulsed flow is often found in various industrial applications such as finned heat sinks for electronic chipsets, filtration devices, pulsed tube cryo-coolers, ducted air conditioners, aerosols transport in human respiratory tract, blood flow in the vessels, etc.

A thermal mesoscopic method at a representative elementary volume scale (REV) level is taken up to numerically address such a problem. Simply put, the thermal lattice Boltzmann method (TLBM) enthalpy-based is employed to deal the Brinkman-Forchheimer extended Darcy (BFD) model and the two-energy model. On the other hand, the multi-distribution functions (MDF) model was adopted to calculate the dynamic and thermal fields. Relevant values of the pulse amplitude A , porosity and Strouhal (St) number were deemed.

The comprehensive analysis of the results suggests that small amplitude speed up the melting rate and the heat spread where forced convection acts in the domain. In addition, the overall irreversibility of the system is reduced during the charging process with a low St number and a lower amplitude and during the discharging process with low St and larger amplitude. Furthermore, it turned out that an unsteady convective flow better improves the unit energy and exergy performance rather than a pulsed flow. Further detailed insights on intensity, phase field evolution and streamlines, and overall characteristics in terms of average entropy generation rate (N_{sav}), energetic and exergetic efficiencies are also exhibited.

To sum up, the REV-scale enthalpy-based TLBM has been successfully applied to two-dimensional porous LHTES. In particular, solutions are shown to be achievable with today's computing resources and to be extremely beneficial, shedding new light on phenomena otherwise inaccessible experimentally.

A REV-scale assessment of metal foam porosity effect on a PCM's melting in an latent heat energy storage unit

Riheb Mabrouk^{1,*}

* ✉ : mabroukriheb@gmail.com

¹ Laboratoire d'Études des Systèmes Thermiques et Énergétiques (LESTE), École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Rue Ibn Jazza, 5019 Monastir

Mots clés : Phase change material, Forced convection, Porous metal foams, Thermal lattice Boltzmann method

Résumé :

Latent heat thermal energy storage (LHTES) has become both a promising and attractive thermal energy storage (TES) method that can achieve high energy storage density and near constant temperature during operation while balancing the gap between energy supply and demand.

This paper deals with the numerical investigation of the enhancement of heat transfer under forced convection in an open-ended horizontal channel filled with a porous structure (metal foam) and a phase change material (PCM : paraffin). The Forchheimer-Brinkman extended Darcy unsteady flow model (generalized Navier-Stokes equations) is assumed to simulate flow and heat transfer occurring within the porous medium for an unsteady forced convection. These are completed by two energy equations based on the local thermal non-equilibrium (LTNE) condition.

Simulations are done using the thermal Single Relaxation Time (T-SRT) lattice Boltzmann Method (LBM) at the representative elementary volume (REV) scale. All lattice Boltzmann equations (LBE) involved are discretized according to the D2Q9 model using three distribution functions. Numerical results were performed to present the effects of porosities (0.5-0.9) on the dynamic and thermal fields, Bejan number and melting front for the sequent Re range (200-400) during charging (melting) process.

The reliability of the implemented in-house code has been evinced through a comparison of some preliminary results with some results from the literature. Based on the results achieved, it can be stated that the melting process under laminar forced convection is speeded up by decreasing the porosity (=0.5) and increasing the Reynolds number. In addition, high porosity (=0.9) decelerates the front progression owing to the permeability of the metal structure. While, increasing the porosity intensifies the thermal conductivity of the medium and then, induces more energy stored in a short time within the same volume of the support. Thereby, at high Re (=400), it can be stated that the melting phenomenon rate is much faster owing the interstitial heat transfer. However, the heat transfer irreversibility dominates the overall irreversibility of the system.

Finally, it can be concluded that the implemented thermal lattice Boltzmann method represents an appropriate tool that can handle unsteady forced convection melting problems in latent energy storage unit.

Tests et améliorations de modèles mixtes de Simulation des Grandes Échelles d'un écoulement à fort nombre de Reynolds en canal asymétriquement chauffé

Martin David^{1,*}, Adrien Toutant¹, Françoise Bataille¹

* ✉ : martin.david@promes.cnrs.fr

¹ Laboratoire PROMES CNRS

Mots clés : Simulations des grandes échelles, Modélisation de la turbulence, Transferts thermique, Chauffage asymétrique

Résumé :

L'étude concerne l'évaluation et l'amélioration de modèles de Simulation des Grandes Échelles (SGE) dans des conditions de fort chauffage asymétrique d'un écoulement turbulent en canal bi-périodique caractérisé par de hauts niveaux de température. Ces travaux s'inscrivent dans le contexte des tours solaires à concentration et visent à fournir un outil fiable permettant d'étudier l'intensification des transferts thermiques dans les récepteurs solaires à gaz sous-pression tout en ayant un coût de calcul raisonnable. Pour ce faire, des SGE sont effectuées dans des conditions proches de celles de fonctionnement des récepteurs solaires et sont comparées à des résultats de Simulation Numérique Directe (SND). Les températures des deux parois du canal sont fixées à 900 K et 1300 K et le nombre de Reynolds de frottement est proche de 1000. Le canal est périodique suivant les directions longitudinale et transversale. Il est discrétisé par un maillage homogène dans les directions périodiques et suivant une loi en tangente hyperbolique dans la direction perpendiculaire aux parois. Les équations de Navier-Stokes sont résolues sous l'hypothèse des bas nombres de Mach. Le couplage entre la masse volumique et la température est considéré grâce à l'équation des gaz parfaits et les propriétés du fluide sont thermodépendantes. Dans les conditions étudiées, caractérisées par de forts gradients de température, le terme de sous-maille associé à la corrélation vitesse-masse volumique doit être modélisé en plus de celui associé à la corrélation vitesse-vitesse. Ainsi, les SGE sont effectuées avec un modèle pour chacun de ces deux termes. Les termes de sous-maille modélisés en SGE sont ajoutés aux quantités associées dans le but de réaliser une comparaison rigoureuse avec les résultats de SND. La modélisation de ces termes peut se faire selon deux approches. Les modèles dits fonctionnels supposent un transfert d'énergie unilatéral des grandes structures vers les petites échelles par un processus analogue à la diffusion moléculaire. Ils reposent sur le concept de la viscosité de sous-maille. Les modèles structurels supposent que la structure du tenseur construit sur la base des échelles sous-mailles est analogue à celle issue des plus petites échelles résolues. Lors de cette étude, ces deux approches sont combinées dans le but de tirer bénéfice des avantages de chacune : la modélisation fonctionnelle est généralement efficace pour déterminer les transferts d'énergie vers les petites échelles de turbulence. L'approche structurelle, quant à elle, donne une bonne estimation de la structure du tenseur de sous-maille. Les modèles de turbulence sont évalués par des tests a posteriori permettant de tenir compte de l'ensemble des erreurs engendrées par la résolution des équations filtrées de Navier-Stokes et par la discrétisation des équations. Ils permettent donc d'apprécier les performances des modèles en conditions réelles. Des moyennes temporelle et spatiales dans les directions d'homogénéité sont appliquées aux résultats. Les statistiques de la turbulence sont tracées en fonction de la distance entre les parois du canal. Les résultats observés sont les grandeurs moyennes, les corrélations vitesse-vitesse et les corrélations vitesse-température.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-009>

Modélisation numérique du transport de particules fines dans un milieu gazeux en considérant l'effet thermique

Abdelkader Izerroukyene¹, David Uystepuyst², François Beaubert², Damien Méresse², Céline Morin², Sofiane Khelladi³

* ✉ : abdelkader.izerroukyene@uphf.fr

¹ Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 – LAMIH, 59313 Valenciennes

² Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 – LAMIH, 59313 Valenciennes & INSA Hauts-de-France, 59313 Valenciennes

³ Arts et Métiers Institute of Technology, CNAM, LIFSE, HESAM University, 75013 Paris

Mots clés : modélisation numérique - particules - OpenFOAM - CFD - thermique

Résumé :

Les effets sanitaires liés à la pollution atmosphérique et les enjeux de santé publique qui lui sont associés nécessitent des études scientifiques sur les écoulements des particules issues des applications de la vie quotidienne. Le but de la présente étude est de développer des modèles numériques génériques capables de représenter les écoulements complexes de fluides chargés en particules fines de différentes natures (concentration, taille, composition) comme des particules issues de la combustion dans une chaudière à biomasse (écoulement fluide-particules dans la cheminée) et des particules issues du freinage des trains (diffusion dans l'environnement proche : gare/station de métro).

Pour cela, nous avons opté pour le développement d'un solveur OpenFOAM prenant en considération la collision des particules et l'effet thermique. La prise en compte de la collision est nécessaire car le milieu dans l'étude est dense avec une fraction volumique supérieur à 0,001. Quand à l'effet thermique, la variation importante de la température dans la cheminée de la chaudière influe sur le déplacement des particules. Pour valider ce solveur, nous avons comparé nos résultats numériques avec deux articles de références portant sur la même étude mais utilisant pour l'un une approche numérique et pour l'autre une approche expérimentale.

L'étude représente un écoulement laminaire d'eau chargée en particules nanométriques de TiO₂ dans un tube cylindrique droit en utilisant un couplage Euler-Lagrange. Le transfert thermique convectif et les effets des concentrations des particules ont été pris en considération par rapport à la phase continue du fluide et à la variation de la conductivité thermique. Nos résultats numériques sont comparés avec les données numériques et expérimentales des deux articles de référence. Une bonne concordance est obtenue sur les champs de vitesse, de température ainsi que sur le coefficient de convection thermique.

Design of the HIFU thermal ablation treatment of cancer with stochastic simulations

Rodrigo Silva², Mohsen Alaeian², Helcio Orlande^{1,*}

* ✉ : helcio@mecanica.coppe.ufrj.br

¹ Federal University of Rio de Janeiro, Mechanical Engineering Program and Oncobiology Program

² Federal University of Rio de Janeiro, Mechanical Engineering Program

Mots clés : Design under uncertainties, Markov Chain Monte Carlo, Metropolis-Hastings algorithm, bioheat transfer

Résumé :

High intensity focused ultrasound (HIFU) is a non-invasive technique that can be used for the thermal ablation of tumors with minimum side effects. During the heating procedure, the concentration of energy may not be properly performed, since the increase of temperature depends on different tissue parameters that are not previously known. Therefore, it can be difficult to obtain the desired results without having any prior information regarding these parameters. In order to deal with the uncertainties associated to the physical model, this work presents the design under uncertainties of the thermal ablation of tumors heated by HIFU. Two-dimensional regions with tumors of different sizes were considered here. The acoustic problem was simulated with the numerical solution of the mass and momentum conservation equations, in order to evaluate the heat generation rate provided by the ultrasound after reaching the steady state condition. The heat transfer problem involving biological tissues was then solved with the explicit finite differences method, where the effects of blood perfusion and metabolism were neglected. An Arrhenius' model was adopted to compute the thermal effects provided to the tissues, so it was possible to calculate the probability of having thermally damaged cells after the heating procedure. The heating protocol was then optimally designed under uncertainties in the model parameters by using the Markov Chain Monte Carlo method, implemented via the Metropolis-Hastings algorithm with sampling by block of parameters. The heating period and the position of the ultrasound transducer were considered as design variables, with prior information modeled by uniform distributions. Physical properties that appear in the mathematical formulation assumed prior information modeled by normal distributions, so that all the uncertainties related to the group of parameters that does not include the design variables were formally taken in account. The likelihood was modeled as a beta distribution for the probability of cell death due to the heating. The obtained results revealed that the present approach could deal with all associated uncertainties and provided a robust design for the problem under analysis.

Implémentation de modèles de boîte noire adaptés pour la caractérisation des performances de refroidisseurs commerciaux à sorption

Amín Altamirano¹, Charles Maragna², Brice Tremeac¹

* ✉ : amin.altamirano-cundapi@lecnam.net

¹ Le Cnam/Lafset

² BRGM

Mots clés : système à sorption, absorption, adsorption, dessiccation, boîte noire, équation caractéristique, fonction de Carnot

Résumé :

Compte tenu de l'augmentation actuelle de la demande énergétique mondiale liée au refroidissement dans le secteur du bâtiment (notamment dans des climats tropicaux), l'utilisation de refroidisseurs faisant appel à des énergies renouvelables devient une nécessité plus qu'une option. Une source d'énergie spécialement intéressante est la géothermie profonde à des températures modérées (entre 70 et 120°C) pour faire fonctionner des refroidisseurs à sorption. Les refroidisseurs à sorption peuvent être divisés en deux grandes catégories : à cycle fermé (dans lequel le fluide frigorigène n'est pas en contact direct avec l'air à refroidir, à savoir les systèmes à absorption et à adsorption) et à cycle ouvert (dans lequel le fluide frigorigène est en contact direct avec l'air refroidi, à savoir les systèmes de refroidissement par évaporation dissociative ou DEC).

La modélisation des systèmes à sorption est d'une importance fondamentale pour l'évaluation de leurs performances (en conditions dynamiques et sur des temps longs), et notamment lorsqu'ils sont couplés à d'autres systèmes avec un besoin et une disponibilité variables (bâtiment, stockage, source à air...). Selon le degré de compréhension physique de la machine, les différents modèles peuvent être divisés classiquement en trois catégories : boîte blanche (physique), boîte grise (semi-empirique), et boîte noire. Dans les cas où le potentiel des refroidisseurs à sorption doit être estimé pour une application spécifique, il n'est pas nécessaire de comprendre les phénomènes physiques à l'intérieur de la machine et, par conséquent, les modèles de boîte noire sont probablement l'outil le plus approprié pour la modélisation de ces machines étant donné leur simplicité, leur précision et leur facilité de mise en œuvre. Parmi les possibilités, il existe deux options qui pourraient être particulièrement intéressantes : la méthode de l'équation caractéristique (EC) adaptée et le modèle de la fonction de Carnot (MFC). En effet, ces méthodes utilisent des paramètres fonction des températures des sources thermiques (couramment utilisées par les chercheurs et les fabricants pour leur caractérisation) pour situer les différents régimes de fonctionnement des machines. Ces méthodes de modélisation n'ont été étudiées que dans le contexte des refroidisseurs à absorption. Néanmoins, la caractérisation des autres options de refroidisseurs à sorption est également nécessaire pour une comparaison entre les différentes solutions disponibles. Le présent travail a consisté donc à modéliser des refroidisseurs à sorption commerciaux (un refroidisseur à absorption à simple étage, un refroidisseur à adsorption à simple étage et un système DEC) à l'aide des méthodes MFC et EC adaptée. Le MFC a présenté les erreurs d'estimation les plus élevées ; ceci est dû au fait que le COP_{carnot} est un paramètre physique qui ne peut pas être ajusté (comme dans le cas de l'EC adaptée). Compte tenu du fait que le COP_{carnot} est un paramètre physique qui peut être utilisé pour comparer des machines de différentes géométries ou fluides de travail dans un domaine qui est uniquement fonction des températures, une nouvelle méthode de modélisation qui emploie le COP_{carnot} de la machine pourrait être nécessaire pour obtenir des modèles avec une meilleure précision.

Réduction modale d'un modèle non-linéaire de composant électronique : Application à une micro-puce activée de 4 sources

Fatme Mustapha¹, Valentin Bissuel¹, Frédéric Joly², Olivier Quemener²

* ✉ : fatme.mustapha@thalesgroup.com

¹ Thales Global Services, 19-21 Avenue Morane Saulnier, Vélizy-Villacoublay, France

² Université Paris-Saclay, Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique d'Evry, 40 rue du Pelvoux, CE1455

Mots clés : Composant électronique, modèle non-linéaire, réduction modale.

Résumé :

Durant ces dernières années, le comportement thermique de composants électroniques a fait l'objet de recherches intensives. En effet, la complexité et la miniaturisation croissante des composants imposent une modélisation fine pour obtenir une précision satisfaisante de la température interne maximale. Cette finesse dans la modélisation se traduit par des maillages de grandes tailles comportant un grand nombre de degrés de liberté. La réduction de modèle s'est alors imposée pour garder un temps de calcul compatible avec les contraintes industrielles. Jusqu'à présent, la majeure partie des travaux s'est concentrée sur la réduction de modèles linéaires. Cependant, la micro-puce, la partie active et donc cruciale du composant, est faite dans des matériaux dont la conductivité diminue fortement avec la température, ce qui accentue l'augmentation de la température maximale. Par exemple, sur une plage de température allant de 250 à 450 K, la conductivité du silicium varie de 190 à 85 W/m/K et celle du nitrure de gallium de 210 à 90 W/m/K. Pour des simulations transitoires modélisant des cycles d'activation-désactivation, il est nécessaire de prendre en compte cette variation.

Dans cette communication, la création d'un tel modèle réduit sera présentée. Parmi les différentes méthodes utilisées à l'heure actuelle pour créer les modèles réduits, figurent les méthodes modales. Elles consistent à rechercher la solution sous la forme d'une somme pondérée de champs élémentaires, appelés modes. L'introduction de la non-linéarité impose des allers-retours continus entre l'espace physique (pour calculer la température et réévaluer la conductivité thermique des matériaux) et l'espace modal, ce qui diminue fortement l'efficacité du modèle réduit en termes de temps de calcul.

Pour répondre à ce problème, nous utiliserons la méthode de réduction modale en approchant la loi non-linéaire de comportement de la conductivité par une fonction affine ce qui permet d'éviter des allers-retours successifs entre les espaces physiques et modaux. Ce modèle sera comparé au modèle éléments finis avec la vraie loi de comportement de la conductivité.

L'application considérée est une micro-puce de 1,5x1,5x0,1 mm activée par 4 sources de dissipation volumique homogène de 0,2x0,2x0,02 mm. La fiabilité des puces étant prépondérante dans un design industriel, la précision du modèle réduit est importante. En effet un écart de prédiction de 10°C réduit la durée de vie d'une puce d'un facteur 2. Des gains de temps de l'ordre d'un facteur 1000 sont obtenus, pour un écart de l'ordre de 1°C sur la température maximale.

Optimisation de forme d'échangeurs thermique en régime turbulent

Nicolas Huc^{1,*}

* ✉ : nicolas.huc@comsol.fr

¹ COMSOL France

Mots clés : optimisation simulation échangeur de chaleur

Résumé :

Ce projet vise à utiliser la méthode ALE pour optimiser la forme d'échangeurs thermiques afin de maximiser l'énergie échangée par deux fluides. La méthode ALE permet la différentiation symbolique et donc l'utilisation d'algorithmes d'optimisation basés sur le gradient tels que MMA, SNOPT, ou IPOPT, pour une convergence rapide. En outre, l'utilisation de la méthode ALE permet la représentation explicite des domaines et des frontières du modèle. Ainsi la fonction objectif est évaluée sur le modèle direct, sans approximation.

Ceci est particulièrement intéressant pour un écoulement turbulent où le traitement à la paroi est déterminant pour la précision de la simulation.

Cette approche est testée sur une cellule d'un échangeur à plaque pour optimiser la forme de la plaque séparant les deux fluides afin de maximiser l'énergie échangée pour une perte de charge donnée. Afin de garantir une déformation suffisamment lisse un filtre est appliqué sur le champ de déformation calculé.

Les résultats attendus sont :

- la forme optimisée de l'échangeur,
- les champs de vitesse, pression et température dans les deux cavités,
- les températures des parois de l'échangeur.

L'énergie échangée dans la configuration optimisée sera comparée avec l'énergie échangée en utilisant une plaque de séparation plane pour la même perte de charge.

Bien que des pistes existent pour l'optimisation en régime transitoire, le projet se concentre actuellement sur l'optimisation en régime stationnaire. La méthode employée est applicable pour d'autres applications en thermique, avec ou sans écoulements et pour des régimes laminaires ou turbulents. Il n'y a pas de limitation a priori sur la taille ou la forme de la géométrie, seulement la méthode ne permet pas d'optimisation qui correspondrait à un changement de topologie. Les propriétés matériaux peuvent être constantes ou fonction de quantités calculées par le modèle, comme la température. L'écoulement peut être modélisé comme compressible ou incompressible.

Simulation numérique du comportement du corps humain en état de stress thermique

Pierre Michaux¹, Benjamin Gaume^{1,*}, Olivier Quéméner¹

* ✉ : b.gaume@iut.univ-evry.fr

¹ LMEE, Univ Evry, Université Paris-Saclay, 91020, Evry, France.

Mots clés : Thermique du corps humain ; Modèle réduit ; Éléments finis.

Résumé :

Le stress thermique a toujours revêtu un fort intérêt dans un contexte professionnel, militaire ou sportif. Dans le contexte du réchauffement global du climat, une telle évaluation des risques d'exposition à la chaleur va être dans les années à venir un sujet d'actualité pour la santé publique en général, et plus précisément en ce qui concerne le confort thermique notamment dans l'habitat.

Beaucoup de choses restent à faire dans ce domaine et l'idée est ainsi de comprendre le comportement physiologique du corps humain face la chaleur, et de mettre en place différentes approches anticipatoires afin de pouvoir prévoir l'arrivée du coup de chaud. Jusqu'à présent, beaucoup de travaux ont été d'ordre physiologique, basés sur l'évaluation du retentissement du stress thermique sur l'organisme (fréquence cardiaque, température profonde, ...) en fonction de classes de sujets (indice de masse corporelle, âge, sexe...). Une autre approche est biophysique, dans laquelle le corps humain est considéré comme un système thermodynamique ouvert.

L'objectif de ce work in progress est d'aborder cette problématique biophysique par une approche numérique avec un modèle réduit modale. Compte tenu de la complexité d'un corps complet, nous proposons d'étudier ici une portion de jambes. Ainsi, à partir d'images tridimensionnelles d'une portion de jambes issues de scanners médicaux, un modèle discret maillé en 3D a été construit. Ce modèle a permis d'effectuer différentes simulations éléments finis et de montrer la validité de ce jumeau numérique. Afin de réduire le temps de calcul, nous avons appliqué la technique de réduction modale qui permet d'obtenir rapidement l'évolution de tout point en fonction du temps pour une géométrie complexe comme celle présentée ici. Appliquée à la portion de jambes, la méthode de réduction modale a permis de réduire significativement le temps de calcul et permet d'envisager un couplage à des modèles physiques plus complexes voir une extension du process à l'ensemble d'un corps humain.

Modélisation et validation expérimentale d'un bassin sportif à la Réunion

Maïté Bernhard¹, Olivier Marc², Emmanuel Quilichini³, Jean Castaing-Lasvignottes²

* ✉ : maite.bernhard@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT et Sunny Shark

² Laboratoire PIMENT

³ Sunny Shark

Mots clés : piscine, modélisation, expérimentation, validation expérimentale

Résumé :

Les piscines consomment environ 2800 kWh/m² de plan d'eau en France : chauffage, déshumidification et production d'eau chaude sanitaire des douches comprises. Les rapports du GIEC préconisent une diminution de 45 % des émissions de CO₂ d'ici 2030 par rapport à 2010 et d'atteindre la neutralité d'ici 2050 afin de limiter le réchauffement climatique à 1.5°C. L'optimisation énergétique des piscines passe par des conceptions plus économes mais aussi par une amélioration des installations existantes, tout en conservant voire améliorant le confort des usagers. Notre travail a pour objectif de définir la meilleure stratégie de gestion du chauffage des piscines collectives en utilisant une simulation du comportement dynamique de celle-ci au cours du temps. Cela nécessite alors un modèle fiable pour mettre en place un contrôle commande prédictif du chauffage des piscines. Toutes les caractéristiques doivent être prises en compte : la géométrie des lieux, le comportement des différents usagers, la météo ainsi que les nombreux phénomènes qui contribuent à l'évolution de la température de l'eau du bassin. Les échanges de chaleur mis en jeu sont relatifs aux transferts entre l'eau et le sol au travers de la paroi, aux échanges entre l'eau et l'air (convection, évaporation), aux échanges radiatifs entre l'eau et l'environnement.

Un bassin sportif extérieur de 12,5 mètres par 25 mètres située à une altitude de 470 mètres à la Réunion a été instrumentée de telle sorte à valider nos modèles. Les mesures effectuées concernent : la température et le niveau de l'eau du bassin, l'irradiation solaire, le rayonnement infrarouge de la voûte céleste, la température et l'humidité de l'air ainsi que la vitesse et la direction du vent. Les résultats nous montrent une bonne adéquation entre le modèle et les valeurs expérimentales à la fois en termes de flux et de température de l'eau du bassin, de nuit comme de jour.

Présentation d'un cycle thermomécanique innovant mettant en œuvre des écoulements pulsés de fluide organique destiné à la récupération de chaleur fatale basse température

Mathias Fonlupt^{1,*}

* ✉ : mathias.fonlupt@doct.uliege.be

¹ Laboratoire de thermodynamique de l'Université de Liège

Mots clés : Thermodynamique, Dynamique des Fluides, Écoulement pulsés, Fluide Organique, Chaleur Fatale, Simulation 0D, Moteur PULSE, ENTENT

Résumé :

Les chaleurs fatales rejetées par les process humains, qu'ils soient industriels ou destinés à la production d'énergie, représentent des puits d'énergie qui sont aujourd'hui sous-exploités. Les technologies actuelles d'ORC (Cycle Organique de Rankine) permettent la valorisation de chaleurs dont les températures sont supérieures à 150°C mais peinent à trouver leur rentabilité sur des températures inférieures.

C'est dans ce contexte que la société ENTENT développe le moteur PULSE, destiné à la valorisation de chaleur fatale de très basse température (60 à 150°C). Le moteur PULSE est basé sur un cycle thermodynamique innovant dérivé des Cycles Organiques de Rankine. Cet article présente la théorisation de ce cycle thermodynamique qui met en œuvre des écoulements diphasiques instationnaires pulsés et compressible de fluide organique à la pression de vapeur saturante.

En comparaison avec les systèmes ORC, l'architecture du moteur PULSE présente notamment plusieurs particularités :

- L'absence de pompe mécanique pour réaliser la compression du fluide de travail. Cette compression est assurée par un système thermo-gravitaire.
- L'utilisation d'un expandeur à piston de type 2 temps. Ce type d'expandeur est inhérent à l'aspect pulsé caractéristique du système.
- L'évaporation flash réalisée dynamiquement en amont de l'expandeur. Ce type de processus permet d'améliorer considérablement la captation d'énergie au niveau de la source chaude.

Ce cycle présente de nombreux degrés de libertés et de nombreuses rétroactions entre ses différents composants, cela le rend complexe à simuler. En effet, il n'est pas envisageable de dissocier les composants en éléments primaires et de les caractériser individuellement.

C'est pourquoi un code de simulation 0D quasi stationnaire a été développé sous MATLAB. Ce code est basé sur des bilans, discrétisés en 8 steps temporels par cycle, de conservation de masses, d'énergie et de volume des différentes phases (un volume de contrôle par phase) du fluide de travail.

Cet article présentera une architecture simplifiée du système basée sur ce cycle. Puis développera le modèle d'équations mis en jeu par la simulation. Enfin, une ouverture permettant de suivre dans chaque composants les évolutions temporelles du cycle thermodynamique en 3 dimensions sera proposée.

Modélisation des transferts radiatifs par réseaux de neurones en présence de phénomènes rares et discontinus

Alex Royer^{1,*}, Olivier Farges¹, Pascal Boulet¹, Daria Burot²

* ✉ : alex.royer@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine, LEMTA F-54000, Nancy, France

² Safran Aircraft Engines, Etablissement de Villaroche - Rond Point René Ravaud - Réau 77550 Moissy-Cramayel, France

Mots clés : Transferts radiatifs, réseaux de neurones, méthode de Monte Carlo, collision nulles

Résumé :

Nous proposons d'étudier et de modéliser les transferts radiatifs en milieux fortement hétérogènes par réseaux de neurones. Nous avons déjà montré dans de précédents travaux les capacités de ces outils d'interpolation avancés et nous nous intéressons aujourd'hui à leurs capacités à prendre en compte des événements rares, ponctuels ou fortement discontinus. Ces singularités visent à simuler les difficultés rencontrées dans les modélisations industrielles (apparition de points chauds, dilution de flamme par injection d'air frais, bruits numériques) afin de pouvoir à termes proposer une nouvelle méthodologie robuste et rapide de modélisation des transferts radiatifs en milieux complexes.

Les bases de données d'entraînement pour les réseaux de neurones ont été construites à partir d'un modèle spectral SNB-CK et de la méthode de Monte Carlo dans sa formulation en collision nulle. Nous avons utilisé la méthode de Levenberg-Marquardt avec un terme de régularisation bayésienne pour l'entraînement des réseaux. Notre algorithme est adaptatif dans le sens où il permet de contrôler et d'optimiser la topologie des réseaux en fonction des données disponibles. Ce paramètre est directement lié au temps nécessaire à l'entraînement ainsi qu'à sa capacité à interpoler les résultats attendus. De plus, nous proposons ici d'étudier l'influence d'un tirage préférentiel des points d'entraînements sur l'indicateur de qualité du réseau (ici, la MSE) en nous basant sur la matrice des erreurs disponible pendant la phase d'entraînement. L'objectif de ce travail est de reconstruire grâce aux réseaux de neurones un champ complet de la variable radiative d'intérêt (ici, la divergence du flux) et de mettre en évidence que notre méthode est capable de détecter et de modéliser avec précision un champs hautement hétérogène, même en présence d'évènements très ponctuels ou discontinus, souvent rencontrés dans les applications industrielles. Les résultats produits par notre méthodes seront comparés à une solution de référence calculée par un code basé sur les méthodes de Monte Carlo validée lors de précédents travaux.

Thème 5

Métrologie et Techniques Inverses

Mesure de la conductivité thermique des métaux à température cryogénique	66
Radiométrie Photothermique pulsée périodique en configuration face avant pour la caractérisation thermique d'une couche de Si3N4 amorphe	67
Étude de l'ébullition en mini-canal vertical : analyse du transfert de chaleur par méthode inverse. . .	68
Optimal sensor location for inverse heat conduction problem in multilayered building walls	69
Influence des échanges radiatifs sur l'identification du coefficient d'échange thermique à l'interface verre/outil	70
Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique	71
Scanning fast photothermal radiometry	72
Mesure de températures sur des corps opaques à hautes températures par méthodes multi-spectrales	73
Observation and Quantification of CO ₂ passive degassing at sulphur Banks from Kilauea Volcano using thermal Infrared Multispectral Imaging	74
Méthode de détection sans contact des effets de l'érosion éolienne sur un verre sodocalcique . . .	75
Tricouches symétriques pour la caractérisation thermique de couches minces par méthode opto-électrothermique	76
Contrôle non destructif quantitatif 1D de matériaux opaques par thermographie infrarouge biface et méthodes de températures duales	77
Caractérisation expérimentale et numérique du procédé de chauffage par induction d'une sphère en tantale	78
Caractérisation de la réponse impulsionnelle d'un système diffusif par une paramétrisation dosale non isochrone	79
Mesure des champs de température et de concentration dans un réacteur microfluidique par thermospectroscopie infrarouge	80
Tomographie thermo-spectroscopique 3D par "Flying Spot" en utilisant un thermoconvertisseur hyper-spectral couplée à une caméra infrarouge	81
Etude de la thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge pour la mesure de température	82
Effet de taille de source sur la mesure de température par thermographie infrarouge à l'échelle microscopique.	83

Mesure de la conductivité thermique des métaux à température cryogénique

Jean-Pierre Monchau^{1,*}, Frédéric Crayssac², Marc Wagner², Jacopo Seiwert², Marie-Adelaide Cremieux²

* ✉ : monchau@themacs.fr

¹ THEMACS Ingénierie

² Air Liquide

Mots clés : conductivité thermique, propriété des métaux, cryogénie, métrologie thermique, Stockage de l'hydrogène liquide

Résumé :

Cette étude concerne la mise au point d'un dispositif de caractérisation de la conductivité thermique des métaux à basse température. Le dispositif est basé sur une mesure en régime permanent du gradient thermique sur un barreau métallique de section connue : il est chauffé à une extrémité par une résistance électrique et refroidi à son autre extrémité par de l'azote liquide à 77K, qui impose la température globale de l'échantillon. Le gradient de température est alors mesuré (à l'aide de deux sondes de températures positionnées aux extrémités du barreau), pour différentes valeurs de flux thermique. A température cryogénique, les pertes thermiques les plus importantes sont les pertes conductives et convectives, les pertes par rayonnement étant négligeables. Pour éviter les échanges avec l'air, la solution a été de mettre le dispositif dans un vide poussé (1E-5 mBar). Nous présentons ici les détails du dispositif expérimental et de l'analyse des incertitudes qui nous a permis d'estimer l'incertitude de mesure du dispositif. Les mesures ont permis de mettre en évidence des écarts importants avec les données existantes de la littérature. On effectue les mesures pour différentes puissances pour obtenir plusieurs points permettant une régression linéaire qui nous amènera à déterminer la conductivité du barreau étudié. L'expression de la conductivité thermique λ est la suivante :

$$\lambda = (L \times P) / (S \times \Delta T).$$

Où L est la longueur du barreau, S sa surface (section du barreau), P la puissance relevée et ΔT la différence de température aux extrémités du barreau. On a tracé ΔT en fonction de P pour éliminer les écarts d'étalonnage des Pt100 et la puissance résiduelle apportée par l'environnement à température ambiante. La conductivité s'écrit alors :

$$\lambda = L / (S \times Pente).$$

Où *Pente* est la pente de la droite de régression du nuage de points de mesure $\Delta T = f(P)$.

Erreur due à la méthode de la pente : Cette méthode est entachée d'un biais dû à la non prise en compte de la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. Les mesures faites dans cette étude ont été faite point à point en corrigeant l'erreur de décalage de température.

Radiométrie Photothermique pulsée périodique en configuration face avant pour la caractérisation thermique d'une couche de Si₃N₄ amorphe

Clément Chassain^{1,*}, Jean-Luc Battaglia¹, Andrzej Kusiak¹

* ✉ : clement.chassain@u-bordeaux.fr

¹ I2M Bordeaux Unité TREFLE

Mots clés : radiométrie photothermique, excitation pulsée périodique, couches mince, conductivité thermique, résistance thermique d'interface, techniques de minimisation

Résumé :

La technique de radiométrie photothermique pulsée périodique en face avant (PPTR FF) permet d'estimer la conductivité thermique et certaines résistances d'interface entre des couches ainsi que l'épaisseur de ces couches. La procédure expérimentale est basée sur la réponse de la face avant à une impulsion laser, de quelques nanosecondes, répétée périodiquement à haute fréquence. Cette excitation est donc assimilable à un peigne de Dirac. La réponse mesurée est la mesure du rayonnement de l'échantillon dans l'infrarouge et, sous l'hypothèse de faible perturbation, elle est donc proportionnelle à l'élévation de la température sur la face avant. En moyennant la réponse thermique sur des milliers d'impulsions successives on améliore très significativement le rapport signal sur bruit. Les propriétés thermiques inconnues pour l'échantillon ainsi que les paramètres expérimentaux sont identifiés en minimisant l'écart entre le signal mesuré et la réponse théorique qui tient compte de la forme de l'excitation, de la fréquence de répétition et de la fonction de transfert du détecteur. La réponse théorique est donc établie en effectuant la convolution de la réponse impulsionnelle de celui-ci avec la fonction de transfert du détecteur (assimilé à un filtre-passe bas retardé) et avec la fonction temporelle de la source impulsionnelle. La procédure d'identification est basée sur un schéma de deux procédures de minimisation successives. La technique du Simplex (algorithme de Nelder-Mead) qui donne un premier ensemble de valeurs qui serviront de valeurs initiales pour la méthode de minimisation de Monte Carlo avec Chaines de Markov (algorithme de Metropolis-Hastings) employée dans un second temps. L'application de la méthodologie proposée est faite en considérant un film de Si₃N₄ amorphe, de quelques centaines de nanomètres d'épaisseur, déposé sur un wafer de silicium, et qui est recouverte d'une couche de platine, de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur, jouant le rôle de transducteur optique-thermique. Le modèle du transfert de chaleur dans ce matériau multicouches est basé sur la méthode des quadripôles thermiques en configuration 2D axisymétrique. La fonction de transfert du détecteur a été identifiée sur des essais d'étalonnage préalables sur un échantillon homogène bien connu (aluminium). La forme temporelle de l'excitation est modélisée par un pavage de rectangle permettant une estimation rapide et efficace du temps initial de l'expérience et le calcul de la transformée de Laplace inverse pour la fonction globale de transfert. Nous avons alors identifié la conductivité thermique intrinsèque du film de Si₃N₄, l'épaisseur de la couche de platine et la résistance thermique d'interface platine/Si₃N₄ avec précision, en tenant compte de l'incertitude sur les autres paramètres supposés connus.

Étude de l'ébullition en mini-canal vertical : analyse du transfert de chaleur par méthode inverse.

Robin Lioger–Arago¹, Nadia Caney¹, Pierre Coste¹

* ✉ : robin.lioger--arago@cea.fr

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, DT_CH

Mots clés : ébullition, méthode inverse, mini-canal, batteries

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le contexte industriel de fort développement des véhicules électriques, qui contiennent des packs batteries de plus en plus puissants et compacts. Ces packs sont généralement constitués de cellules de batteries lithium-ion, qui nécessitent un système de contrôle thermique pour un refroidissement efficace et sûr, afin de limiter l'emballement thermique. Cet emballement se produit lorsqu'une cellule est endommagée, défectueuse ou lorsque sa température atteint une valeur critique. Parmi une variété de solutions, le refroidissement direct du pack immergé dans un liquide diélectrique circulant entre les cellules, est étudié afin d'éviter la propagation de l'emballement thermique. L'implication scientifique à la conception d'un tel pack, étant donné le faible espacement entre les cellules, est un problème d'ébullition convective en mini-canal vertical. La question qui se pose est de savoir si un tel écoulement peut aider dans le cas hypothétique d'un emballement thermique, pour lequel, par exemple, une seule cellule 18650 libère une énergie de l'ordre de 35 à 75kJ.

L'ébullition confinée est un mode de transfert thermique très efficace pour dissiper des flux de chaleur élevés. Afin de bien comprendre l'ébullition convective en mini-canal, le coefficient de transfert de chaleur local doit être quantifié avec précision.

Une étude expérimentale est menée pour décrire et quantifier le phénomène d'ébullition. Le dispositif expérimental permet de faire bouillir du HFE7100 dans un mini-canal vertical et rectangulaire de 1 mm de profondeur, 3 mm de largeur et 120 mm de longueur. L'expérience vise principalement à déterminer le coefficient de transfert de chaleur, identifier les régimes d'écoulement et à caractériser le phénomène d'assèchement.

Plusieurs régimes d'écoulement sont couverts, de l'ébullition sous-refroidie à l'assèchement. Deux méthodes d'estimation du coefficient de transfert de chaleur sont proposées et comparées. Une méthode utilisée est la modélisation et la résolution d'un problème inverse 2D de conduction. L'approche comprend la méthode des différences finies pour la modélisation et une méthode de Tikhonov pour la régularisation. Expérimentalement, différents modèles d'écoulement sont visualisés et identifiés. L'impact du débit massique sur l'apparition de l'assèchement est observé et mesuré.

Optimal sensor location for inverse heat conduction problem in multilayered building walls

Julien Berger^{1,*}, Suelen Gasparin², Dariusz Ucinski³

* ✉ : julien.berger@univ-lr.fr

¹ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université, CNRS, 17000, La Rochelle, France

² Cerema, BPE Project team, 44200 Nantes, France

³ Institute of Control and Computation Engineering, University of Zielona Góra

Mots clés : parameter estimation problem, Practical identifiability, inverse heat conduction problem, optimal experiment design, sensor position

Résumé :

The estimation of wall thermal properties through an inverse problem procedure enables to increase the reliability of the model predictions for building energy efficiency. Nevertheless, it requires defining an experimental campaign to obtain on-site observations for existing buildings. The quality of the estimated parameter strongly depends on the quality of the experimental data used for the parameter identification. Pronzato highlights the relation between the experiment design and the precision of the retrieved parameters. The design of experiments enables to search for the optimal measurement plan. It ensures the highest precision of the parameter to be estimated. For on-site measurement in buildings, the design of experiments seeks to answer the following questions : How many sensors do we need ? What is the sensor position χ in the wall ?

The Optimal Experiment Design (OED) methodology enables us to answer those questions. For example, Nenamorokov et al. searched the OED for the estimation of radiation properties. Artyukhin and Budnik inspected the optimal sensor location and their quantity in the inverse heat conduction boundary problem. More recently the optimal heating period and the duration of the experiment were investigated for the thermal conductivity estimation in building walls. In this paper, the OED methodology is used to answer the above-mentioned questions for a real case study. The unknown parameter is the thermal conductivity of each wall layer of an existing French house.

Influence des échanges radiatifs sur l'identification du coefficient d'échange thermique à l'interface verre/outil

Maxime Cressin^{1,*}, Fabien Béchet¹, Philippe Moreau¹, Hakim Naceur¹, Dominique Lohegnies¹

* ✉ : maxime.cressin@uphf.fr

¹ LAMIH UMR CNRS 8201

Mots clés : Rayonnement, Verre, Coefficient d'échange, Expérimental, Formage

Résumé :

Lors de la mise en forme du verre, et plus particulièrement lors du formage de bouteille via le procédé soufflé-soufflé, la température du verre et des outils de formage varie (de 1100°C à 650°C pour le verre et de 500°C à 650°C pour les moules). Le comportement mécanique du verre étant très dépendant de la température, il est nécessaire, pour simuler efficacement ces opérations de mises en forme du verre, de déterminer avec précision les échanges thermiques et en particulier l'échange thermique à l'interface entre le verre et les outils. Cet échange est représenté par le coefficient de transfert, noté H_c , qui caractérise thermiquement la mince couche située entre le verre et les outils composée d'air et de produits de combustion issus de la lubrification.

Par ailleurs, le caractère semi-transparent du verre implique des échanges par rayonnement à l'intérieur du verre et à sa surface. La prise en compte du rayonnement dans la simulation numérique demande de résoudre l'équation de transfert radiatif (ETR) et implique des temps de simulations plus importants. Afin de résoudre l'ETR, il est nécessaire de connaître des propriétés telles que l'indice de réfraction du verre ou le coefficient d'absorption qui sont dépendants de la composition du verre et de sa teinte.

Dans cette communication, une méthodologie d'identification inverse est proposée pour identifier le coefficient d'échange à l'aide de données expérimentales et d'un modèle numérique 1D différences finies. Cette méthode est basée sur un modèle numérique thermique qui a été développé pour être représentatif d'un essai expérimental dédié à l'étude du contact entre un poinçon et un cylindre de verre, et permet de simuler le problème avec ou sans prise en compte du rayonnement. Une première étude vise à étudier à l'aide de la méthode inverse, la sensibilité de l'identification du coefficient d'échange vis-à-vis de différents paramètres (température initiale du verre, position du thermocouple, temps de propagation). Une deuxième étude vise à étudier l'influence du rayonnement sur l'identification du coefficient d'échange.

Détermination des propriétés thermiques anisotropes d'une batterie Li-ion en fonction de l'état de charge par spectroscopie d'impédance thermique

Sylvain Cailliez^{1,*}, David Chalet¹, Philippe Mannesiez²

* ✉ : sylvain.cailliez@ec-nantes.fr

¹ Ecole Centrale de Nantes, LHEEA Lab. (ECN/CNRS), Nantes

² CRITT M2A, Béthune

Mots clés : Batterie, Propriétés thermiques, Spectroscopie d'Impédance Thermique, Modèle nodal

Résumé :

L'électrification du marché automobile apporte de nouveaux enjeux technologiques afin de rendre les véhicules électriques à batterie aussi performants que les véhicules thermiques (autonomie, durée de vie, fiabilité et flexibilité). Un des axes d'amélioration concerne la gestion thermique du pack batterie, composé de cellules de technologie Li-ion. En effet, les performances et le vieillissement de ces batteries sont très dépendants de la température. Il devient alors important de connaître les propriétés thermiques des batteries afin d'optimiser l'architecture et la gestion du système de refroidissement intégré au pack batterie.

La spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS - Electrochemical Impedance Spectroscopy) est une méthode de caractérisation électrique fréquentielle couramment utilisée. Le spectre d'impédance, obtenu par le rapport entre la tension et le courant, fournit des informations concernant la résistance interne et le comportement dynamique des cellules, et peut être employé pour calibrer un modèle de comportement de type circuit électrique équivalent. Une méthode équivalente a été développée en thermique (TIS - Thermal Impedance Spectroscopy), où l'impédance se définit comme le rapport entre la température et la puissance thermique au sein de la cellule. Utilisé pour calibrer un modèle thermique, le spectre d'impédance permet alors de déterminer la capacité thermique et la conductivité thermique de la cellule.

Deux méthodes permettent de réaliser un essai TIS. La première consiste à appliquer une puissance thermique à la batterie au moyen d'un système d'échauffement externe, ce qui présente rapidement des limites avec des batteries de grande taille (l'uniformité de la puissance thermique est remise en cause). La deuxième méthode, utilisée dans cette étude, met à profit l'échauffement interne de la batterie en fonctionnement. Ainsi, la batterie est soumise à un courant décrit par un signal modulé, dont le signal modulant contient la fréquence d'impédance. Grâce au signal porteur, la cellule est maintenue à un état de charge (SOC - State Of Charge) relativement constant, ce qui permet d'éviter les différents biais liés au SOC. Les essais sont réalisés dans une enceinte électrique thermostatique spécifique aux tests batteries.

La détermination des propriétés thermiques de la batterie se fait par l'intermédiaire d'un modèle nodal tridimensionnel, qui permet de caractériser l'anisotropie de la batterie. L'effet Joule définit la puissance thermique générée au sein de la cellule. Les échanges convectifs liés à l'enceinte thermostatique sont également pris en compte. La calibration est effectuée en deux temps. Tout d'abord, les résistances de convection sont déterminées aux points de fonctionnement pour lesquels les caractéristiques thermiques de la cellule sont connues. Ensuite, ces valeurs sont implémentées dans le modèle et l'essai TIS permet de calibrer les résistances de conduction et la capacité thermique pour d'autres points de fonctionnement, en particulier à différents SOC. Finalement, comparée à d'autres méthodologies de caractérisation thermique plus conventionnelles, la méthode TIS apparaît moins chronophage et ne nécessite que de bancs d'essais déjà employés pour des essais électriques standards. En plus de contribuer à la modélisation thermique du pack batterie, cette méthode pourrait donc être exploitée dans le cadre d'essais de vieillissement, afin de caractériser le vieillissement thermique des batteries.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-055>

Scanning fast photothermal radiometry

Alejandro Mateos Canseco^{1,*}, Andrzej Kusiak¹, Jean-Luc Battaglia¹

* ✉ : alejandromateoscanseco@u-bordeaux.fr

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie, I2M

Mots clés : Photothermal radiometry ; Thermal conductivity ;

Résumé :

The thermal characterization at micro or nano scale is of great interest for numerous of technical and technological applications. Assessment of heat transfer at microscale permits understanding behavior and design of different kind of systems like microelectronic or micro-electro-mechanical devices or effective properties of composite materials.

In this context, at I2M laboratory, we use widely the photothermal methods for thermal characterization of thin layer materials. One of these methods is the modulated photothermal radiometry (MPTR) which is well adapted to measure the out of plane thermal properties of thin films. The modulated photothermal radiometry is a contactless measurement technique based on monitoring the emitted infrared radiation from the surface of the sample consequently to a periodic photothermal excitation. The photothermal power from a modulated laser source is absorbed by the surface of the sample leading to an increase in the temperature at the heating area. This results in an increase in the infrared emitted radiation and assuming small temperature increase the emitted radiation can be linearized. On this way an indirect measurement of the temperature at the sample surface is obtained. In this work, we intend to develop a fast photothermal radiometry with several tenth of microns in resolution in order to enable the in plane thermal characterization. With the use an optical arrangement we manage the formation of the heating and measurement spots at the sample surface. The heating spot of 15 μm in diameter is formed by focusing the laser ; the measurement spot of 50 μm in diameter is an image of the detector over the sample surface. The sample mounted over a translation stage permits its scanning with micrometric precision. The use of modulated excitation allows exploring the frequencies up to 50 kHz. Under this configuration the in plane and out of plane heat conduction is possible to be assessed.

Mesure de températures sur des corps opaques à hautes températures par méthodes multi-spectrales

Kamal Ennass^{1,*}, Benjamin Remy², Vincent Schick², Johann Meulemans³

* ✉ : Kamal.Ennass@saint-gobain.com

¹ : Université de Lorraine, CNRS, LEMTA ² :Canopée ³ : SGR Paris

² ¹ : Université de Lorraine, CNRS, LEMTA ² :Canopée

³ ² :Canopée ³ : SGR Paris

Mots clés : Métrologie thermique, thermographie infrarouge, estimation, méthodes inverses.

Résumé :

La mesure de la température au-delà de 1000°C est soumise à des perturbations dues aux biais et bruits de mesure. Le contrôle de la température lors des procédés de fabrication tels que la trempe thermique du verre plat, formage de pare-brise et le fibrage de laines minérales, est un point essentiel pour un refroidissement contrôlé et l'obtention des propriétés désirées. Une mesure précise permettra de contrôler et piloter ces procédés plus finement et de diminuer leur empreinte carbone. La thermographie infrarouge multi-spectrale est un outil métrologique non-perturbateur qui permet de mesurer et de visualiser des champs de température sans contact à la surface d'un matériau. Dans le cadre de ces travaux, ces méthodes multi-spectrales sont couplées avec des algorithmes de minimisation pour l'estimation des températures dynamiques dans le cas des corps opaques. Un défi majeur est la méconnaissance des propriétés optiques de ces matériaux et leurs évolution en fonction de la température, la longueur d'onde et le temps, ce qui peut détériorer la précision de l'estimation. Trois méthodes d'estimation de la température ont été développées avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt, la méthode mono-spectrale qui estime la température en supposant que l'émissivité est connue, la méthode bi-spectrale qui suppose que l'émissivité est constante et l'estime avec la température et la méthode multi-spectrale qui modélise l'émissivité à l'aide d'un polynôme du second degré. Les méthodes mono et bi-spectrales ne sont capables d'estimer la température avec une haute précision qu'en absence de biais systématique sur l'émissivité. La méthode multi-spectrale nous permet d'estimer la température et une émissivité dépendante de la longueur d'onde avec des erreurs d'estimation négligeables lorsque le polynôme qui modélise l'émissivité est capable de décrire le comportement expérimental. Puisque l'émissivité d'un matériau a rarement un comportement polynomial, une nouvelle méthode a été développée pour contourner le problème de biais systématique des méthodes multi-spectrale, à l'aide des éléments finis pour modéliser une émissivité dépendante de la longueur d'onde. En utilisant cette méthode, les fonctions dites «par morceaux» sont capables de bien décrire plusieurs types de variations d'émissivité contrairement aux polynômes. Un autre avantage est que les paramètres estimés ont tous un sens physique, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes.

Observation and Quantification of CO₂ passive degassing at sulphur Banks from Kilauea Volcano using thermal Infrared Multispectral Imaging

Stephane Boubanga Tombet^{1,*}, Eric Guyot¹

* ✉ : stephane.boubanga@telops.com

¹ Telops

Mots clés : Quantification of CO₂, thermal Infrared,

Résumé :

The formation of Earth atmosphere and oceans have been primarily deeply influenced by volcanic emissions. In addition, the planet radiative balance and stratospheric chemistry can be affected by materials injected into the atmosphere by large explosive eruptions. Volcanic emission often contain water vapor (H₂O), carbon dioxide (CO₂), and depending on the type of volcano they may contain varying proportions of toxic/corrosive gases such as Sulphur dioxide (SO₂), hydrogen fluoride (HF) and silicon tetrafluoride (SiF₄). CO₂ is generally the most abundant gas with the lowest solubility among the volatile compounds of magmatic liquids and the less susceptible than most other magmatic substances such as SO₂ and HF.

Thanks to those properties, the volcanic CO₂ emission rates could play an important role for assessing volcanic hazards and for constraining the role of magma degassing in the biogeochemical cycle of carbon. However, measurements of CO₂ emission rates from volcanoes remain challenging, mainly due to the difficulty of measuring volcanic CO₂ against the high level of CO₂ in the atmosphere.

Thermal Infrared (TIR) imaging is now a well-established tool for the monitoring of volcanic activity since many volcanic gases such as CO₂ and SO₂ are infrared-active molecules. High speed broadband cameras give valuable insight into the physical processes taking place during volcanic activity, while spectrally resolved cameras allow to assess the composition of volcanic gases.

In this work we conducted TIR imaging and quantification of CO₂ passive degassing at Sulphur Banks from Kilauea volcano using Telops Midwave Infrared time-resolved multispectral imager. The imager allows synchronized acquisition on eight channels, at a high frame rate, using a motorized filter wheel. Using appropriate spectral filters measurements allows estimation of the gas emissivity parameters in addition to providing selectivity regarding the chemical nature of the emitted gases.

Our results show CO₂ measurements within the volcano's plume from its distinct spectral feature. Quantitative chemical maps with local CO₂ concentrations of few hundreds of ppm was derived and mass flow rates of few g/s were also estimated. The results show that thermal infrared multispectral imaging provides unique insights for volcanology studies.

Méthode de détection sans contact des effets de l'érosion éolienne sur un verre sodocalcique

Samy Brazane¹, Olivier Riou¹, Fabien Delaleux¹, Laurent Ibos¹, Jean-Felix Durastanti¹

* ✉ : samy.brazane@u-pec.fr

¹ Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-77567 Lieusaint, France

Mots clés : Thermographie infrarouge, émissivité apparente, érosion éolienne du verre, détection de l'érosion par émissivité apparente.

Résumé :

En exploitation, les systèmes à énergie renouvelable sont soumis à des conditions climatiques variables occasionnant de nombreuses dégradations de leurs performances dans le temps. Parmi ces dégradations, l'érosion éolienne baisse l'efficacité énergétique de ces systèmes en modifiant ses propriétés dans le visible (absorbance, transmittance et réflectance). Un contrôle in situ des surfaces est possible, mais reste de proximité (observations visuelles, spectromètre portable, ...). On conçoit la difficulté d'un contrôle étendu dans le cas de centrales photovoltaïques ou de concentrateurs solaires constitués de plusieurs milliers d'unités (panneaux, miroirs).

Du fait de son faible coût, le verre est systématiquement utilisé dans les systèmes solaires comme support ou protection. Notre travail vise à quantifier la détectabilité de la dégradation par érosion éolienne au moyen de son émissivité apparente.

L'émissivité apparente est raccordée à l'émissivité spectrale des surfaces. Elle est obtenue sans contact au moyen d'une caméra thermique dans des conditions standards de thermographie. Bénéficiant des capacités d'imagerie infrarouge, il est possible de cartographier l'émissivité apparente de surfaces étendues et donc d'en imager les anomalies de surface incluant l'impact de l'érosion éolienne.

Dans ce but, des échantillons de verre sodocalcique ont été érodés, en utilisant une sableuse avec variation de l'intensité, des angles d'incidence et du temps de sablage. Une première étape consiste à déterminer le taux d'érosion pour chaque échantillon en utilisant une méthode d'imagerie basée sur le contraste noir et blanc. Des images d'échantillons ont été prises sous un microscope. Un logiciel de traitement d'image détermine le pourcentage d'érosion. Une seconde étape consiste à étudier la transmission du verre. Dans ce but, un dispositif a été assemblé en utilisant un pyranomètre encagé permettant de quantifier la transmittance du verre érodé. La troisième étape, consiste à caractériser les échantillons par émissivité apparente $\epsilon_{\Delta\lambda}$, en utilisant le banc expérimental développé par le CERTES. Cet indicateur est obtenu sans contact dans des conditions de contrôle strict des températures d'influence.

Nous constatons que l'émissivité apparente est un indicateur sensible à l'érosion et sa valeur croit en fonction de la surface érodée. Le seuil de détection d'érosion par émissivité apparente est d'environ 20 % de surface érodée, par comparaison à une détection optique, il est de 50 %. Nous concluons que l'émissivité apparente est un indicateur de dégradation potentiellement plus performant que les méthodes optiques.

Tricouches symétriques pour la caractérisation thermique de couches minces par méthode opto-électrothermique

Sébastien Peillon¹, Christophe Rodiet², Petru Notingher³

* ✉ : sebastien.peillon@epfedu.fr

¹ EPF, 21 Boulevard Berthelot, 34000 Montpellier, France & IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² ITheMM, EA 7548, Université de Reims Champagne Ardenne, 51097 Reims, France

³ IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, France

Mots clés : Caractérisation thermique; Conductivité thermique; Diffusivité thermique; Nitrure d'Aluminium; Méthode opto-électrothermique; Couches minces; Semi-transparence; Multi-couches; Méthodes inverses.

Résumé :

Les couches minces diélectriques regroupent un large panel de matériaux aux applications diverses dont les propriétés thermiques s'étendent sur une large gamme. Parmi celles-ci, le nitrure d'aluminium est utilisé en microélectronique pour la dissipation passive de chaleur en raison de son excellente conductivité thermique, de l'ordre de 100 W/m/K à 200 W/m/K.

Afin d'être en mesure de caractériser thermiquement ce type de matériaux bons conducteur et de faible temps de conduction, une méthode opto-électrothermique issue de la classe de méthodes Flash (excitation optique pulsée, combinée ici à une mesure électrothermique) est développée : l'effet thermorésistif d'une électrode métallique déposée sur le matériau est utilisé comme transducteur afin de déterminer la variation de température de diffusion en surface de l'électrode – au moyen d'un pont de Wheatstone équilibré et d'une sonde de mesure. Ce dépôt opaque et unique est souvent nécessaire pour collecter l'excitation laser lors de l'utilisation de méthodes optiques du fait du caractère semi-transparent des couches minces. Toutefois, lorsqu'une mesure simultanée des charges d'espace est réalisée pour caractériser électriquement le film mince (e.g. HVDC), celui-ci peut être enchâssé entre deux électrodes métalliques. Ce tricouche symétrique offre alors une possibilité de mesure sur chaque face (avant et arrière) de l'échantillon. Finalement, une méthode inverse permet à partir de ces mesures temporelles de déterminer les propriétés du film mince.

Le papier proposé présente une preuve de concept de la méthode opto-électrothermique développée en l'appliquant dans cette configuration symétrique à un échantillon mince (100 μm) d'AlN présentant des propriétés de semi-transparence. Il est ainsi montré que la méthode est adaptable aux mesures en faces avant et arrière. A cette fin, différentes modélisations quadripolaires du transfert conducto-radiatif 1D au sein du tricouche sont proposés. En particulier, un modèle adapté aux mesures en face avant a été développé afin de permettre la prise en compte des effets de semi-transparence du film en considérant un transfert conductif en milieu semi-infini. Une étude des performances de la méthode d'estimation sur données synthétiques est menée afin d'évaluer l'influence des biais de modèles thermiques dus au transfert par conduction et aux effets de semi-transparence.

Les valeurs de conductivité effective du film déterminées à partir des mesures expérimentales réalisées en faces avant et arrière ont pu être corroborées entre elles avec un écart relatif de l'ordre de 2 %.

Contrôle non destructif quantitatif 1D de matériaux opaques par thermographie infrarouge biface et méthodes de températures duales

Maud Piqueras¹, Christophe Rodiet¹, Jean-François Henry¹, Hervé Pron¹, Rodolphe Vaillon²

* ✉ : christophe.rodiet@univ-reims.fr

¹ ITheMM, EA 7548, Université de Reims Champagne-Ardenne, 51097 Reims, France

² IES, CNRS - UMR 5214, Université de Montpellier, 34095 Montpellier, France.

Mots clés : Caractérisation thermique, Méthode Flash, Contrôle Non Destructif (CND), Méthodes Inverses, Quadripôles thermiques, Diffusivité thermique, SVD, Méthode Spectrale, Résistances thermiques, Thermographie Infrarouge, Défauts internes

Résumé :

Le Contrôle Non Destructif (CND, consistant en la caractérisation thermique de matériaux et de défauts) fait face à de nombreuses difficultés dues à la grande quantité de données à traiter et au caractère mal posé du problème inverse, impliquant un mauvais conditionnement numérique (faibles sensibilités aux paramètres, nombres de paramètres, ...), qui associé à des problèmes de faibles rapports signal sur bruit rend complexe le diagnostic (détection et caractérisation) quantitatif des défauts.

Ainsi, de nombreuses méthodes ont été développées en vue de réaliser et améliorer la détectivité et/ou la caractérisation thermique quantitative des défauts, dont les plus fréquentes sont la « Thermal Signal Reconstruction » (TSR), la « Pulsed Phase Transformation » (PPT), ou encore la « Principal Component Thermography » « PCT », appartenant aux trois grandes classes de méthodes que sont la thermographie pulsée, non pulsée, ou modulée.

Cependant, les performances de ces dernières sont souvent dépendantes du contexte expérimental (matériaux, type de défauts, profondeurs, ...) dans lequel elles sont appliquées, rendant délicat d'en extirper une qui soit globalement plus performante que les autres.

Par ailleurs, la complexité et la durée de mise en œuvre sont également grandement variables d'une méthode à l'autre.

C'est donc dans ce contexte, qu'une méthode de CND quantitatif est proposée, dont les objectifs sont de permettre en une expérience de caractériser les propriétés thermiques des zones saines et des défauts, en étant à la fois rapide de mise en œuvre, précise et robuste.

Expérimentalement, la méthode est basée sur une excitation optique (pouvant être impulsionnelle ou non) et une mesure par thermographie infrarouge permettant une mesure simultanée de températures en face avant et arrière des échantillons.

Dans le cadre de ce papier, on se restreindra à une caractérisation thermique 1D des défauts (supposés être modélisables par des résistances thermiques) et des zones saines, en supposant que le problème est résolu en se plaçant au centre des défauts et des zones saines.

L'originalité du problème inverse proposé repose l'utilisation de la construction d'une fonctionnelle duale (des mesures de températures) basée sur l'usage de températures en face avant et/ou arrière dans les zones saines et/ou avec défauts.

Les performances statistiques de la méthode développée seront analysées sur des données bruitées et non bruitées à l'aide d'une méthode de Monte Carlo, et dont les résultats associés aux différentes configurations (avant et/ou arrière) offertes par la méthode seront comparées entre elles et par rapport à ceux obtenus par une méthode classique basée sur l'estimation des paramètres du défaut à partir de la courbe de contraste réalisée en face avant ou arrière.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-081>

Caractérisation expérimentale et numérique du procédé de chauffage par induction d'une sphère en tantale

Arthur Montazel¹, Jules Delacroix^{1,*}, Rémi Clavier¹

* ✉ : jules.delacroix@cea.fr

¹ CEA, DES, IRESNE, DTN, Cadarache F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France

Mots clés : Induction, pyrométrie, émissivité, tantale

Résumé :

En situation d'accident grave en réacteur nucléaire, les matériaux issus de la fusion du cœur, ou corium, se relocalisent suivant différents scénarios. Dans le cas des Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium (RNR Na), l'établissement d'un régime d'ébullition en film du sodium autour des particules de corium liquide est une des phases prépondérantes gouvernant l'amplitude et l'efficacité des échanges thermiques durant l'interaction. Il est nécessaire d'acquérir les données qui font actuellement défaut pour définir des modèles ou corrélations d'échange fiables et valides pour qualifier l'interaction corium-sodium (IC-Na).

Le programme expérimental nommé SERUA (Sodium boiling Experimental Rig for Understanding of fuel-coolant interAction) a pour objet l'investigation de l'IC-Na à l'échelle d'une goutte. L'objectif est d'étudier des régimes d'ébullition du sodium autour d'un élément chauffé à haute température. Sur le principe, les débris de corium sont simulés en chauffant à très haute température par induction une sphère de tantale. Cette sphère instrumentée est ensuite plongée dans un bain de sodium pouvant être porté à saturation (850°C), et l'évolution dans le temps des mesures de températures permet de caractériser la nature des échanges thermiques qui se déroulent pendant la phase de refroidissement.

Parallèlement au développement d'un dispositif adapté au chauffage d'un bain de sodium jusqu'à saturation, l'objet du travail en cours discuté ici se concentre sur un programme de qualification du procédé de chauffage de la sphère en tantale avant immersion. Ce programme comprend à la fois des simulations numériques et des essais de validation. Les simulations numériques visent à s'assurer que l'état de la bille (en température notamment, amplitude et distribution) soit compatible avec l'observation correcte des phénomènes d'intérêt (ébullition en film et transition). Les essais, réalisés dans l'installation VITI, permettent d'alimenter une base de validation pour les simulations, et servent de démonstration technologique pour le chauffage par induction d'une bille de tantale à des températures voisines de 2500 °C.

Plus particulièrement, l'accès à l'émissivité du tantale constitue un point-clé de l'approche. En premier lieu, la reconstruction de l'émissivité spectrale basée sur des éléments de littérature et/ou sur les mesures monochromatiques de plusieurs pyromètres in situ permet d'accéder au champ de température prévalant à la surface de la sphère, par correction des mesures effectuées via une caméra thermique. La comparaison de ces données avec les prédictions numériques permet par la suite d'estimer la loi de comportement de l'émissivité totale en fonction de la température minimisant l'écart entre expériences et simulations. La génération de données originales et la validation sur ces points de référence expérimentaux sur VITI autorisent à terme la mise en application des simulations au dimensionnement du moyen de chauffage de la sphère en tantale instrumentée qui sera déployée dans l'environnement expérimental spécifique de SERUA.

Caractérisation de la réponse impulsionnelle d'un système diffusif par une paramétrisation dosale non isochrone

Denis Maillet^{1,*}

* ✉ : denis.maillet@univ-lorraine.fr

¹ LEMTA, Université de Lorraine

Mots clés : identification expérimentale ; déconvolution ; régularisation ;

Résumé :

Les modèles convolutifs causaux permettent d'exprimer l'évolution dynamique d'un signal de sortie, en fonction d'une entrée et d'une réponse impulsionnelle lorsque certaines conditions de linéarité et d'invariance en temps sont réunies. Pour une entrée instationnaire donnée (source thermique unique, en température ou en puissance), la réponse en température (sortie) en un point du système est un produit de convolution de cette entrée et de la réponse impulsionnelle.

Généralement, on observe la sortie en des instants discrets et isochrones, et il en est de même pour l'entrée, et donc pour la réponse impulsionnelle. Le produit de convolution continu peut alors être mis sous la forme d'une relation matricielle linéaire entre le vecteur d'entrée et le vecteur des valeurs échantillonnées de la réponse impulsionnelle, où la matrice carrée du système est une matrice de Toeplitz triangulaire inférieure, qui dépend seulement du vecteur des entrées. Cette relation peut être également écrite en utilisant les « doses » de la réponse impulsionnelle et de l'entrée, c'est-à-dire les intégrales de chacune de ces deux fonctions sur chacun des pas de temps. Ces doses peuvent être approximées par le produit du pas de temps par la moyenne arithmétique des valeurs de ces deux fonctions aux bornes de chaque intervalle.

La calibration expérimentale, appelée aussi identification, de la réponse impulsionnelle d'un système matériel diffusif nécessite donc l'inversion du système linéaire carré précédent, pour des entrée et sortie mesurées. Du fait de la présence d'un bruit dans ces deux signaux, le problème inverse est « mal-posé » et requière une régularisation pour récupérer des valeurs estimées stables de la réponse impulsionnelle. De nombreuses techniques de régularisation existent (troncature de la décomposition en valeurs singulières, régularisation de Tikhonov, etc. . .), pour assurer cette stabilité, mais celles-ci présentent le défaut d'être entachées d'un biais lié à la nature (forme, durée) et à la structure du paramétrage de l'entrée (pas de temps identique à celui de la sortie) : en l'absence de bruit de mesure, l'inversion ne permet pas de récupérer les valeurs échantillonnées exactes de la réponse impulsionnelle.

Le travail présenté correspond à une approche où la paramétrisation de l'entrée est adaptée à sa forme temporelle, en ne gardant qu'un nombre limité de points de collocation, choisis parmi les temps initiaux d'échantillonnage, et en supposant une constance de l'entrée entre ces temps non isochrones. Ceci est effectué en se fixant un écart absolu à ne pas dépasser entre le cumul de l'entrée exacte et celui de l'entrée paramétrée de façon linéaire entre deux temps de collocation adjacents. Cette technique de paramétrisation non isochrone par cumuls fait naturellement intervenir la notion de dose, ici en joule, pour une entrée en puissance (impédance thermique) ou en kelvin.seconde pour une entrée en température (transmittance thermique). La réponse impulsionnelle est paramétrée également sur les mêmes intervalles temporels.

Il en résulte un système linéaire qui n'est plus carré, mais rectangulaire, pour l'identification, ce qui améliore le conditionnement. Les potentialités de cette approche sont étudiées dans ce travail exploratoire, en utilisant des signaux simulés, sans puis avec bruit.

Mesure des champs de température et de concentration dans un réacteur microfluidique par thermospectroscopie infrarouge

Stéphane Chevalier^{1,*}, Kevin Krause¹

* ✉ : stephane.chevalier@u-bordeaux.fr

¹ I2M UMR 5295

Mots clés : Microfluidique, spectroscopie, infrarouge, imagerie, méthodes inverses

Résumé :

Les réacteurs microfluidiques sont des dispositifs clés dans le génie des procédés pour la fabrication de nouveaux matériaux, la production de composés chimiques ou encore le stockage et la conversion d'énergie. Ces réacteurs sont généralement composés de plusieurs fluides ou colloïdes réagissant entre eux et produisant une variation de concentration et de température lors de la réaction. L'amélioration des performances de ces réacteurs (taux de réactivités, taux de mélange, pureté du produit) repose sur une maîtrise des conditions opératoires et de la géométrie. Dans ce contexte, la connaissance des champs de concentration en réactif et de leur température apparaît comme déterminante pour l'amélioration de ces réacteurs.

Pour répondre à ce besoin, une plateforme d'imagerie multiphysique sans contact basée sur la thermospectroscopie infrarouge a été développée. Celle-ci se compose d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier et d'une caméra thermique sur la gamme 2.5- 5 μm . Le faisceau infrarouge issu du spectromètre traverse le réacteur et la caméra enregistre l'interférogramme et le champ de température de manière simultanée. Une transformée de Fourier permet ensuite de calculer les champs d'absorbance multispectrale en chaque pixel de la caméra à partir de l'interférogramme. L'absorbance est ensuite reliée aux champs de concentration par la loi de Beer Lambert. Un soin particulier a été apportée au design et au choix des matériaux du réacteur microfluidique pour permettre au faisceau infrarouge de le traverser.

Dans cette communication, nous présenterons le dispositif d'imagerie développée à l'I2M ainsi que la fabrication du réacteur microfluidique dédié à l'imagerie : choix de wafer en saphir et épaisseur de fluide à traverser par le faisceau infrarouge. Plusieurs résultats expérimentaux seront présentés avec une réaction acide/base exothermique où nous montrerons les champs de concentration des différents réactifs et le champ de température. Associé à une méthode inverse, ces champs de concentration vont permettre d'estimer les cinétiques chimiques en fonction de différentes conditions opératoires.

Tomographie thermo-spectroscopique 3D par "Flying Spot" en utilisant un thermoconvertisseur hyperspectral couplée à une caméra infrarouge

Abderezak Aouali¹, Stéphane Chevalier¹, Alain Sommier¹, Jean-Christophe Batsale¹, Christophe Pradere²

* ✉ : abderezak.aouali@u-bordeaux.fr

¹ I2M

² Epsilon-Alcen

Mots clés : Tomographie 3D hyperspectrale, thermo-conversion

Résumé :

L'objectif de cette étude consiste à développer une méthode de tomographie ombroscopique hyperspectrale par faisceau focalisé. L'enjeu ici est d'aller au delà d'une mesure quantitative de champ 2D de flux de chaleur pour obtenir des champs 3D apportant une information sur la composition physico-chimique des matériaux. Pour ce faire, un thermoconvertisseur EMIR est utilisé, il permet d'absorber le rayonnement électromagnétique dans une très large gamme spectrale. Cette absorption engendre un échauffement du thermoconvertisseur par effet photo-thermique, ce dernier délivre ainsi des radiations infrarouges rendant ainsi la scène thermique visible par une caméra infrarouge. Par conséquent, l'utilisation du couple thermoconvertisseur EMIR et caméra IR constitue un capteur ou écran de projection pour des méthodes basées sur de l'imagerie tomographique 3D hyperspectrale.

Cette approche permettra de valider la capacité à mesurer des grandeurs physiques liées à la composition chimique des échantillons dans la gamme des ondes TéraHertz et proche IR. Rappelons que la gamme spectrale TéraHertz procure un avantage majeur du fait qu'elle est faiblement sensible à la composante d'émission propre des objets à étudier. En effet, une source à très haute température n'émet quasiment pas de rayonnement dans la gamme spectrale du THz. Ceci pourrait donc constituer une solution optimale dans l'étude des échantillons à hautes températures.

Dans cette étude, des méthodes d'imagerie seront développées, regroupant l'imagerie optique par ombroscopie ainsi que des méthodes de reconstruction volumique basées sur la transformée de Radon. Ensuite, des montages expérimentaux proposant un premier couplage d'un éclairage par faisceau laser focalisé (Flying Spot) et imagerie optique par ombroscopie seront décrits. Ces montages permettront, par le biais du thermoconvertisseur EMIR hyperspectral, la mesure de grandeurs telles que la transmittance et l'absorbance des objets de forme complexe et spectralement hétérogène. Enfin, les méthodes de reconstruction volumique par transformée de Radon permettront de reconstruire le volume 3D des différentes grandeurs intrinsèques mesurées (transmittance et absorbance).

Etude de la thermotransmittance dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge pour la mesure de température

Coline Bourges^{1,*}, Stéphane Chevalier¹, Jérémie Maire¹, Stefan Dilhaire²

* ✉ : coline.bourges@u-bordeaux.fr

¹ I2M Bordeaux

² LOMA Bordeaux

Mots clés : Infrarouge, Imagerie, Thermotransmittance, Température, Semi-transparent

Résumé :

La mesure de température dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge est un véritable enjeu dans de nombreux domaines : caractérisation de semi-conducteurs, étude de milieux vivants, micro-fluidique, etc. La transparence de ces échantillons ne permet pas d'utiliser les méthodes habituelles de thermographie basées sur l'étude de l'émission propre des objets dans l'infrarouge. Afin de répondre à ce besoin, nous utilisons la thermo-dépendance des propriétés optiques des matériaux, et en particulier la variation de la transmission optique d'un corps en fonction de sa température appelée thermotransmittance.

Le principal verrou à l'utilisation de cette méthode est la très faible sensibilité de la variation de la thermotransmittance en fonction de la température (de l'ordre de 10^{-4} – 10^{-5} K⁻¹). La mesure est donc particulièrement sensible aux différents bruits de mesure et à la dérive temporelle des appareils. Pour s'affranchir de cette contrainte et supprimer les composantes fréquentielles parasites, nous avons réalisé dans un premier temps une étude en modulant le champ de température au sein d'un échantillon semi-transparent (wafer de silicium). Puis grâce à un monodétecteur couplé à une détection synchrone, nous avons observé le signal à la fréquence de la thermique, et nous avons pu mesurer le coefficient de thermotransmittance nécessaire à la mesure de température.

Dans une seconde étude, nous nous sommes focalisés sur le développement d'un système d'imagerie pour la mesure de champs de température 2D par thermotransmittance. Nous avons utilisé une caméra infrarouge comme appareil de mesure et nous avons remplacé la détection synchrone analogique par une méthode numérique pour mesurer le signal de thermotransmittance en chaque pixel de la caméra. Nous présenterons les résultats obtenus en utilisant la méthode à quatre images qui permet de mesurer l'amplitude et la phase d'un signal modulé à partir de quatre points équidistants dans une période de modulation thermique, avec pour échantillons une lame de silicium (semi-conducteur) et une lame de verre (isolant thermique). Nous montrerons que la méthode permet de mesurer des rapports de signaux de 1% pour une élévation de température de 20°C pic-pic.

Effet de taille de source sur la mesure de température par thermographie infrarouge à l'échelle microscopique.

Edouard Geslain¹, Thomas Pierre¹

* ✉ : edouard.geslain@univ-ubs.fr

¹ Université Bretagne Sud

Mots clés : Soudage, Thermographie haute température

Résumé :

Le soudage par résistance par point est le procédé le plus utilisé pour l'assemblage des tôles d'aciers des caisses de véhicules automobiles. Ce procédé fait intervenir l'effet Joule pour faire fondre les tôles maintenues entre deux électrodes en cuivre en quelques centaines de milli-secondes. Les échauffements sont très intenses, notamment aux interfaces où les résistances de contact électrique et thermique sont importantes.

Le dispositif instrumenté de soudage par point développé à l'IRDL est équipé d'une caméra infrarouge rapide (350 ips) Flir X6580sc avec son objectif microscopique (15 $\mu\text{m}/\text{pixel}$) G1 à grande distance (300 mm de longueur focale). Ce dispositif a permis d'observer les échauffements initiaux aux interfaces lors d'une opération de soudage et de mesurer des températures de contact sur des températures inférieures à 800 °C.

En voulant perfectionner la méthode de mesure sur les hautes températures ($T^\circ > 1000$ °C) avec une validation de la température par thermocouple, nous avons observé une incohérence sur l'émissivité. Les pixels reçoivent plus de flux que ce que peut émettre un corps noir. Nous avons attribué cela à un effet de taille de source. C'est en effet lorsque la surface observée est relativement homogène à haute température (plus de la moitié du thermogramme au-dessus de 600 °C environ) que la dérive est observée. Les estimations de l'émissivité donnent alors de résultats supérieurs à 1.

Un étalonnage de la caméra a été effectué pour intégrer la fenêtre de saphir qui protège l'objectif. Des essais ont été réalisés avec pour objectif la réduction du flux trop-perçu par les pixels étudiés. Dans un premier temps avec un diaphragme pour pouvoir ajuster l'ouverture et la position puis, dans un second temps, avec un clinquant finement fendu.

Le poster proposé en « Work in progress » vise à présenter le problème rencontré et les méthodes mises en œuvre pour le déjouer. L'objectif final étant de pouvoir mesurer les températures de contact jusqu'à leur apogée avant la fusion des tôles.

Thème 6

Thermique appliquée

Etude numérique du stockage latent d'énergie thermique dans un échangeur-stockeur innovant pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments	87
Évaluation expérimentale du potentiel de la climatisation par eau de mer (SWAC) en climat tropical	88
Etude de la cuisson par contact d'un produit céréalier	89
Étude d'une mousse métallique associée à un réseau de caloducs pour améliorer le contrôle thermique de moules d'injection	90
Méthodologie de dimensionnement d'un dissipateur thermique pour les dernières générations de convertisseurs de puissance	91
Modèle semi-analytique d'un caloduc capillaire cylindrique en régime transitoire avec conditions aux limites de flux imposés	92
Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondations géothermiques	93
Optimisation multicritère d'un système solaire thermique avec un stockage inter-saisonnier	94
Étude expérimentale à échelle réduite d'un bassin de toit – performance de rafraîchissement en climat océanique	95
Quench water quality thermal impact estimation	96
Approche expérimentale du phénomène d'adhésion lors de la mise en forme de produits verriers : étude de l'échange thermique et détermination de l'effort de retrait	97
Etude de la combinaison de panneaux aérovoltaiques améliorés et d'un bâtiment énergétiquement performant	98
Développement d'un dispositif expérimental de surmoulage permettant la mesure de la résistance thermique de contact pièce polymère/pièce polymère en conditions industrielles	99
Prise en compte du confort des usagers dans les projets de réhabilitation	100
Analysis on applicability of phase change material glazing unit in different climate conditions	101
Efficacité énergétique et consommation d'eau associés à différentes techniques de refroidissement évaporatif appliquées à un condenseur de climatisation	102
Correlation between field-test and laboratory results for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) used as a residential cogeneration system	103
3E analysis of a hybrid renewable energy system	104
Analyse du risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol (EAHE)	105
Etude expérimentale des performances thermiques d'un mur Trombe	106
Amélioration du refroidissement des fumées d'un incinérateur industriel	107
Evaluation des performances d'un système de refroidissement évaporatif indirect dans un bâtiment tertiaire	108
Caractérisation d'un four de cuisson haute température pour pains libanais	109
Description et performances d'une solution photovoltaïque de production d'eau chaude sanitaire en logement collectif en autoconsommation	110

Étude des technologies de l'hydrogène-énergie appliquées aux bâtiments à faible impact carbone .	111
Aérogels hybrides pour la construction durable : Élaboration, caractérisation et modélisation	112
Amélioration du confort thermique par utilisation des MCP dans l'enveloppe du bâtiment	113
Earth-Air Heat Exchangers : Impact of Surrounding Conditions on Long-term Performance	114

Etude numérique du stockage latent d'énergie thermique dans un échangeur-stockeur innovant pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments

Hamid Bellache¹, Jules Voguelin Simo Tala¹, Daniel Bougeard¹, Zohir Younsi²

* ✉ : jules-voguelin.simo.tala@imt-nord-europe.fr

¹ IMT Nord Europe, Institut Mines – Télécom, Univ. Lille, F-59508 Douai, France

² JUNIA-HEI, 13 Rue de Toul, F-59000 Lille, France

Mots clés : Echangeur-stockeur, optimisation, changement de phase, MCP, CFD

Résumé :

La présente étude s'intéresse au développement d'un échangeur-stockeur de chaleur de type tube et calandre intégrant des matériaux à changement de phase MCP. Elle a pour objectif d'analyser numériquement l'effet de l'intensification des transferts thermiques par manipulation passive de l'écoulement du fluide caloporteur sur la cinétique de fusion-solidification du matériau à changement de phase. Les simulations numériques sont réalisées avec le code CFD StarCCM+ 2015. Une première partie de l'étude consiste en la mise en œuvre d'une intensification des transferts thermiques et de l'optimisation des performances thermo-aérauliques d'un écoulement d'air, en régime stationnaire, à un nombre de Reynolds $Re=1500$ dans un canal cylindrique. L'intensification est effectuée par l'insertion dans le canal de paires de générateurs de vortex de type «ailettes Delta». Une étude paramétrique portant sur le nombre et la position des paires d'ailettes Delta, leurs paramètres géométriques est réalisée afin d'optimiser les performances thermo-aérauliques de la configuration de canal intensifié par rapport à la configuration de canal non intensifiée. Les résultats sont présentés en employant des quantités thermiques et aérauliques globales adimensionnelles telles que le facteur de friction f , le nombre de Nusselt Nu et le facteur d'intensification des performances PEC. Les champs d'hélicité, de température et de coefficient d'échange convectif sont utilisés pour analyser les mécanismes locaux d'échange. La seconde partie de l'étude est consacrée au développement, à partir de la configuration d'écoulement de canal présentant les meilleures performances, d'un échangeur-stockeur intensifié et optimisé. La configuration d'écoulement de canal munie de paires d'ailettes Delta présentant les meilleures performances thermo-aérauliques obtenue dans la première partie de l'étude est équipée d'une calandre cylindrique compartimentée par cinq ailettes radiales équidistantes et remplie d'un MCP paraffinique. Les simulations numériques sont réalisées en régime transitoire pour le même nombre de Reynolds $Re=1500$, le phénomène de fusion-solidification étant modélisé par la méthode enthalpique. L'impact de l'intensification des échanges thermiques au niveau du fluide caloporteur sur les cinétiques de fusion-solidification du MCP dans les différents compartiments de la calandre est analysé et discuté au niveau local à travers les champs de vitesse, température, vorticité, fraction solide/liquide dans les quatre compartiments ainsi que le coefficient d'échange thermique local intérieur tube. Des analyses globales sont également réalisées notamment en représentant les profils temporels d'évolution des fractions solide/liquide, de la cinétique de fusion/solidification dans les différents compartiments ainsi que la température de sortie du fluide caloporteur pour les deux échangeur-stockeur. Cette étude a notamment montré que les performances thermo-aérauliques du côté fluide caloporteur intérieur tube sont très sensibles et dépendent fortement des paramètres géométriques des perturbateurs, de leur nombre et de leur position. La comparaison des processus de fusion-solidification entre l'échangeur-stockeur à tube caloporteur lisse et celui à tube caloporteur muni d'ailettes Delta optimisé met en évidence dans le MCP un développement des phénomènes convectifs naturels plus intenses dans l'échangeur-stockeur intensifié conduisant à une accélération significative des processus de fusion-solidification du MCP dans la calandre, à iso-surface d'échange.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-111>

Évaluation expérimentale du potentiel de la climatisation par eau de mer (SWAC) en climat tropical

Kanhan Sanjivy^{1,*}, Olivier Marc², Neil Davies³, Franck Lucas¹

* ✉ : kanhan.sanjivy@doctorant.upf.pf

¹ Université de la Polynésie française

² Université de La Réunion

³ Gump South Pacific Research Station, University of California, Moorea, French Polynesia

Mots clés : SWAC ; Réseau de froid ; Performance énergétique ; Retour d'expérience

Résumé :

Selon un rapport de l'International Energy Agency (IEA), la consommation d'énergie liée à la climatisation a triplé entre 1990 et 2016, et avec elle les émissions de dioxyde de carbone, atteignant 1130 millions de tonnes par an. Une des solutions pour réduire cette consommation consiste à améliorer la performance des systèmes de climatisation utilisés, généralement évaluée par l'Energy Efficiency Ratio (EER). La technologie SWAC (Sea Water Air Conditioning) s'inscrit dans cette démarche d'efficacité énergétique en proposant une alternative très performante à la climatisation conventionnelle pour les zones côtières.

Le SWAC consiste à pomper de l'eau de mer froide (5°C) situé à environ 1000 m de profondeur via un pipeline posé sur le fond marin. Cette eau passe dans un échangeur thermique pour transmettre sa puissance frigorifique à un réseau d'eau glacée, qui assurera la distribution du froid dans l'ensemble des bâtiments à climatiser. Ce procédé échappe aux limites des systèmes de climatisation à compression mécanique de vapeur, puisque l'on ne fait que transporter du froid existant.

À ce jour, il existe cinq installations SWAC dont trois aussi dédiées à l'étude des cycles OTEC pour la production d'électricité. Ces trois installations sont situées à Goseong en Corée du Sud, à Okinawa au Japon et dans le District de North Kona à Hawaii. Les deux autres ont été conçues exclusivement pour la production de froid, elles sont situées à Bora Bora et Tetiaroa en Polynésie française et sont respectivement de 1,6 et 2,4 MWf. L'installation de Bora Bora est momentanément à l'arrêt car la conduite de puisage doit être remplacée. Un troisième SWAC de 6MWf est en construction sur l'île de Tahiti pour alimenter le Centre Hospitalier de Polynésie française (CHPF), la mise en service est prévue pour fin 2021.

Malgré son fort potentiel et l'existence d'installations fonctionnelles, la technologie SWAC reste peu développée dans le monde. Ce retard peut s'expliquer en partie par un manque de données expérimentales permettant d'évaluer la performance énergétique d'une installation SWAC réelle sur une longue durée.

Dans cet article, nous présenterons les performances du système SWAC installé à l'hôtel The Brando sur l'atoll de Tetiaroa en Polynésie française. Ce système alimente une boucle d'eau glacée, faisant le tour de l'île, pour une longueur totale de trois kilomètres. Les résultats expérimentaux montrent des valeurs d'EER comprises entre 20 et 140 en fonction de la longueur de la boucle de distribution de froid, sachant que les systèmes de climatisation classiques à compression mécanique de vapeur atteignent 5 pour les plus performants. En termes d'émissions carbone, le SWAC de Tetiaroa émet environ 225 tonnes de CO₂ par an contre 860 tonnes pour les hôtels équivalents (5972 MWhf/an) de Polynésie Française équipés de systèmes de production de froid conventionnels.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-019>

Etude de la cuisson par contact d'un produit céréalier

Jean Pierre Ploteau¹, Pascal Le Bideau¹, Patrick Glouannec¹

* ✉ : jean-pierre.ploteau@univ-ubs.fr

¹ Univ. Bretagne-Sud, IRDL, UMR CNRS 6027, F-56100 Lorient

Mots clés : Cuisson direct pas contact, Méthode Inverse, Expérimentation, Densité de flux de chaleur, Cuisson, Banc expérimental

Résumé :

L'objectif de ces travaux est d'apporter une méthodologie et des pistes de réflexion en vue de la conception d'appareils de cuisson par contact direct plus performants en termes de consommation d'énergie et de qualité. Une cuisson non maîtrisée ou l'utilisation de matériel non-approprié peut conduire à la formation de composés toxiques ou à la transmission par migration de particules vers l'aliment. En effet, ce type de cuisson, bien que très répandu est encore relativement peu étudié d'un point de vue scientifique pour des appareils domestiques.

La démarche mise en œuvre est dans un premier temps décrit. Pour évaluer le flux de chaleur transmis lors du contact et suivre les cinétiques de cuisson une expérimentation pilote bien instrumentée a été réalisée afin de suivre des cinétiques de cuisson dans différentes conditions.

Afin de bien appréhender les transferts par conduction directe un prototype de flux mètre a été développé. Le but des travaux est d'estimer le flux de chaleur transféré d'une plaque métallique chaude vers un produit alimentaire « froid » déposé sur celle-ci. L'évolution du flux est obtenue par le biais des techniques inverses et l'exploitation de mesures de températures au sein de la plaque chauffante. Le produit alimentaire est mis rapidement en contact, moins d'une seconde et donc, le flux thermique présente de grandes variations.

Dans le cadre de cette communication des essais de cuisson d'un produit relativement complexe sont présentés. Il s'agit d'un produit céréalier à pâte jaune qui subit différentes transformations couplées à des transferts de chaleur et de masse lors de la cuisson. Les cinétiques de cuisson sont obtenues par le biais de capteurs de température, une mesure en temps réel de la perte de masse et un suivi de la déformation.

La confrontation de simulations numériques par un modèle multi-physiques aux cinétiques mesurés montre la pertinence de ces travaux.

Étude d'une mousse métallique associée à un réseau de caloducs pour améliorer le contrôle thermique de moules d'injection

Marie Leveque², Frédéric Lefèvre¹, Stéphane Lips¹, Valérie Sartre^{1,*}

* ✉ : valerie.sartre@insa-lyon.fr

¹ CETHIL INSA Lyon UMR 5008

² CETHIL INSA Lyon

Mots clés : Caloducs, Mousse métallique, Moules d'injection, Refroidissement par air, Modèle nodal

Résumé :

Dans le domaine de l'injection des pièces en polymère, la régulation thermique des moules est un enjeu fondamental dans le sens où la qualité des pièces ainsi que leur fréquence de production en dépend. Ainsi, la température de la surface moulante doit être la plus uniforme possible. En outre, une réduction de l'inertie thermique du moule est souhaitable afin de raccourcir la durée des cycles de moulage. Actuellement le refroidissement du moule est effectué à l'aide d'une circulation d'eau qui permet une excellente efficacité thermique. Cependant, cette technologie induit une inhomogénéité de température de la surface moulante et la détérioration des canaux par encrassement et corrosion. La solution proposée consiste à insérer dans le moule une mousse métallique refroidie par air.

Les mousses métalliques sont utilisées dans de nombreuses applications : elles contribuent à l'allègement des pièces métalliques, tout en leur assurant une grande rigidité mécanique. Cependant, par rapport à une pièce massive, l'efficacité du transfert de chaleur conductif est moindre. Nous avons pour objectif de la compenser par insertion des caloducs.

Dans ce but, un banc expérimental est mis en place. Les mousses sont percées selon leur hauteur de quatre trous cylindriques non débouchant, pour accueillir des caloducs. Elles sont chauffées sur leur paroi inférieure par un bloc en acier simulant le polymère à refroidir. Le refroidissement est effectué soit par convection naturelle, soit par convection forcée d'air au sein de la mousse. Des thermocouples placés sur les parois et autour de la mousse permettent de déterminer l'efficacité thermique du système ainsi que sa capacité à homogénéiser la température au sein de la mousse.

Un modèle nodal déterminant le champ de température dans le système mousse-caloducs est construit. L'inversion de ce problème par identification avec les résultats expérimentaux permet de retrouver les paramètres influant sur son efficacité thermique : conductivité thermique effective de la mousse, coefficients d'échange convectif, résistance de contact caloduc/mousse.

Cette étude expérimentale montre qu'un soufflage d'air au sein de la mousse peut permettre le refroidissement efficace du moule, si tant est que la vitesse d'air est suffisamment élevée. Lorsque la vitesse d'air est faible ou lorsque la convection est naturelle, les caloducs permettent alors une augmentation significative de l'efficacité du transfert de chaleur dans le bloc de mousse ou de l'homogénéité de sa température.

Méthodologie de dimensionnement d'un dissipateur thermique pour les dernières générations de convertisseurs de puissance

Gael Pongnot², Mickael Petit³, Marie-Christine Duluc^{1,*}, Clement Mayet³, Denis Labrousse³

* ✉ : marie-christine.duluc@lecnam.net

¹ CNAM

² Ecole normale supérieure Paris-Saclay

³ Ecole normale supérieure Paris-Saclay, CNAM

Mots clés : Dissipateur thermique, dimensionnement, optimisation

Résumé :

La miniaturisation croissante des composants électroniques de puissance, ainsi que leur intégration, conduit à une augmentation des densités de flux de chaleur à dissiper. De ce fait, le refroidissement des composants devient la contrainte dimensionnante des dernières générations de convertisseurs de puissance. Dans la communauté du génie électrique, les problématiques de refroidissement thermique en régime stationnaire sont couramment étudiées au moyen de modèles empiriques simples du type « cône de diffusion » dans le dissipateur thermique (ou « spreader »). Ces méthodes reposent davantage sur un savoir empirique que sur un dimensionnement clair s'appuyant sur la formulation rigoureuse d'un problème de conduction thermique. Les géométries complexes sont, quant à elles, abordées à l'aide de simulations numériques par éléments finis. Ces dernières sont pertinentes pour confirmer le bon fonctionnement d'un système complet mais ne sont pas généralisables. Elles sont par conséquent difficiles à utiliser dans le cadre d'études préliminaires (ou d'optimisation), pour lesquelles de nombreux paramètres électriques et thermiques restent à définir.

Nous proposons ici d'aborder le problème du dimensionnement géométrique d'un dissipateur thermique associé à une puce quelconque donnée. Considérant une approche bidimensionnelle et un régime permanent, représentatif du fonctionnement de systèmes de conversion DC-DC, une solution analytique de conduction thermique est proposée dans le cas d'un dissipateur rectangulaire thermiquement et électriquement isotrope. La paroi inférieure du dissipateur est soumise sur une partie de sa longueur à une densité de flux représentant le composant. La paroi supérieure du dissipateur échange par convection avec le fluide de refroidissement. Un terme source représentant le passage du courant d'alimentation dans le dissipateur est également pris en compte. La modélisation proposée considère une architecture de composant intégrée avec un refroidissement non-isolé électriquement, car elle requiert peu de paramètres et permet d'obtenir de très bonnes performances thermiques en comparaison des technologies classiques de refroidissement isolé. Un adimensionnement permet de réduire l'espace des paramètres physiques, au nombre de sept, en quatre groupements adimensionnés, ce qui simplifie considérablement l'analyse. La résolution de l'équation de la chaleur en régime stationnaire, à l'aide des séries de Fourier, donne accès aux champs de température et de densité de flux de chaleur en tout point du dissipateur. On en déduit la résistance thermique du dissipateur, grandeur fondamentale pour l'électronicien de puissance lui permettant en particulier d'estimer la température de la puce. La répartition de la densité de flux de chaleur sur la face supérieure du dissipateur, en contact direct avec le fluide de refroidissement, présente également un grand intérêt : l'étude quantitative du concept de « cône de diffusion » devient enfin abordable.

L'influence des paramètres adimensionnés sur la résistance thermique du dissipateur et l'étalement du flux de chaleur est étudiée afin d'élaborer une aide à la décision. En particulier, deux méthodes seront présentées : la première permet d'obtenir les dimensions optimales du dissipateur connaissant le composant de puissance et son point de fonctionnement ; la seconde donne le point limite de fonctionnement du composant connaissant la source de refroidissement disponible.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-050>

Modèle semi-analytique d'un caloduc capillaire cylindrique en régime transitoire avec conditions aux limites de flux imposés

Nicolas Blet^{1,*}

* ✉ : nicolas.blet@univ-lorraine.fr

¹ LEMTA - Université de Lorraine

Mots clés : Caloduc cylindrique, Modèle semi-analytique, Régime transitoire, Quadripôles thermiques

Résumé :

Les modèles numériques des caloducs capillaires deviennent aujourd'hui abondants pour simuler leur fonctionnement en régime permanent ou transitoire. Ils s'appuient le plus souvent sur la résolution des équations bilans par éléments ou volumes finis, ou sur des méthodes plus récentes comme Lattice-Boltzmann. Cependant, tous ces modèles sont encore assez coûteux en temps de calcul pour permettre à la fois un dimensionnement rapide du caloduc et une estimation précise des transferts de chaleur. Ainsi, ces dernières années, un léger retour à l'utilisation de modèles analytiques a été observé.

Un modèle analytique en régime permanent pour caloduc cylindrique a été récemment développé pour simuler les transferts par conduction 2D ou 3D au sein de l'enveloppe et de la mèche poreuse du caloduc, ainsi que les écoulements liquide et vapeur. Ce modèle s'appuie sur l'utilisation de transformations intégrales de Fourier et, de manière originale, sur une représentation par quadripôles thermiques des transferts de chaleur. Une résolution analytique directe ou une procédure itérative rapide est mise en place selon la nature des conditions aux limites interne (interface liquide/vapeur) et externes (chauffage, refroidissement et pertes).

La présente communication expose le développement d'un modèle en régime transitoire, en partant des modèles en régime permanent. Un cas particulier est ici présenté pour un caloduc capillaire cylindrique soumis à des conditions axisymétriques de flux imposés à l'évaporateur et au condenseur. La démarche de modélisation et la représentation quadripolaire des transferts de chaleur sont établies en appliquant une double transformée intégrale de Fourier (en espace) et de Laplace (en temps). La détermination des champs 1D de pression et de vitesse des écoulements liquide et vapeur est ensuite développée. Alors que la transformée inverse de Fourier s'effectue directement de manière analytique, une méthode numérique standard est utilisée pour permettre le calcul des transformées inverses de Laplace.

Les résultats thermohydrauliques du modèle présenté sont comparés à ceux de la littérature pour validation. Dans le cas de flux imposés uniformes, le développement analytique permet également d'introduire des propriétés intrinsèques (impédances et transmittances) du comportement thermohydraulique du caloduc vis-à-vis des sollicitations externes. Les travaux effectués aident ainsi à généraliser la méthode de mise en œuvre de ce type de modèles analytiques pour le dimensionnement des caloducs capillaires.

Influence d'un écoulement souterrain sur les performances d'un système de fondations géothermiques

Badr Ouzzine^{1,*}, Jean De Sauvage¹, Thibault Badinier¹, Fabien Szymkiewicz¹

* ✉ : badr.ouzzine@univ-eiffel.fr

¹ GERS-SRO, Univ Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée

Mots clés : Groupe de pieux géothermiques, écoulement, coefficient de performance, modélisation numérique, modélisation physique

Résumé :

L'évolution actuelle des villes nécessite des quantités d'énergie grandissantes et les enjeux écologiques actuels, soutenus par les réglementations thermiques qui régissent les constructions poussent au développement d'énergies propres et renouvelables. C'est dans ce contexte que se développent les fondations géothermiques depuis les années 80.

Il s'agit d'une solution de géothermie de basse énergie où des tubes en polyéthylène sont fixés aux cages d'armature de fondations telles que des pieux. Un fluide calorifique circule alors dans ces tubes du sol jusqu'au bâtiment en passant par une pompe à chaleur inversible pour puiser la chaleur du sol afin de chauffer le bâtiment en hiver et vice-versa en été. On confère donc un rôle énergétique d'échange de chaleur aux fondations qui n'avaient jusqu'alors qu'un rôle mécanique de stabilité.

En comparaison d'autres solutions de géothermie, cette technique présente l'avantage de pouvoir être installée en temps masqué (donc réduire le temps de chantier) et sans forage supplémentaire (donc réduire les émissions de CO₂). Enfin, il s'agit d'une source d'énergie renouvelable, non intermittente et que l'on peut aisément coupler avec des apports photovoltaïques ou éoliens puisque reposant sur le fonctionnement d'une pompe à chaleur.

L'injection ou le prélèvement de chaleur dans le sol génère une modification de la température qui se déplace dans ce milieu poreux, saturé ou non. Très fréquemment, un écoulement d'eau souterrain dans une ou plusieurs épaisseurs du sol impacte fortement le déplacement de cette anomalie thermique et peut générer des interactions positives ou négatives entre les fondations d'un bâtiment.

Une modélisation physique en semi-vraie grandeur a été réalisée dans SenseCity, une chambre à climat contrôlable pouvant recouvrir deux espaces de 400m². Sur chacun de ces espaces, est construite une portion de territoire, appelée Mini-Ville et l'un d'eux est équipé d'une fosse géothermique au sein de laquelle un écoulement peut être imposé. Un groupe de neuf pieux géothermiques y a été réalisé et instrumenté à l'aide de fibre optique.

Une modélisation numérique thermo-hydraulique a été effectuée par éléments finis et confrontée aux résultats expérimentaux précédents. Le couplage de ce modèle numérique à un programme simulant la demande de puissance d'une pompe à chaleur a ensuite permis de déterminer les puissances extractibles par ce groupe de pieux géothermiques. L'influence des caractéristiques de l'écoulement souterrain sur le coefficient de performance de la pompe à chaleur a également été étudiée.

Optimisation multicritère d'un système solaire thermique avec un stockage inter-saisonnier

Arnaud Lapertot^{1,*}, Benjamin Kadoch¹, Olivier Le Metayer¹

* ✉ : arnaud.lapertot@etu.univ-amu.fr

¹ Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453, Marseille, France

Mots clés : aide à la décision, système énergétique, énergie renouvelable, optimisation multi-objectif.

Résumé :

Le secteur résidentiel représente environ 45 % de la consommation d'énergie finale en France. Il est donc important de rendre nos bâtiments moins énergivores et plus autonomes. Une des solutions possibles est d'utiliser un système énergétique basé sur les énergies renouvelables. Cependant, le dimensionnement d'un tel système est difficile à mettre en œuvre, c'est pour cela que les outils de simulation et d'optimisation doivent être envisagés afin d'estimer la configuration optimale. La modélisation du système est constituée d'un bâtiment résidentiel et d'un système énergétique qui permet de répondre aux besoins de chauffage en hiver et d'eau chaude sanitaire (ECS) tout au long de l'année. Le système est capable de collecter l'énergie solaire à l'aide de ses panneaux solaires thermiques afin de la stocker soit dans un stockage de chaleur inter-saisonnier (IS) soit dans un ballon d'ECS. Le stockage IS permet de conserver l'énergie solaire pendant l'été et de la réutiliser pendant l'hiver, lorsque les besoins en chauffage sont les plus importants. Le but de cette étude est d'utiliser une méthodologie d'optimisation multicritère à ce système énergétique complexe. Cette procédure est appliquée aux variables de dimensionnement tels que les caractéristiques des capteurs solaires et des stockages de chaleur, ainsi qu'aux paramètres de régulation tels que la différence entre les températures d'entrée et de sortie des capteurs solaires et le volume de consigne. Les objectifs du problème d'optimisation sont simultanément de maximiser la fraction solaire, de minimiser le coût de l'énergie et les émissions de CO₂. La méthodologie est composée d'une analyse de sensibilité pour sélectionner les paramètres influents, d'une optimisation multi-objectif pour déterminer le front de Pareto et d'une aide à la décision multicritère pour sélectionner le meilleur compromis. Les résultats montrent que les objectifs sont contradictoires et n'évoluent pas dans le même sens, ce qui permet d'identifier l'ensemble des bons compromis pour les objectifs considérés. La méthodologie d'optimisation permet d'obtenir un système énergétique rentable et autonome. Dans ces travaux, une étude de la stratification du stockage de chaleur est prise en compte afin de voir l'impact sur la solution optimale.

Étude expérimentale à échelle réduite d'un bassin de toit – performance de rafraîchissement en climat océanique

Feryal Chtioui^{1,*}, Jean-Paul Baroux¹, Emmanuel Bozonnet¹, Patrick Salagnac¹

* ✉ : feryal.chtioui1@univ-lr.fr

¹ LaSIE UMR 7356 - La Rochelle Université

Mots clés : Expérimentation, Rafraîchissement passif, Bassin d'eau, Toiture, Bâtiment

Résumé :

Depuis quelques années, on peut noter les conséquences du réchauffement climatique par l'augmentation des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses, précipitations abondantes, épisodes caniculaires. . .). Ces conséquences modifient fondamentalement les conditions environnementales dans lesquelles les bâtiments sont conçus pour fonctionner. Ainsi, un bâtiment, prévu initialement dans nos régions pour se protéger des rigueurs de l'hiver, doit s'adapter afin de préserver le confort thermique des occupants. Récemment, des efforts considérables ont été déployés pour développer de nouvelles solutions de rafraîchissement « passives » afin de limiter les surchauffes estivales et de diminuer la consommation énergétique des systèmes de climatisation des bâtiments.

Dans ce papier, on s'intéresse plus particulièrement à une technique de rafraîchissement passif qui est la rétention d'eau. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'intérêt de ce système par rapport à d'autres technologies. Pour cela, un prototype expérimental à échelle réduite, représentant un bâtiment climatisé possédant une toiture-terrasse, a été mis en place et instrumenté. Différents prototypes de toitures sont considérés (bitume, revêtement « cool », bassin d'eau) et testés en climat océanique (La Rochelle, France). Ce prototype permet d'évaluer le flux de chaleur traversant la toiture, les températures de surface de l'enveloppe et de l'ambiance intérieure. Les différentes techniques de rafraîchissement passif ainsi que la référence bitumineuse testées sont comparées en prenant en considération les mêmes conditions météorologiques données par une station météorologique.

Les résultats montrent que, dans un climat océanique (La Rochelle), les solutions du revêtement « cool » et du bassin d'eau génèrent un refroidissement passif significatif en termes de réduction de température de surface de toiture. Pour le bassin d'eau, cette baisse de température de surface par rapport à une toiture bitumineuse sèche peut atteindre 27°C, permettant ainsi de minimiser les charges thermiques traversant la toiture et de réduire de façon importante les besoins en climatisation pendant la période estivale.

Quench water quality thermal impact estimation

Juan Jesus Huapaya Otoyá², Marcello Bentivegna^{1,*}, Valentin Spitaels¹, Kevin Cornut¹

* ✉ : marcello.bentivegna@vallourec.com

¹ Vallourec Research Center france

² Titane/ Vallourec Research Center france

Mots clés : Quench quality, water pollutants, cooling

Résumé :

Since many years the thermal characterisation of the heat treatment quench for carbon steel is a key topic in Vallourec. The cooling medium is one of the factors that can influence this process. It plays an important role on the quality of the cooling and the physical properties of the as-quenched products.

No control of the water quality may imply possible quality consequences such as the manifestation of quench's cracks, lack of hardness or a global bad "as quenched" thermal homogeneity of the carbon steel. In mass plants case, the quenching medium can be polluted by agents e.g. mechanical oil, free gas in the water or products scale which could modify the power cooling of the water. Filtering systems or degassing tanks are installed on the process water recirculating systems to mitigate these issues.

In this context, a test routine conform with the norm ISO 9950 has been prepared to evaluate the thermal impact of pollutants on the quench severity. The trials are performed on specimens in Inconel 600, accordingly with ISO 9950. The set-up consists of a bath filled with demineralized water, a furnace, a data recorder connected to the instrumented sample and the support for the sample. The currently analysed pollutants are free gas, mechanical oil, and a mix of steel scale and mechanical oil.

Results are analysed taking as reference the 100 % "demineralized" water quench severity case. The trials are performed under static conditions : calm cooling medium and no movement of the specimen during quenching. We can assume that these pollutants intrinsically affect the cooling power of the water.

The aim of the trials is to show a global statistical behaviour of the impact of the different pollutants that can increase or decrease the normal cooling speed. That analysis can help in the choice of the criteria for quenching recirculating system maintenance accordingly with the optimal thermal performance of the process.

Approche expérimentale du phénomène d'adhésion lors de la mise en forme de produits verriers : étude de l'échange thermique et détermination de l'effort de retrait

Oumaima Aroubi¹, Damien Meresse¹, Philippe Moreau¹, Mirentxu Dubar¹, Salima Bouvier²

* ✉ : oumaima.aroubi@uphf.fr

¹ Université Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH UMR CNRS8201, Le Mont-Houy, Valenciennes (France)

² Université de technologie de Compiègne, CNRS, Roberval, Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60 203 Compiègne Cedex

Mots clés : échange thermique, adhérence, verre, contact verre/métal

Résumé :

La qualité surfacique sans défaut des produits verriers est l'enjeu majeur pour l'industrie verrière de luxe. Cette qualité de produit est fortement liée à la maîtrise du contact verre-métal et au vieillissement des outillages. La mise en forme du verre génère des phénomènes de contact complexes qui peuvent conduire au collage, avec notamment une influence des transferts thermiques importants entre le verre et le moule.

Une étude bibliographique concernant les bancs d'essais développés pour étudier les différentes problématiques de contact verre/moule, a permis de mieux comprendre les phénomènes susceptibles d'apparaître lors du contact et les phénomènes les plus importants à étudier. Il a été conclu que l'étude de transfert thermique et de collage est très importante. Le succès du formage du verre dépend alors de la parfaite maîtrise de ces phénomènes pour éviter l'apparition de défauts sur la surface du verre.

Les présents travaux concernent la conception d'un banc expérimental instrumenté permettant de reproduire les conditions industrielles au moment du contact verre/moule. Ce banc est capable de caractériser l'échange thermique et d'évaluer l'adhérence entre le verre à haute température et les différents matériaux représentant la surface de contact du moule. Les paramètres de l'étude sont la pression de contact, le temps de contact et les températures initiales du verre et du moule. Leur influence est mise en évidence au travers de résultats sur les profils de température et les efforts de retraits, caractéristiques des phénomènes d'adhérence rencontrés.

Cette communication décrit le dispositif expérimental qui a été dimensionné pour reproduire les conditions de contact rencontrées en milieu verrier avec la possibilité de mesurer parallèlement l'effort de retrait et d'évaluer l'échange thermique dans des gammes de température peu étudiées à ce jour.

Les premiers résultats en termes d'évolution de la température dans le moule et l'effort de retrait après le contact sont présentés pour différentes pressions de contact et différentes températures initiales de verre.

Etude de la combinaison de panneaux aérovoltaiques améliorés et d'un bâtiment énergétiquement performant

Benoit Liemans¹, Véronique Feldheim¹, Daniel Bougeard¹, Serge Russeil¹

* ✉ : benoit.liemans@umons.ac.be

¹ Membre

Mots clés : convection, photovoltaïque, solaire, bâtiment performant, turbulence, efficacité énergétique

Résumé :

Le rendement des panneaux photovoltaïques à base de cellules de silicium monocristallin est actuellement de l'ordre de 17 % et celui-ci se dégrade dès que la température des cellules dépasse les 25°C. Dès les années 70, des capteurs mixtes (solaires thermiques et photovoltaïques) sont étudiés et mis au point afin d'exploiter la partie de l'énergie solaire non convertie en électricité.

Depuis quelques années, de plus en plus d'études s'intéressent aux voies d'amélioration de ces capteurs. Nous pouvons citer entre autres le recours à la convection forcée de l'air, l'utilisation d'un fluide circulant dans un serpentin à l'arrière du panneau ou encore l'ajout d'ailettes mais celle qui nous intéresse est l'amélioration du coefficient d'échange entre l'air et l'arrière du panneau via l'utilisation d'ailettes génératrices de vortex.

Une étude de 2017 de A. Khanjian a montré que l'utilisation d'ailettes génératrices de vortex permettait sous certaines conditions une amélioration du nombre de Nusselt de l'ordre de 40 % pour les transferts de chaleur dans un conduit de section rectangulaire. Parallèlement, S. Chamoli a publié en 2018 une corrélation pour déterminer le Nusselt dans le chenal d'un capteur solaire thermique sur base de simulations dynamiques.

Cette communication est réalisée dans le cadre d'un projet qui consiste à étudier, modéliser et monitorer les interactions entre une installation photovoltaïque améliorée et un bâtiment énergétiquement performant afin d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables en fonction des besoins de ce dernier.

Nous avons développé et implémenté un modèle 1-D paramétrique d'un ensemble de panneaux photovoltaïques modifiés, nous permettant de pouvoir considérer l'ajout d'ailettes génératrices de vortex dans un canal de circulation de l'air à l'arrière des panneaux. Cet air peut être introduit dans le bâtiment au travers du système de ventilation.

Pour les besoins de la simulation, nous avons considéré que le bâtiment était composé de 2 bureaux d'une personne utilisés uniquement du lundi au vendredi de 7h à 18h et équipés d'une ventilation double flux avec récupération de chaleur et by-pass. Nous limitons notre étude aux besoins en chaleur et en froid, assurés par une pompe à chaleur air-air et aux besoins électriques des équipements de bureau.

L'article détaillera le résultat des simulations effectuées sur le système « bâtiment + capteurs » en mettant l'accent sur la sensibilité du modèle à différents paramètres tels que débit d'air, hauteur du chenal, inclinaison et orientation des panneaux, etc.

Développement d'un dispositif expérimental de surmoulage permettant la mesure de la résistance thermique de contact pièce polymère/pièce polymère en conditions industrielles

Pierre Le Mouellic^{1,*}, Nicolas Boyard¹, Jean-Luc Bailleul¹, Nicolas Lefevre¹, Thierry Gaudry², Jean-Marc Veillé²

* ✉ : pierre.lemouellic2@cooperstandard.com

¹ Nantes Université, CNRS, Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, LTeN, UMR 6607, F-44000 Nantes, France

² Cooper Standard, Route des Eaux, 35503 Vitré, France

Mots clés : Surmoulage, élastomère thermoplastique vulcanisé, Adhésion, Résistance thermique de contact, Cristallisation

Résumé :

Dans l'industrie automobile, les joints d'étanchéité sont fabriqués par surmoulage de profils en élastomères extrudés. Les élastomères thermoplastiques vulcanisés (TPV) constituent un des types d'élastomères utilisés. Ce type d'élastomère thermoplastique est produit par un procédé de vulcanisation dynamique, dont la morphologie résultante est constituée d'une phase élastomère dispersée au sein d'une matrice thermoplastique. Lors du procédé de surmoulage, la qualité du contact thermique est essentielle pour développer la résistance mécanique de l'assemblage. Cet article vise à évaluer, pour la première fois, la qualité du contact thermique entre le TPV extrudé et le TPV injecté (surmoulage) pendant les phases de maintien et de refroidissement. Le contact entre le TPV injecté et le moule est également considéré. A cette fin, un moule expérimental instrumenté a été conçu. Des capteurs de flux et de pression ont été classiquement intégrés dans les parois du moule. L'originalité du travail consiste à intégrer des capteurs de flux dans l'insert pendant l'injection et dans la cavité du moule accueillant le TPV de surmoulage. Outre la connaissance des champs de température pendant tout le cycle de surmoulage, l'évolution de la résistance thermique de contact entre le TPV extrudé et celui surmoulé est identifiée sur le cycle complet.

Un problème de conduction thermique inverse est utilisé pour déterminer l'évolution temporelle de la température de surface de l'insert ou du moule et du matériau injecté. Les densités de flux de chaleur traversant les interfaces sont également identifiées. La spécificité de la méthode développée est d'obtenir des informations quantitatives non intrusives pour la température de surface et les flux de chaleur. Ces mesures sont utilisées pour calculer la résistance de contact thermique (RT_C). Les niveaux de température mesurés pendant le surmoulage ont ensuite été comparés à ceux calculés à l'aide d'un schéma unidirectionnel utilisant les conditions aux limites déterminées expérimentalement. Les premiers résultats expérimentaux mettent en évidence l'influence du gradient de cristallisation sur la RT_C .

Prise en compte du confort des usagers dans les projets de réhabilitation

Zineb Jkaoua¹, Alain Sempey², Eric Larrey³, Aline Barlet⁴, Hélène Desbiyes³, Denis Bruneau²

* ✉ : zineb.jkaoua@u-bordeaux.fr

¹ Verdi ingénierie, Université de bordeaux I2M

² Université de bordeaux, I2M

³ Verdi ingénierie

⁴ Université de bordeaux

Mots clés : méthode participative, confort, usagers, indices thermiques

Résumé :

L'adaptation au changement climatique est un enjeu majeur pour notre société, certains effets comme l'intensification et l'augmentation des épisodes de chaleur sont devenus inévitables, engendrant des conséquences parfois mortelles. La surchauffe urbaine rend les activités quotidiennes des usagers dans les espaces de vie extérieurs comme intérieurs inconfortables voir pénibles et participe en grande partie à l'augmentation de la demande énergétique des bâtiments. La priorité pour faire face au réchauffement climatique n'est plus aux constructions neuves performantes énergétiquement. Les efforts doivent se tourner vers le réaménagement des espaces urbains dans les zones denses et la réhabilitation des bâtiments.

Afin d'adapter les projets à leur futur environnement climatique, il devient essentiel voir nécessaire d'élaborer de nouvelles méthodes. Il est notamment primordial de centrer l'approche sur l'humain et d'intégrer les usagers dès la phase de programmation des projets de réhabilitation des bâtiments et des espaces extérieurs. Les démarches participatives et la compréhension des besoins, des ressentis et des attentes des usagers permettent de proposer des informations et des solutions pertinentes aux décideurs afin de produire un projet de qualité, viable et désirable. Un projet durable demande l'implication des acteurs de la décision, de la conception et plus spécialement de l'usage. Ça permet de favoriser la création de liens entre l'homme et son environnement grâce à la participation à une prise de conscience collective.

Ces travaux portent ainsi sur la proposition d'une méthode participative de prise en compte de l'utilisateur adaptée à la pratique, dans le but de permettre aux concepteurs de réaliser des opérations de réhabilitation durable. Un certain nombre d'indices ont été conçu pour décrire le degré de confort thermique humain en associant les conditions microclimatiques locales et la sensation thermique humaine. Pour cela, nous avons souhaité étudier les différentes stratégies d'évaluation du confort en utilisant des indicateurs issue de mesures physiques ou de données perceptives à l'aide d'enquête. Le but est de développer et trouver des méthodes et des outils adaptés permettant l'évaluation et la prédiction du confort. Cela s'est également effectué par le déploiement de capteurs et d'instruments de mesures de différents paramètres, mais aussi par la modélisation des ambiances climatiques à très fine échelle.

Analysis on applicability of phase change material glazing unit in different climate conditions

Zhenhao Zhang², Karkri Mustapha^{1,*}

* ✉ : mustapha.karkri@u-pec.fr

¹ Université Paris Est Créteil Val de Marne

² Xi'an University of Architecture and Technology

Mots clés : Phase change material ; Solar radiation ; Diurnal temperature range ; Inner surface temperature ; Total heat flow

Résumé :

Thermal performance of phase change material (PCM) glazing unit in summer under different climatic conditions is studied by numerical simulation in this paper. Through analyzing the data of meteorological stations in all provinces of China, the law that strong solar radiation (SR) will be accompanied by large diurnal temperature range (DTR) and weak SR will be accompanied by small DTR is discovered. Taking the inner surface temperature of glazing unit (T_{sur}) and total heat flow entering indoor side through glazing unit (Q_{total}) as the evaluation indexes, the applicability of PCM glazing unit under twelve different working conditions of strong SR with large DTR and weak SR with small DTR is analyzed. The results show that, from the point of view of T_{sur} , PCM glazing unit has better thermal performance than ordinary double-layer glazing unit under all working conditions (T_{sur} is reduced by 1 % - 19 %). In addition, compared with the conditions of weak SR and small DTR (T_{sur} is reduced by 6 % on average), PCM glazing unit is more applicable under conditions of strong SR and large DTR (T_{sur} is reduced by 13 % on average). From the perspective of Q_{total} , PCM glazing unit still shows a better thermal performance than ordinary double-layer window unit (Q_{total} is decreased by 4 %-80 %). Different from the conclusions when T_{sur} is used as the evaluation index, PCM glazing unit seems to be more suitable for the condition of weak SR and small DTR (Q_{total} is decreased by 35 % on average) rather than strong SR and large DTR conditions (Q_{total} is decreased by 26 % on average). This may be the result of inappropriate thickness of the PCM layer in this simulation, resulting in insufficient heat storage capacity of PCM glazing unit to meet the intensity of SR. Therefore, the heat storage capacity of PCM should be matched with outdoor meteorological parameters to avoid excessive use of PCM (will make increasing costs and deteriorating indoor light environment) or inadequate amount of PCM (PCM will melts prematurely and does not conducive to indoor thermal environment).

Efficacité énergétique et consommation d'eau associés à différentes techniques de refroidissement évaporatif appliquées à un condenseur de climatisation

Stephanie Lacour^{1,*}, Christelle Périlhon², Alphonse Kouadio Diango³, Francois Trinquet¹

* ✉ : stephanie.lacour@inrae.fr

¹ Université de Paris-Saclay

² CNAM-Paris

³ INPHB

Mots clés : refroidissement évaporatif, condenseur de climatisation, consommation d'eau et d'énergie

Résumé :

Technique ancestrale de refroidissement, le froid évaporatif évolue suite à la désaffection pour les tours aéroréfrigérantes et au recours de plus en plus massif aux solutions de refroidissement évaporatif indirect, de brumisation et de pré-refroidissement adiabatique. Cette contribution vise à distinguer le pré-refroidissement adiabatique et le refroidissement par aspersion. Pour la première technique, l'objectif est de refroidir l'air d'entrée jusqu'à la température de saturation adiabatique. Cette dernière est déterminée par les conditions d'ambiance et les quantités d'eau pour atteindre cet objectif peuvent varier selon qu'on utilise un dispositif par ruissellement ou par brumisation. Dans le second cas, l'eau est injectée sur le corps de chauffe et le refroidissement obtenu, toujours lié à l'évaporation de l'eau, dépend plus de la température de chauffe et de la surface mouillée et moins des conditions d'ambiance. Dans cet article, nous étudions un système de pré-refroidissement adiabatique de l'air en entrée d'un condenseur de climatisation. Ce système, reposant sur une matrice de cellulose du type "cooling pad", est comparé à une solution de brumisation directe, mais partielle sur l'échangeur. Des mesures des conditions dans la boucle frigorifique permettent de quantifier les impacts de la brumisation sur les puissances frigorifiques produites et sur le coefficient de performance de la machine. La baisse de pression engendrée par l'amélioration des transferts thermiques permet de réduire la consommation d'énergie de la machine frigorifique : Les quantités d'eau mises en jeu sont également évaluées pour chacun de ces systèmes et on quantifie les gains énergétiques apportés par les systèmes évaporatifs en regard des quantités d'eau mises en jeu pour refroidir. L'effet des conditions météorologiques sur les systèmes est analysé. L'ensemble permet d'apprécier les efficacités relatives de ces deux techniques en fonction des conditions ambiantes et d'apprécier leur intérêt environnemental en terme d'énergie et d'eau, deux des enjeux majeurs de la transition énergétique.

Correlation between field-test and laboratory results for a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) used as a residential cogeneration system

Nicolas Paulus^{1,*}, Camila Davila¹, Vincent Lemort¹

* ✉ : nicolas.paulus@uliege.be

¹ Université de Liège

Mots clés : PEMFC, field-test, modelling, in-situ, monitoring, laboratory

Résumé :

In the much-needed energy transition, focus is often brought to hydrogen and Fuel cells applications. This is even the case at a residential level as FC fed by natural gas (methane) are already commercialised as micro-combined heat and power (micro-CHP) units. One of the latter systems, investigated in this study, is a PEMFC-gas boiler hybrid system, fed by natural gas, designed to provide all the heat demands of residential houses and to participate locally in the electrical production. Thanks to high integration levels, it combines the same PEMFC of nominal constant power of 0.75kW_{el} and 1.1kW_{th} with the same 220L DHW (Domestic Hot Water) tank. The gas boiler, mainly used for peak heat demands, is able to condense and is designed to provide up to 30.8kW_{th} of thermal power. In previous work, this machine has been studied thanks to in-situ monitoring data in two houses in Belgium for the whole year 2020. Recently, an empirical polynomial model of the machine for daily efficiencies (electrical and thermal) has been established based on the energy demands of the building. It is mainly based on the DHW and space heating demands but it also considers the daily electrical production that can be achieved by the machine. This model has been chosen because it showed a quite satisfying goodness of fit for all the field-test results, whatever the house and the season considered.

This machine has also been acquired and tested in the facilities of the University of Liege for quite exhaustive testing. The results this work is based upon are the one conducted in steady-state operating conditions are resumed in this paper.

Lab testing steady-states studies and real field-test applications are usually very different because the operating conditions seen in practice are very specific to the installation, the climate and the behavior of the occupants. Despite that, this work's purpose is to study how a correlation between field-test real results and steady-state lab results can still be conducted and how both studies can fit with one another.

3E analysis of a hybrid renewable energy system

Sonja Kallio¹, Monica Siroux¹

* ✉ : monica.siroux@insa-strasbourg.fr

¹ INSA STRASBOURG ICUBE

Mots clés : hybrid system, renewable energy, microcogeneration, 3E analysis

Résumé :

A micro combined heat and power (micro-CHP) unit generates simultaneously heat and power from a single fuel source at high efficiency for buildings. The micro-CHP unit can be fuelled by renewable energy sources, such as solar or biomass. The photovoltaic-thermal (PVT) collector converts solar energy to electricity and heat, simultaneously. On the other hand, the Stirling engine powered micro-CHP unit produces, in a controlled manner, energy from biomass. To support fluctuating solar based cogeneration, a hybrid renewable energy system (HRES) is formed by combining the PVT collectors and controllable Stirling engine micro-CHP unit with multi-port thermal energy storage. In addition to support fluctuating solar energy production, the hybridization enables high efficient and 100 % renewable energy production, increased reliability and flexibility, and a reduction in CO₂ emissions, primary energy use and costs. However, the HRES based on the different micro-CHP units requires further analysis, especially, in terms of dynamic simulation due to highly dynamic behaviour of the PVT collectors and thermal load of the building. In this paper, a dynamic model of the described HRES is presented and built to Matlab/Simulink in order to perform energy, exergy and exergo-economic analysis of the system. The system produces domestic hot water (DHW), space heating and electricity for residential building use under climate conditions of Strasbourg, France. The hourly demand and weather data are used to simulate the operation of the HRES. In addition to energy and exergy analysis, the exergo-economic analysis is performed which combines exergy with economic analysis. This method is used to allocate the investment and operation costs of the system to the energy products. The exergo-economic method is extremely useful when the energy system has multiple inputs and outputs with different exergy levels. In addition to the 3E analysis, a sensitivity analysis is conducted to see how the number of the PVT collectors and the size of the storage tank will influence on the exergo-economic costs of the thermal and electrical energy products. As a result, the seasonal variations on the energy and exergy efficiencies are presented on the component and system level. Additionally, the monthly fuel exergy, exergy destruction in the components and exergy products of the system are presented. Finally, the monthly variation of the exergo-economic costs of the energy products is presented and discussed. The results showed that combining the free solar energy production with costly biomass energy conversion reduced the specific cost of electricity and increased the electricity production capacity of the system. The specific costs of the energy products varied seasonally and the specific cost of electricity was relatively high compared to the electric grid price due to high initial investment costs of the HRES.

Analyse du risque sanitaire provoqué par l'utilisation d'un échangeur air-sol (EAHE)

Geoffroy Chardome^{1,*}, Véronique Feldheim¹

* ✉ : geoffroy.chardome@umons.ac.be

¹ UMONS - Faculté Polytechnique - Service de Thermique et Combustion

Mots clés : ventilation – échangeur air-sol – EAHE – microorganismes – IAQ

Résumé :

L'efficacité énergétique des bâtiments est essentielle à la réussite de la transition énergétique. Afin de limiter la consommation d'un bâtiment, un puits canadien peut-être couplé au système de ventilation mécanique. Cette technique utilise la capacité thermique de la terre, pour amortir et déphaser la variation périodique de la température extérieure. L'air transportant également de l'humidité, un phénomène de condensation va apparaître principalement en période estivale. Cette condensation va s'accumuler et créer un biotope propice au développement de microorganismes qui pourraient contaminer l'air de ventilation. Cette étude a donc deux objectifs. Premièrement, réaliser un modèle permettant de quantifier en températures et en volume les condensats produits par un puits canadien. Deuxièmement réaliser l'étude de la biocénose présente sur différents sites et pour différentes saisons afin de déterminer si des pathogènes sont présents et si ceux-ci peuvent passer d'un site à l'autre. Les pathogènes étant identifiés, leurs conditions de développement pourront être comparées aux résultats des modélisations. Différents modèles numériques d'un EAHE ont été développés et validés avec des mesures expérimentales sur une période d'un an en utilisant un pas de temps d'une heure. Afin de limiter le temps de calcul nécessaire à l'étude de la configuration 3D instationnaire, un modèle pseudo-3D a été utilisé pour déterminer le champ de température et les flux échangés. L'EAHE étudié est constitué de deux tuyaux enterrés à une profondeur allant de 1,25 m à l'entrée à 2 m à la sortie sur une longueur de 25 m. La pente de 3 % permet l'évacuation des condensats et les concentre dans un volume à base cylindrique. La comparaison du modèle et des relevés expérimentaux donne, pour la température en sortie du EAHE, une erreur absolue moyenne de l'ordre de 0,7 °C et une erreur maximum inférieure à 3 °C. La quantité de condensats produits durant l'année de référence (2015) est de 25.22 kg et les températures de ceux-ci sont comprises entre 3°C et 23 °C. Pour analyser les différents biotopes, l'installation étudiée a fait l'objet de deux campagnes d'échantillonnage. La première étape de ces campagnes a été la mise au point d'un système de captation des microorganismes présents dans le milieu aérien. Les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une extraction d'ADN et d'un séquençage (Séquençage à haut débit-NGS sur une plateforme Illumina MiSeq pour une précision de l'ordre de 99.9 %). Les populations ciblées sont les populations bactériennes (en se basant sur le gène 16S rDNA) et fongiques (en se basant sur la sous-région ITS2). Le traitement bio-informatique des séquences obtenues (reads) a permis de les identifier (assignation taxonomique au niveau du genre et parfois de l'espèce). Les populations bactériennes et fongiques de l'air extérieur, de l'air à la sortie du puits, de l'air à l'intérieur du bâtiment ainsi que des condensats sont analysées et comparées. Leur développement est mis en relation avec les niveaux de température atteints dans le puits.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-038>

Etude expérimentale des performances thermiques d'un mur Trombe

Afef Laribi^{1,*}, Valérie Lepiller¹, Sylvie Bégot¹, Yacine Ait Ouméziane¹, Philippe Désévaux¹

* ✉ : afef.laribi@univ-fcomte.fr

¹ Laboratoire Femto-st, Université de Bourgogne Franche Comté

Mots clés : Mur Trombe, énergies renouvelables, convection naturelle, rayonnement

Résumé :

Afin de limiter la consommation d'énergie carbonée et les émissions de gaz à effet de serre liées au secteur du bâtiment, les systèmes solaires passifs apparaissent comme une alternative intéressante pour répondre aux besoins de chauffage, de ventilation et de climatisation en permettant d'économiser jusqu'à 30 % d'énergie consommée. Une des techniques passives les plus performantes réside dans l'utilisation de murs Trombe. Leur intégration au bâtiment permet de valoriser le rayonnement solaire en associant deux phénomènes physiques : l'effet de serre à travers un vitrage et l'inertie thermique du mur.

Cette technique, qui a fait ses preuves en saison hivernale en permettant d'économiser jusqu'à 30 % d'énergie consommée, présente des inconvénients en été du fait de la surchauffe qu'elle peut engendrer en captant un maximum d'énergie solaire.

Ce travail porte sur l'étude expérimentale d'un mur Trombe et de son comportement thermique. Pour les besoins de cette étude, une maquette à échelle réduite a été réalisée et installée au sein de notre laboratoire. Elle représente un mur Trombe de type classique intégrant un local de dimensions 1,97 x 1,908 x 1,867 m³. Le mur Trombe est composé de l'extérieur vers l'intérieur d'un vitrage (8 mm d'épaisseur) séparé d'une paroi stockeuse opaque par une lame d'air ventilée d'épaisseur réglable et fixée dans le cadre de cette étude à 19 cm, ce qui correspond au dixième de la hauteur du mur. Afin de favoriser les échanges thermiques convectifs, des ouïes sont installées en parties haute et basse de la paroi stockeuse.

La maquette est construite en ossature bois isolée en polystyrène et la paroi stockeuse est en béton cellulaire d'épaisseur 20 cm peint en noir.

L'éclairement du mur est simulé par une source de lumière artificielle permettant de contrôler l'ensoleillement et dont le spectre lumineux se rapproche de celui de la lumière solaire.

La maquette est instrumentée afin de suivre les évolutions de température, flux thermique, humidité et vitesse dans différentes zones du système. Au total, 68 thermocouples, 16 fluxmètres, 9 hygromètres et 2 anémomètres sont implantés sur la maquette et reliés à un système d'acquisition de données.

Les premiers résultats expérimentaux obtenus permettent une description du comportement thermo-aéraulique du système mur Trombe et une analyse de ses performances thermiques à travers plusieurs paramètres décrivant les aspects thermo-aérauliques locaux et l'efficacité thermique du système.

Les données expérimentales recueillies doivent également permettre la validation d'un modèle CFD du système mur Trombe.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-039>

Amélioration du refroidissement des fumées d'un incinérateur industriel

Sihem Bouzid¹, Yamina Harnane¹, Abdelhafid Brima²

* ✉ : sihembouzid69@gmail.com

¹ université Oum El Bouaghi

² université Batna 2

Mots clés : incinérateur, échangeur, méthode ΔT_{lm} , simulation

Résumé :

Actuellement, la protection de l'environnement est l'une des préoccupations du monde entier. Les progrès dans cet axe ne cessent de se multiplier à l'échelle internationale contre toute action individuelle ou industrielle qui peut affecter notre planète. La production des déchets sous toutes leurs formes constitue un élément essentiel contre le bien-être de l'environnement. Maintenir cet environnement sain pour les générations futures nécessite une bonne gestion des déchets produits dans les différents secteurs. Pour diminuer le volume des déchets on a recours à différents types de traitement dont l'incinération qui est un mode thermique consistant à brûler ces déchets tout en assurant la protection de l'environnement. Le secteur de l'incinération a connu un développement technologique rapide les dernières années. Le développement de processus continuel est en cours, avec le secteur développant maintenant des techniques qui limitent les coûts, tout en gardant la performance environnementale. Tout système d'incinération compte parmi ses éléments de base un échangeur de chaleur ayant pour rôle le refroidissement efficace des fumées dégagées de la chambre de combustion.

Le travail ici développé, concerne le calcul de dimensionnement du refroidisseur d'un système d'incinération proposé pour remplacer un refroidisseur type colonne de refroidissement qui a prouvé son insuffisance constatée au niveau des filtres du dispositif de neutralisation qui se brûlaient souvent.

Il s'agit donc de refroidir les fumées sortant de la chambre de combustion avec un débit de 1.1 kg/s à la température de 1000 °C avec une circulation d'eau entrant à 25 °C L'échangeur proposé est de type tubes et calandre, les données géométriques imposées sont : diamètre de la calandre $D = 1.2\text{m}$, tubes : $d_{ext}/d_{int} = 0.06/0.0542\text{ m}$, longueur 3 m La méthode de calcul adoptée est celle de la différence de température moyenne logarithmique pour deux configurations différentes : à savoir fumées interne et eau externe puis fumées externe et eau interne . Un calcul préliminaire a permis le choix de la disposition des tubes en triangles équilatérales avec un pas 0.09 m comptant 143 tubes, la surface d'échange obtenue de 115,35 m² pour la première configuration et 79.5 m² pour la deuxième. Ensuite, une simulation numérique de l'évolution de la température des fumées à l'intérieur de l'échangeur avec ANSYS pour les deux cas de configuration de fonctionnement, a été menée et a abouti à ce que la circulation des fumées à l'extérieur des tubes permet d'atteindre 200 °C à la sortie comme souhaité.

Evaluation des performances d'un système de refroidissement évaporatif indirect dans un bâtiment tertiaire

Alanis Zeoli^{1,*}, Vincent Lemort¹

* ✉ : alanis.zeoli@uliege.be

¹ Université de Liège

Mots clés : refroidissement évaporatif indirect, système de refroidissement, changement climatique

Résumé :

Environ un tiers de l'énergie primaire est consommé par des bâtiments non industriels tels que des bâtiments résidentiels, bureaux, hôpitaux ou encore écoles, dans lesquels l'énergie est principalement utilisée pour des applications de chauffage ou de refroidissement. Le secteur du bâtiment contribue donc fortement aux émissions de CO₂. A cause des incertitudes liées à l'approvisionnement futur en énergie et au réchauffement climatique, certains pays ont introduit des objectifs visant à réduire la consommation énergétique des bâtiments. Afin d'atteindre les objectifs fixés (réduction de 5 à 30% des émissions), la coopération internationale s'avère essentielle. Le programme de l'agence internationale de l'énergie sur l'énergie dans les bâtiments et les communautés (International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Programme, IEA-EBC Programme) mène des activités de recherche et développement dans le but d'arriver à des bâtiments énergétiquement neutres.

L'annexe 85 portant sur le refroidissement adiabatique indirect fait partie des projets de recherche chapeautés par l'IEA-EBC. Le but de ce projet est d'évaluer les performances du refroidissement adiabatique indirect et son impact sur la consommation énergétique des bâtiments. Dans le cadre de ce projet, ce travail se concentre sur un bâtiment de bureaux situé en Belgique (climat tempéré). Contrairement aux bâtiments résidentiels, les bâtiments tertiaires sont souvent équipés d'un système de climatisation dont la consommation énergétique est destinée à augmenter avec le réchauffement climatique. En tirant parti du refroidissement adiabatique indirect, on espère pouvoir limiter cette augmentation. Ce projet quantifie, par la simulation, la performance énergétique d'un système de refroidissement adiabatique indirect et la compare à celles de deux autres variantes : 1) un système de refroidissement classique, composé d'un groupe de production d'eau glacée refroidi par eau, d'une tour de refroidissement et d'unités terminales ; 2) le même système de refroidissement mais avec la possibilité de faire du free chilling avec la tour de refroidissement en contournant le groupe de production d'eau glacée. La performance énergétique des 3 systèmes est comparée en terme de consommation électrique. Il est possible de montrer que le gain énergétique lié à l'utilisation du système de refroidissement adiabatique indirect est directement lié à la différence entre la température sèche et le point de rosée de l'air extérieur. La diminution de consommation en énergie du système de refroidissement peut atteindre 6%.

Caractérisation d'un four de cuisson haute température pour pains libanais

Yves Mansour², Olivier Rouaud^{1,*}, Rayan Slim³, Pierre Rahmé³

* ✉ : olivier.rouaud@oniris-nantes.fr

¹ GEPEA, UMR CNRS 6144 - Oniris

² GEPEA, UMR CNRS 6144 - Farhat Bakery Equipment

³ Université Libanaise

Mots clés : Fours de cuisson, mesures de flux, expérimentation

Résumé :

Le pain libanais, communément appelé pain pita, est un pain rond et plat à deux couches, formé lorsqu'un morceau de pâte aplati se sépare en deux couches distinctes pendant la cuisson. Le procédé de cuisson du pain libanais est caractérisé par des temps très courts, généralement inférieurs à 10 s, et de hautes températures de fours comprises entre 600 et 700 °C. Pour parvenir à des pains pita de qualité, l'expérience a montré que seuls les fours tunnels équipés de brûleurs à flamme directe sont adaptés. Ils sont constitués d'un convoyeur composé de plaques métalliques se déplaçant à l'intérieur d'un tunnel constitué de briques réfractaires.

Une récente campagne de mesure, menée sur les recommandations du ministère libanais de l'économie, a montré que seulement 18% de l'énergie consommée était utilisée pour la cuisson du pain, les 82% restant correspondant donc à des pertes énergétiques. D'autre part, d'un point de vue économique, les coûts énergétiques représentaient environ 45% du coût total de production du pain. Ces constatations rendent prépondérantes les études visant à améliorer l'efficacité énergétique de tels procédés.

L'objectif de ce travail est de caractériser les transferts thermiques au sein du pain libanais au cours d'un procédé de cuisson. Pour cela, dans un premier temps, un four instrumenté a été entièrement développé afin de caractériser les éventuelles hétérogénéités de chauffage et les flux de chaleur caractéristiques de ce procédé. L'étude expérimentale est couplée avec une simulation numérique pour permettre la caractérisation complète du four.

Le four continu développé possède une chambre de cuisson à l'échelle 1, constituée de briques thermiques réfractaires et un chauffage assuré par un brûleur simple à flamme directe alimenté en diesel avec une puissance thermique nominale de 130 kW. Une grille de 9 thermocouples est disposée à l'intérieur de la chambre pour mesurer la température de l'ambiance, suivant le plan central longitudinal (3 x 3). Un dispositif particulier de mesure de flux a également été développé pour mesurer les flux de chaleur suivant différentes positions (3) et différents angles à l'intérieur de la chambre de cuisson. Ce dispositif permet de quantifier les flux de chaleur potentiellement reçus par le pain qui, au cours de la cuisson, passe d'une géométrie plane à une géométrie sphérique. Les résultats montrent une forte hétérogénéité des températures à l'intérieur du four (entre 600 et 900 °C au niveau de la flamme) et des flux de chaleur variables en fonction des positions. Le flux de chaleur par conduction issu du convoyeur varie entre 6,5 et 7,5 kW/m² alors que le flux radiatif et convectif peut varier entre 8 et 30 kW/m² suivant les orientations et la position à l'intérieur de la chambre de cuisson. La simulation numérique de l'ensemble du système, opérée avec la suite de logiciel Ansys et en intégrant la combustion, est confrontée aux résultats expérimentaux. L'écart entre résultats numériques et expérimentaux étant inférieur à 10%, le modèle développé pourra être utilisé comme outil prédictif et d'optimisation.

Description et performances d'une solution photovoltaïque de production d'eau chaude sanitaire en logement collectif en autoconsommation

Jonathan Lange¹, Mathieu David², Ramzi Thome³, Jean Castaing-Lasvignottes²

* ✉ : jonathan.lange@univ-reunion.fr

¹ Laboratoire PIMENT et TOP BIS

² Laboratoire PIMENT

³ TOP BIS

Mots clés : eau chaude sanitaire, logement collectif, photovoltaïque, performances, contrôle/commande

Résumé :

Sur l'île de La Réunion, Zone Insulaire Non Interconnecté (ZNI) où le gisement solaire est important, la réglementation impose depuis 2010, pour les bâtiments neufs, 50 % de l'Eau Chaude Sanitaire produite à partir de l'énergie solaire. Les bailleurs sociaux, pour leurs logements collectifs, ont souvent le choix entre deux solutions d'ECS solaire thermique : le Chauffe-Eau Solaire Collectif (CESC) ou le Chauffe-Eau Solaire Collectif Individualisé (CESCI). Par le retour des locataires de ces bailleurs et de sa propre expériences, l'entreprise TOP BIS a pu constater deux faiblesses dans ces systèmes : la première est due aux bonnes performances de l'ECS solaire thermique en été qui, pour éviter les surchauffes en hiver austral, conduit au sous-dimensionnement du champ solaire, impliquant l'usage d'un appoint électrique durant cette période. Le second est le coût de maintenance important lié au circuit d'eau, aux fuites, à la dégradation des isolants et aux pompes de circulations soumises à des contraintes fortes en termes de température d'utilisation. De plus, lors de réhabilitation d'un bâtiment existant, l'ECS solaire thermique n'a souvent pas à sa disposition les galeries techniques ou les locaux dédiés nécessaires pour faciliter son installation (canalisations, passage en cloison et en toiture). Ces différents éléments rendent contraignants leurs implantations.

Pour remédier aux problèmes liés à la production d'ECS solaire thermique, TOP BIS a mis en place, sur une opération de logement social dans le sud de l'île, une solution tout électrique connectant 35 ballons alimentés exclusivement en courant continu fournie par une centrale photovoltaïque (PV) en autoconsommation totale. Celle-ci est composée de panneaux solaires de la marque LG (LG330S1C-A5) pour une puissance de 42 kWc. Les 35 logements sociaux : 3 T2, 15 T3, 12 T4, 4 T5 et 1 T6 sont équipés de ballons de 150 L/1800 W (T2 à T4) et de 200 litres/2400 W (T5 à T6).

L'originalité du montage mis en œuvre, réside dans le pilotage de l'ensemble (champ de capteurs et ballons) qui a conduit, pour être le plus souvent au rendement maximum des capteurs, à connecter les ballons de telle sorte à se situer au plus près du Maximum Power Point (MPP), quelles que soient les conditions d'ensoleillement. En outre, chaque locataire devant recevoir la quantité d'énergie qui lui est due en fonction de sa surface d'habitation, le pilotage de l'ensemble implique un algorithme spécifique intégrant ces deux contraintes (maximum de rendement et équité de distribution).

Cette première installation pilote a fait l'objet d'un suivi pendant une durée de deux ans et permet aujourd'hui de faire un retour d'expérience et une analyse de son comportement, notamment au cours du temps. Avec le scénario de pilotage actuel, nous avons pu, en particulier, quantifier le rendement de la centrale, le taux de transformation (PR : Performance Ratio) et enfin le taux de couverture solaire. Cette analyse devrait conduire ultérieurement à une amélioration du protocole de contrôle/commande.

Work In Progress

Étude des technologies de l'hydrogène-énergie appliquées aux bâtiments à faible impact carbone

Mathieu Patin^{1,*}, Sylvie Begot¹, Valérie Lepillier¹, Frédéric Gustin¹

* ✉ : mathieu.patin@femto-st.fr

¹ Institut FEMTO-ST, CNRS, Département Énergie

Mots clés : Hydrogène-énergie, résidentiel, énergies renouvelables, modélisation énergétique

Résumé :

Le dérèglement climatique est un phénomène aux enjeux planétaires pour lequel une réaction rapide et internationale devient de plus en plus pressante. Pour y répondre, une réduction importante des émissions des gaz à effet dans l'ensemble des secteurs d'activités est nécessaire. Le secteur du bâtiment représente un des premiers secteurs en termes d'utilisation d'énergie, ce qui en fait une cible de choix pour les politiques de réduction de nos consommations. Atténuer les impacts des bâtiments et entre autres ceux des bâtiments résidentiels est ainsi un enjeu de société majeur et un sujet de recherche actif. Pour répondre à la demande des bâtiments de manière décarbonée, la production locale de sources d'énergie dite renouvelable est une solution couramment utilisée, notamment la production d'électricité par énergie solaire photovoltaïque et la production d'eau chaude par énergie solaire thermique. Cependant ces énergies sont intermittentes et ne permettent donc pas de couvrir la totalité de la charge du bâtiment. Les technologies de stockage permettent de pallier ces problèmes. En effet, elles permettent de stocker l'énergie lors des phases de surproduction, pour les technologies basées sur le soleil en milieu de journée et l'été. Puis, elles permettent de déstocker cette énergie en périodes de sous-production, pour le solaire, la nuit et l'hiver. Les systèmes étudiés ici reposent sur un électrolyseur pour produire de l'hydrogène en période de surproduction, hydrogène ensuite utilisé dans une pile à combustible pour la cogénération d'électricité et de chaleur. Le sujet d'étude est ainsi le potentiel de l'hydrogène-énergie pour réduire les émissions de gaz à effets de serre associés à la consommation électrique et thermique de bâtiments résidentiels. L'objectif est de développer l'optimisation des composants et de l'architecture de ces systèmes. Pour cela il est bien sûr nécessaire de modéliser les systèmes à hydrogène (électrolyseur, pile à combustible, réservoir. . .) mais également la charge thermique et électrique du bâtiment, ainsi que les apports solaires, dont une partie sont convertis en électricité. L'étude portant sur des systèmes encore peu développés, une étude prospective sur les bâtiments résidentiels futurs sera menée. Le premier point est celui du bâtiment avec l'étude de bâtiment à faible impact carbone. Pour cela la norme de construction RE2020 sera utilisée pour définir les propriétés futures des bâtiments. Un modèle à élément réduit paramétré par des simulations dynamiques des bâtiments permettra leurs simulations. Le deuxième point porte sur l'aspect charge électrique avec l'étude des modifications futures du comportement des habitants et l'introduction de nouveaux usages électriques. Parmi les plus communément anticipés, on peut citer l'usage de plus en plus fréquent de climatisation pour des raisons de réchauffement climatique et d'évolution de l'enveloppe du bâtiment. L'incitation à une électrification du secteur de transport par le biais de voitures électriques pourrait être un autre facteur majeur de changement dans la charge électrique des bâtiments résidentiels. Un modèle basé sur des chaînes de Markov paramétrées par des statistiques modélisera cet aspect. La communication porte sur l'avancement temporaire du projet. Les premiers résultats issus de la modélisation ainsi que les perspectives du projet seront présentés.

Aérogels hybrides pour la construction durable : Élaboration, caractérisation et modélisation

Dang-Thi Le¹, Benjamin Carbonnier², Salah Naili³, Daniel Grande², Vu-Hieu Nguyen³, Magali Fois⁴, Samia Mahouche-Chergui²

* ✉ : dang-thi.le@u-pec.fr

¹ Université Paris-Est Créteil

² Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est

³ Laboratoire Modélisation et Simulation Multi Echelle

⁴ Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes

Mots clés : Aérogels hybrides, argile, biopolymères, graphène, matériaux isolants, modélisation multi-échelle

Résumé :

En raison des propriétés physiques uniques telles qu'une structure extrêmement poreuse, une ultra légèreté et une vitesse de propagation de son très faible, les aérogels se révèlent comme une des meilleures solutions pour l'isolation thermique et phonique de l'habitat. En effet, ces matériaux nanostructurés permettent de réduire jusqu'à trois fois l'épaisseur des matériaux isolants tout en conservant la même conductivité thermique, offrant ainsi un gain considérable de la surface habitable. Cependant, les aérogels de silice disponibles sur le marché, en plus de leur coût élevé, souffrent d'une forte fragilité vis-à-vis des contraintes mécaniques et des chocs thermiques ce qui est un obstacle majeur pour l'application de tels matériaux. Pour surmonter ce problème, les aérogels hybrides préparés soit en mélangeant deux aérogels, l'un de silice et l'autre à base de polymères organiques, soit en incorporant des nanoparticules (silice, de graphène, d'argile) dans un polymère sont considérés comme une solution prometteuse du fait notamment de leurs performances mécaniques très intéressantes.

Dans ce contexte, nous avons développé des aérogels hybrides en incorporant des nanoparticules de graphène et d'argile dans une matrice polymère biosourcée (le chitosane) permettant ainsi de valoriser la biomasse. Afin d'optimiser les conditions expérimentales d'élaboration des aérogels, nous avons procédé à une modélisation multi-échelle de la relation structure-propriétés associées de nos aérogels.

Une nouvelle classe d'aérogels a été ainsi obtenue par lyophilisation avec une phase de congélation réalisée à trois températures différentes (-30 °C, -60 °C et -190 °C) et des taux de graphène et d'argiles allant de 2 à 15% en masse. Les aérogels ainsi obtenus ont été ensuite caractérisés afin d'étudier leurs propriétés structurales, texturales, mécaniques et thermiques.

Nous avons ainsi mis en évidence l'influence de la température de congélation, du taux de graphène et de l'ajout de nanoparticules d'argile sur la distribution de taille des pores. En utilisant différents agents de réticulation physiques dans ces aérogels, nous avons pu affiner la taille de leurs pores et ainsi baisser leur conductivité thermique.

Amélioration du confort thermique par utilisation des MCP dans l'enveloppe du bâtiment

Yamina Harnane^{1,*}, Sihem Bouzid¹, Abdelhafid Brima², Sonia Berkane²

* ✉ : harnane_y@yahoo.fr

¹ Université d'Oum El Bouaghi

² Université Batna 2

Mots clés : simulation ; confort thermique ; PCM

Résumé :

L'enveloppe des bâtiments traditionnels est restée pendant très longtemps un moyen passif permettant d'une part de limiter les pertes ou les apports thermiques d'autre part, d'assurer une certaine climatisation de par son inertie thermique. Une des façons de diminuer les besoins énergétiques d'un bâtiment est donc la conception d'une enveloppe économe en énergie, limitant les déperditions et récupérant au maximum les apports passifs. Pour atteindre ces objectifs, il existe un certain nombre de principes de base dont les plus importants sont l'isolation et l'inertie thermique. L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les parois elles-mêmes permet de substituer au stockage par chaleur sensible un stockage par chaleur latente qui nécessite un volume bien moindre pour la même quantité d'énergie thermique. L'objectif de ce travail consiste en une étude numérique de l'amélioration du confort thermique par l'utilisation des matériaux à changement de phase par son intégration comme solution pour les bâtiments. L'utilisation des MCP dont la température de changement de phase est proche de celle conduisant au meilleur confort. Le comportement thermique des différents types de parois (mur référence et mur composé de MCP) est donc étudié par simulation numérique via le logiciel commercial Fluent 14.0. Les deux types de murs sont soumis aux mêmes conditions aux limites et initiales. Les PCM choisis sont : la paraffine RT28, le sel $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et l'acide gras A26. L'équation de l'énergie tenant compte du changement de phase est résolue numériquement en régime instationnaire pour $\Delta t = 1$ s et un temps total égal à 43200 s (une période de 12 heures). Le MCP est disposé dans la partie externe de l'enveloppe. La couche en béton construit le mur interne. Nous avons comparé la densité de flux journalier en kWh/m^2 dégagé par la paroi interne qui est en contact direct avec l'environnement intérieur. En termes de consommation énergétique, l'acide gras A26 réduit d'une façon considérable les apports thermiques vers l'intérieur. Cela est dû principalement à la faible diffusivité thermique du matériau A26. Une étude paramétrique a été menée, pour dégager le MCP, son emplacement et son épaisseur optimaux. Les cas d'études sont traités sous les mêmes conditions avec le même objectif : le calcul du flux de chaleur interne mis en jeu. Cette grandeur est comparée à celle d'un mur de référence, nous a permis de déterminer les paramètres optimaux qui nous donnent une consommation minimale d'énergie.

Earth-Air Heat Exchangers : Impact of Surrounding Conditions on Long-term Performance

Wael Zeitoun¹, Monica Siroux¹, Jian Lin²

* ✉ : monica.siroux@insa-strasbourg.fr

¹ INSA STRASBOURG ICUBE UNIVERSITE DE STRASBOURG

² ICUBE UNIVERSITE DE STRASBOURG

Mots clés : Renewable energy, earth-air heat exchanger, long-term energy performance, condensation, inter-seasonal operation

Résumé :

Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) is a shallow geothermal tube exchanger buried under the ground to exchange heat with the upper soil layers at low temperatures. As an abundant renewable energy source, EAHE can efficiently pre-heat and cool the air supplied to buildings saving and reducing the use of non-renewable energy. The performance of an EAHE is affected by the climatic zone in which it installed as well as many other parameters in its surrounding environment. The work in progress here aims at studying these parameters that affect the energy performance of the buried pipe near the building. The study uses database measurements (temperature, humidity, precipitation, etc.) of flowing air and surrounding soil in a full-scale experimental EAHE site at University of Strasbourg. Previous research work on this site found that there is an effect of the buildings near the EAHE, so a numerical model will be updated to consider the underground heat exchange with these buildings. This model will then be verified using experimental data available. In addition, the convective heat transfer coefficient in the pipe is significantly affected by condensation on the internal pipe wall. This condensation plays an important role in determining heat exchange between the air and the surrounding soil, and as the literature poorly addresses the effect of water condensation in EAHEs, experimental setup allowing the visualization and study of this phenomenon will be built complete the numerical analysis. This will allow the identification of different mechanisms inducing the condensation in a geothermal heat exchanger and the effect of this phenomenon on the energy performance of the EAHE. Also, usually the EAHE extracts heat from the ground during winter, but if there was lack or insufficient heat reinjection in the summer, the performance of the exchanger decreases. Thus, the study aims at finding an optimized inter-seasonal operation mode between heating in winter and cooling in summer. Therefore, this research work is carried out to investigate the impact of several parameters on the long-term performance of the EAHE and it contributes to improve this technology.

Thème 7

Transferts en milieux hétérogènes

Condensation convective à faible vitesse massique : Analyse des phénomènes thermohydrauliques locaux	116
Thermo-hydraulic analysis of the flat plate pulsating heat pipe tested under μ -gravity conditions	117
Ébullition en film sous flux solaire concentré	118
Encapsulation de matériaux à changement de phase dans un emballage alimentaire	119
Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo	120
Étude du comportement de mouillage d'une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe en fonction de la température et de l'humidité	121
Modélisation des performances thermiques d'un évaporateur solaire	122
Influence des propriétés des grains sur la conductivité thermique d'un lit de poudre d'alumine α -Al ₂ O ₃	123
Project of a pressure stabilizing system for fast boiling experiments	124
Caractérisation des performances de poreux céramiques bicouches pour boucles diphasiques à pompage capillaire	125
Analyse des transferts thermiques lors de la convection forcée d'un gaz en milieu micro-poreux	126
Simulation et optimisation des performances d'un compresseur à hydrogène par adsorption-désorption à entraînement thermique	127
Étude expérimentale de la vaporisation sous faible pression d'une goutte d'eau sur une paroi chauffée	128
Etude de la micro-explosion de biocarburants émulsionnés sous différents schémas de chauffage radiatifs	129

Condensation convective à faible vitesse massique : Analyse des phénomènes thermohydrauliques locaux

Marion Beaumale¹, Pascal Lavieille¹, Marc Miscevic¹

* ✉ : marion.beaumale@laplace.univ-tlse.fr

¹ LAPLACE

Mots clés : condensation convective, métrologie optique, coefficient d'échange, expérimental

Résumé :

Le dimensionnement des condenseurs équipant les systèmes de régulation thermique diphasique nécessite une compréhension du couplage entre les transferts de chaleur et la répartition des phases liquide et vapeur au sein des écoulements. Lorsque les vitesses massiques sont faibles, de l'ordre de celles rencontrées dans les systèmes passifs de type CPL ou LHP, les lois disponibles dans la littérature ne sont plus valides. L'objectif de ce travail est donc de contribuer à combler ce manque en développant une approche expérimentale permettant d'étudier les couplages entre transferts de chaleur, de masse et de quantité de mouvement au sein d'écoulement de condensation à faible vitesse massique. L'objectif est notamment de mesurer simultanément et de corrélérer l'évolution du coefficient de transfert de chaleur local avec celle de l'épaisseur de film de liquide afin de proposer des lois de dimensionnement. Pour cela un banc expérimental a été développé permettant d'étudier la condensation du HFE 7000 en écoulement vertical descendant. Afin d'utiliser des techniques de mesures optiques, le condenseur utilisé est en saphir, matériau transparent et conducteur, dont le refroidissement est obtenu grâce à un écoulement d'air conditionné en convection forcée. Les dimensions du condenseur (section circulaire de diamètre interne de 3,4 mm, de diamètre externe de 6 mm et d'une longueur de 1 m) permettent d'étudier la condensation complète (titre massique en vapeur variant de 1 à 0) du fluide pour des vitesses massiques allant de 5 à 30 kg/m²/s. Les mesures sont réalisées en régime permanent grâce à un écoulement stabilisé entre deux réservoirs à pression constante dont le débit est ajusté à l'aide d'une vanne micrométrique. La métrologie mise en œuvre combine deux techniques de mesures de haute précision permettant la mesure locale et simultanée de la température de la paroi du condenseur par méthode infrarouge et de l'épaisseur du film de liquide ruisselant sur la paroi par méthode interférométrique ou confocale. Cette instrumentation permet de développer une analyse à la fois hydraulique et thermique des processus mis en jeu. Le banc d'essais, le protocole spécifique développé et les résultats expérimentaux seront présentés dans cette communication.

Thermo-hydraulic analysis of the flat plate pulsating heat pipe tested under μ -gravity conditions

Maksym Slobodeniuk^{1,*}, Rajalakshmi Ravichandran², Remi Bertossi³, Vincent Ayel², Cyril Romestant², Yves Bertin²

* ✉ : maksym.slobodeniuk@ensma.fr

¹ IPSA ; ISAE-ENSMA

² ISAE-ENSMA

³ IPSA

Mots clés : Pulsating Heat Pipe, Microgravity, Thermal Performance, Flow Transition

Résumé :

The high power and performance electronic devices in modern spacecraft systems with heat generation of hundreds of Watts per square centimeter crucially increases needs in high performance, low weight, energy efficient and reliable thermal management systems. Pulsating Heat Pipe (PHP) as a passive two-phase heat transfer device based on phase change induced motions of working fluid from evaporator to condenser could become a novel thermal management system due to high heat transfer capability, simple structure and ability of operating under different gravity levels and different positions. However, this relatively new technology with very complex thermo-hydrodynamic mechanisms inside is not fully studied and needs further investigations.

This work presents synthesis of the results obtained during 64th and 69th ESA Parabolic Flight Campaigns for the flat plate pulsating heat pipe tested under microgravity conditions in order to thermal performance investigations and liquid-vapor interfaces oscillation influence on the flow pattern inside the device.

Tested flat plate pulsating heat pipes represent a copper (64th PFC) / molybdenum (69th PFC) plate with milled squire shape channels (1.5 and 3 mm²) covered by the sapphire cover plate to allow visual analysis of the flow inside. Ethanol and dielectric fluid FC-72 were chosen as working fluids with volumetric filling ratio of 50 %.

Microgravity periods are mostly characterized by the significant temperature augmentation in the evaporator zone. This temperature rise is a result of fluid accumulation in the condenser and dry-out of evaporator ? heat transfers only by the FPPHP wall conduction.

Sometimes evaporator temperature drops because of flow pattern change from slug-plug to semi-annular and fluid reflows to the evaporator. This phenomenon was called "flow re-activation" and observed only for few cases during microgravity phases. Video post-processing was performed to define flow parameters influencing flow transition for microgravity conditions, as well as to determine liquid plugs velocities and accelerations. Classical criteria (We , Bo , Ga , Fr) used for slug-plug flow pattern definition were validated. Finally, the acting forces during stopover and re-activation were calculated.

Ébullition en film sous flux solaire concentré

Dylan Lorfing², Quentin Falcoz¹, Aras Ahmadi³, Régis Olivès^{1,*}

* ✉ : olives@univ-perp.fr

¹ PROMES-CNRS - UPVD

² TBI -INSA TOulouse

³ TBI-INSA Toulouse

Mots clés : Ebullition, solaire concentré, dessalement

Résumé :

Le dessalement de l'eau de mer pour un approvisionnement en eau potable sécurisé fait partie des enjeux majeurs pour bon nombre de pays. Aussi, l'intégration des énergies bas-carbone dans les procédés de dessalement devient crucial. C'est ainsi que de plus en plus d'études portent sur la conception d'éco-procédé de dessalement de l'eau de mer utilisant, en particulier, l'énergie solaire. Nous avons proposé un système basé sur la génération de vapeur d'eau par ébullition de l'eau saumâtre à partir du rayonnement solaire concentré. Il s'est agi de définir les conditions opératoires et la configuration géométrique adaptées à ce nouveau type de procédé. Dans le cadre de cette étude, un dispositif expérimental original a été mis en œuvre afin d'étudier les régimes d'ébullition sous flux solaire concentré. Il a été montré que le régime d'ébullition en film permettait de maintenir la surface d'évaporation propre, exempte de dépôt. Or le dépôt de sel et de calcaire constitue un verrou technologique majeur dans le développement des procédés de dessalement par voie thermique.

Des expériences sont donc réalisées à l'aide de ce dispositif pour étudier le régime d'ébullition en film et donc de définir les conditions opératoires pour assurer le bon fonctionnement de l'évaporateur. Une étude théorique conduit à identifier, en particulier, le coefficient d'échange thermique en ébullition en film dans une géométrie conique et à déterminer une corrélation semi-empirique comparable à celle de Rohsenow et al.. Les performances thermiques du système récepteur-générateur de vapeur sont alors évaluées en fonction de ses propriétés thermiques et géométriques. L'efficacité thermique obtenue est de 82 %; elle est comparée à celle obtenue en régime nucléée qui est de 89 %. Certes l'ébullition en film a une efficacité plus faible, mais elle comporte l'avantage, par rapport à l'ébullition nucléée, de préserver la surface d'évaporation du dépôt de calcaire et de sel et ainsi réduire les coûts d'entretien.

Encapsulation de matériaux à changement de phase dans un emballage alimentaire

Hong-Minh Hoang^{1,*}, Anthony Delahaye¹, Stephanie Lacour¹, Isabelle Capron¹, Jean-Eudes Maigret¹, Denis Lourdin¹, Sebastien Saavedra¹, Alain Denis¹, Daniel Bagheri¹, Laurence Fournaison¹

* ✉ : hong-minh.hoang@inrae.fr

¹ Inrae

Mots clés : matériaux à changement de phase (MCP), emballage alimentaire, encapsulation

Résumé :

La rupture de la chaîne du froid est responsable de pertes alimentaires qui génèrent un coût économique et environnemental non négligeable. Cette rupture provoque une remontée en température des produits alimentaires et peut entraîner un risque sanitaire élevé pour le consommateur en particulier pour certains produits fragiles (viande hachée, poisson par exemple). Une solution pour ralentir le réchauffement consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP) dans des emballages ; ces matériaux lors de leur fusion deviennent une source de production de froid (de par sa chaleur latente de fusion) et permettent de maintenir pendant un certain temps le produit dans les bonnes conditions de conservation (température réglementaire). Toutefois, cette solution nécessite d'une part de trouver le(s) « bons » MCP avec les propriétés convenables à l'application « emballage » et d'autre part une mise en forme adéquate de ces matériaux permettant de supporter le changement de phase solide/liquide. En effet, le MCP doit à la fois apporter une inertie thermique dans la gamme de température de conservation (0-8 °C, au voisinage du produit) et limiter le flux de chaleur entrant dans l'emballage (résistance thermique à la température ambiante). Si un seul MCP est utilisé, se pose alors la question du choix de sa température de fusion : doit-elle être inférieure à la température de conservation (au risque de congeler le produit), ou un peu plus élevée pour mieux résister aux apports thermiques extérieurs. Concernant la mise en forme, certaines études récentes ont exploré la possibilité d'incorporer sous forme de microgouttes dans un film une fraction volumique importante de MCP. Cependant, une autre question se pose sur la quantité « optimale » du MCP à incorporer. Dans ce travail, un dispositif expérimental a été développé afin de tester 2 configurations d'emballages contenant des MCP : les films biosourcés (amidon) intégrant des MCP et un système dans lequel les MCP ont été déposés en son état naturel (bulk). Pour chaque configuration, plusieurs quantités de MCP et 2 MCPs (température de fusion à 5 °C et à 18 °C) ont été testés. En parallèle de ce travail expérimental, un modèle dynamique a été développé pour prédire l'évolution du même système étudié expérimentalement pendant un réchauffement (de 0 °C à 30 °C). Ce modèle a pris en compte plusieurs éléments du système (parois, MCP et produit test), différents modes de transfert thermique (conduction dans les parois, convection entre l'air et produit et entre l'air et les parois. . .) et le changement de phase du MCP. Il a été validé par des résultats expérimentaux de plusieurs configurations (films d'amidon avec/sans MCP, MCP en bulk. . .). Ce modèle a été également utilisé afin de prédire les caractéristiques optimales de la protection thermique pour des configurations différentes de celles testées expérimentalement, selon les critères thermiques attendus.

Une estimation exacte du forçage radiatif par la méthode de Monte-Carlo

Yaniss Nyffenegger-Péré^{1,*}, Stéphane Blanco¹, Jean-Louis Dufresne², Mouna El Hafi³, Vincent Eymet⁴, Vincent Forest⁴, Richard Fournier¹, Nicolas Mellado⁵, Nada Chems Mourtaday¹, Mathias Paulin⁵

* ✉ : yaniss.nyffenegger-pere@laplace.univ-tlse.fr

¹ Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE)

² Laboratoire de Météorologie Dynamique and Institut Pierre Simon Laplace (LMD/IPSL)

³ Laboratoire RAPSODEE

⁴ MesoStar

⁵ Institut de Recherche en Informatique de Toulouse (IRIT)

Mots clés : Forçage des gaz à effet de serre, Transfert radiatif, Monte-Carlo, Raie-par-raie

Résumé :

Un des défis majeurs de cette dernière décennie concerne l'action des nations sur le climat terrestre en vue de contrer le réchauffement climatique. Celui-ci est causé par l'activité humaine et notamment par l'émission en grande quantité de gaz à effet de serre. La compréhension de ce réchauffement au vu du comportement des différentes sociétés est donc nécessaire pour engager des réponses appropriées. Pour mesurer l'évolution du réchauffement climatique, la grandeur de référence à calculer s'appelle le forçage radiatif. Ce forçage est estimé par une différence de deux flux radiatifs au sommet de l'atmosphère intégrés sur toute la Terre et durant une période climatique lorsqu'un seul paramètre de la configuration est changé. Ici c'est le forçage aux gaz à effet de serre et plus particulièrement au dioxyde de carbone qui nous intéresse. Il nous faut donc estimer la différence de deux flux intégrés sur tout le globe et sur toute la durée temporelle d'intérêt pour un changement du champ de concentration de CO₂ donné. Ainsi l'objectif de ce travail est de modéliser des flux radiatifs intégrés sur toutes les positions au sommet de l'atmosphère terrestre, pendant une période temporelle fixée. Ces flux résultent, entre autres, de processus de multidiffusion dans cette atmosphère. La difficulté majeure est la prise en compte de l'atténuation du rayonnement le long de ces chemins multidiffusifs. En effet, l'absorption est traitée comme une somme de contribution de millions de raies spectrales fortement dépendantes aux propriétés thermodynamiques locales et au domaine fréquentiel. Les modèles spectraux usuels, comme les k-distributions notamment, ne permettent pas d'obtenir une précision nécessaire pour estimer le forçage radiatif qui demande une précision de plus de 1 % sur nos flux. Nous proposons de repenser cette approche par la méthode de Monte-Carlo, méthode de référence en transfert radiatif, qui traite sans difficulté des intégrales multidimensionnelles tout en restant exacte et en fournissant un intervalle de confiance sur notre résultat. Nous introduisons trois techniques qui permettent de lever des verrous pour faire une telle estimation : 1) L'utilisation des collisions nulles pour contourner l'atténuation non linéaire qui apparaît en milieu hétérogène ; 2) L'échantillonnage d'une transition moléculaire statistiquement au lieu de recalculer localement le coefficient d'absorption. Il s'agit de coupler le modèle de transfert radiatif et le modèle de description des raies de transition ; 3) L'estimation d'un jeu de probabilités pour l'échantillonnage des transitions. Nous avons développé une méthode basée sur des techniques de machine learning en construisant une représentation hiérarchique et multi-résolution des probabilités dans le domaine fréquentiel. Les résultats montrent qu'il est possible d'estimer le forçage radiatif sur toute la Terre pendant une période d'un mois et sur tout le spectre infrarouge. Nous obtenons une insensibilité du temps de calcul aux domaines temporel, spatial et fréquentiel : il n'est pas plus coûteux de faire notre estimation pour un jour ou un mois, pour une latitude/longitude ou sur toute la Terre, sur une bande étroite fréquentielle ou sur tout le spectre infrarouge.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-042>

Étude du comportement de mouillage d'une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe en fonction de la température et de l'humidité

Walid Samah^{1,*}, Pascal Clain¹, Laurence Fournaison², François Rioual², Anthony Delahaye²

* ✉ : walid.samah@inrae.fr

¹ Léonard de Vinci Pôle Universitaire, Research Center, 92916 Paris la Défense, France - Université Paris-Saclay, INRAE, FRISE, 92761 Antony

² Université Paris-Saclay, INRAE, FRISE, 92761 Antony, France

Mots clés : Transfert thermique ; congélation ; échangeurs ; surface superhydrophobe ; angle de contact ; transition de mouillage ; glace ; adhérence.

Résumé :

Dans le contexte de la réfrigération secondaire, les coulis de glace offrent des avantages énergétiques et environnementaux par rapport aux fluides monophasés (généralement l'eau) en raison de la présence de particules de glace dans le liquide porteur. Ces coulis sont souvent obtenus par des générateurs à surface raclée. Cependant, ces dispositifs présentent certains inconvénients, notamment une surconsommation d'énergie liée au raclage, qui dégrade le rendement énergétique de l'installation, ainsi que des coûts de maintenance liés à l'usure des lames de raclage. Ainsi, le développement de générateurs sans raclage fait l'objet de nombreuses recherches. Ici, on s'intéresse à l'utilisation d'un revêtement superhydrophobe (SH) pour la production de coulis de glace. En effet, les surfaces superhydrophobes (SH) sont connues pour leur capacité à augmenter le degré de surfusion et à retarder la congélation, ce qui présente un grand intérêt dans le domaine de la production de froid, soit pour réduire la formation de glace sur les évaporateurs des machines frigorifiques afin d'améliorer les transferts thermiques, soit pour produire de l'eau surfondu pour des applications de réfrigération secondaire. L'objectif de ce travail est de caractériser la congélation d'une goutte d'eau sur des plaques en aluminium avec revêtement superhydrophobe (SH). Un intérêt particulier est porté aux changements des propriétés superhydrophobes (SH) de ces surfaces pendant le refroidissement. Des mesures de l'évolution de l'angle de contact ont été utilisées pour caractériser l'état de mouillage des plaques revêtues et non revêtues à différentes températures et niveaux d'humidité. Les résultats montrent que le revêtement maintient la superhydrophobie des plaques à des températures supérieures à 10 °C pour différents niveaux d'humidité. À basse température, le revêtement superhydrophobe (SH) entraîne un sous-refroidissement de la goutte avec un degré de surfusion d'environ 8 °C. Les angles de contact diminuent significativement avec la baisse de la température et l'augmentation de l'humidité. Un modèle semi-empirique de l'évaporation d'une goutte sur une surface superhydrophobe est présenté et comparé aux résultats expérimentaux.

Modélisation des performances thermiques d'un évaporateur solaire

Romain Fillet^{1,*}, Vincent Nicolas¹, Alain Celzard¹, Vanessa Fierro¹

* ✉ : romain.fillet@univ-lorraine.fr

¹ Université de Lorraine, CNRS, IJL

Mots clés : Simulation, Biomatériaux, Energie solaire, Evaporation, Milieu poreux, Transferts de masse et de chaleur

Résumé :

En France comme dans le reste du monde, en raison du réchauffement climatique, de la croissance démographique et de la pollution, l'approvisionnement en eau devient un enjeu important. Pour résoudre ce problème, le stockage et/ou la récupération et purification de l'eau impropre à la consommation sont envisagées. L'évaporation solaire, qui fait l'objet de recherches depuis plusieurs années, est une méthode de purification qui utilise l'énergie du rayonnement solaire pour vaporiser l'eau puis la condenser et la récupérer pour la consommation humaine. Le système consiste à placer un matériau à la surface de l'eau pour accélérer son évaporation. Ce matériau doit capter suffisamment bien le rayonnement solaire, tout en permettant à l'eau de diffuser vers la surface d'évaporation. De plus, le matériau doit limiter les transferts thermiques vers l'eau liquide, afin de conserver l'énergie en surface. Jusqu'à présent, les études sur le sujet ont été principalement expérimentales, utilisant différents types de matériaux et de méthodes sans validation numérique des hypothèses émises.

L'objectif du travail présenté est de proposer un modèle numérique permettant de simuler les performances d'évaporation du système, de confirmer les hypothèses avancées dans la bibliographie, et d'étudier l'impact des conditions aux limites hygrothermiques. Un modèle axisymétrique 2D, qui inclut la modélisation des transferts thermiques ainsi que du transfert d'eau vers la surface, a été choisi. Ainsi, deux équations couplées comprenant la conservation de la masse d'eau liquide et l'équation de la chaleur ont été utilisées et implémentées dans un logiciel de modélisation par éléments finis (COMSOL 5.6).

Pour valider ce modèle, plusieurs expériences ont été réalisées en utilisant une mousse poreuse biosourcée à base de tanin de mimosa. Le tanin est un composant extrait du bois, qui, dans le cas du mimosa, est présent dans les écorces. Les mousses de tannin sont donc faciles à produire et ont un faible impact environnemental. En outre, elles sont poreuses à 95 % et permettent le transport de l'eau jusqu'à la surface d'évaporation. En ajoutant une couche de peinture à base de graphite pour améliorer l'absorption du rayonnement solaire, elles font un matériau intéressant pour l'évaporation solaire.

Les expériences pour valider le modèle ont consisté à mesurer au cours du temps les évolutions de masse et de température en plusieurs points du matériau positionné à la surface de l'eau, dans un bécher éclairé par un simulateur solaire. Le modèle a été validé pour les évolutions de masse et de température en fonction du temps pour trois irradiations solaires différentes (0.7, 1 et 1.3 sun – avec 1 sun = 1kW/m²). Ensuite, ce travail a permis d'explorer les phénomènes qui régissent les performances d'un système d'évaporation à travers l'étude des conditions aux limites et de la géométrie. L'objectif à terme est d'optimiser le système par une approche numérique.

doi : <https://doi.org/10.25855/SFT2022-063>

Influence des propriétés des grains sur la conductivité thermique d'un lit de poudre d'alumine α -Al₂O₃

Jordan Letessier^{1,*}, Jean-Laurent Gardarein², Jean-Mathieu Vanson³, Christelle Duguay³, Fabrice Rigollet², Aimen E. Gheribi⁴, Jérôme Vicente²

* ✉ : jordan.letessier@univ-amu.fr

¹ CEA,DES,IRESNE,DEC,Cadarache et laboratoire IUSTI Technopôle Château-Gombert

² Laboratoire IUSTI Technopôle Château-Gombert

³ CEA,DES,IRESNE,DEC,Cadarache

⁴ Polytechnique Montréal, Montréal, QC, H3C 3A7, Canada

Mots clés : caractérisation de propriétés thermiques, diffusivité, conductivité thermique, méthode inverse, tomographie à rayon X, alumine, simulation FFT

Résumé :

Les céramiques sont des matériaux qui possèdent des propriétés thermiques et mécaniques intéressantes pour différentes applications industrielles. Notamment, dans le domaine du nucléaire, le dioxyde d'uranium est utilisé comme combustible nucléaire car il est très résistant à la chaleur et au gradient de température. Les céramiques ont aussi, pour la plupart, une faible conductivité thermique et une forte résistance mécanique à la chaleur, ce qui font d'elles un matériau idéal pour la conception de four ou d'isolant. Elles peuvent aussi, selon le procédé utilisé pour leur fabrication, être très poreuses et avoir de hautes surfaces spécifiques. Elles sont ainsi utilisées pour des applications liées au filtrage ou comme support de catalyseurs. C'est pourquoi ce genre de matériaux s'inscrit très bien dans le contexte de réduction d'énergie, en rendant les systèmes plus performants.

On s'intéresse dans ce travail au comportement thermique de poudres d'alumine α -Al₂O₃, qui peut être influencé par la porosité, la taille des grains, la forme des grains, la forme et l'échelle des pores, l'arrangement des grains, etc. Ce travail traite en particulier, d'une part, de l'influence de la taille des grains sur la conductivité apparente du lit de poudre et, d'autre part, de l'influence de la géométrie des grains et de l'arrangement du milieu. La mesure de conductivité passe par l'estimation de la diffusivité et de l'effusivité thermique. Ce sont des propriétés thermiques effectives du milieu que nous mesurons à l'aide d'un plan chaud, la méthode de mesure est transitoire. Un des premiers résultats observés est, qu'à porosité égale, la conductivité augmente avec la taille des grains jusqu'à un palier.

Par ailleurs, nous savons que la géométrie des grains et leur arrangement sont des paramètres importants qui influent sur le comportement thermique global. Pour cela, une autre expérience vise à comparer deux poudres ayant une taille de grains moyenne et une porosité quasiment identiques. L'une est composée de grains pleins ayant une porosité interne répartie de manière homogène et isotrope et l'autre de grains creux possédant une grosse porosité en son centre. Une caractérisation fine des deux poudres, avec une résolution proche du micromètre, est obtenue par des mesures au tomographe à rayon X. Ceci permet de quantifier avec des paramètres géométriques les différences entre les grains, mais aussi l'arrangement des grains entre eux. L'élaboration d'un modèle basé sur la théorie de la percolation prenant en compte des paramètres microstructuraux des poudres, nous permet d'avoir une bonne prédiction de la conductivité thermique effective des lits de poudres.

Project of a pressure stabilizing system for fast boiling experiments

Arlindo Theodoro De Souza Netto¹, Arthur Vieira Da Silva Oliveira², Michel Gradeck², Rogério Gonçalves Dos Santos¹

* ✉ : arlindoths@gmail.com

¹ Universidade Estadual de Campinas

² Université de Lorraine

Mots clés : boiling, test bench, pressure stabilization, condenser, spring-piston, fuel heating

Résumé :

The reduction of pollutant emissions and the improvement of cold-phase performance of internal combustion engines can be achieved by heating the liquid fuel prior to its injection into the cylinders. Given the short heating time required as well as the power input, this technique results in the occurrence of boiling on the surface of the heater. With neither the use of pumps (for excessive cost reasons) nor the use of compressed gas (for safety reasons), designing a test bench capable of operating at constant pressure during vaporization of liquids in a closed system is challenging. We present in this paper the step-by-step project of an original pressurization solution for closed systems that has the final purpose of performing pool boiling experiments with water, gasoline, and ethanol at pressures up to 80 bar. The project features a hand-operated pump for initial pressurization and a test section comprised of a representative vehicle fuel gallery operating with a commercial fuel heater. The use of borosilicate glass in the test section, cameras, and adequate lighting make it possible to visualize and film the experiments. A condenser and a spring-piston system were designed externally to the test section as means to decrease the pressure variations during the tests caused by the vaporization of the liquid fuel. One of the major challenges in the modeling is dealing simultaneously with transient boiling and condensation, two phenomena with very different characteristic times (10 ms and 1 s, respectively). The simulations performed indicate that the closed system pressure control using these concepts is possible within the required operating ranges. The analysis of the behavior of variables such as the condensation length, spring displacement, and pressure throughout the experiments were used as the basis for dimensioning the piston diameter employed, the spring coefficient of elasticity, and the condenser tube length.

Caractérisation des performances de poreux céramiques bicouches pour boucles diphasiques à pompage capillaire

Riadh Boubaker^{1,*}, Yannick Lorgouilloux², Safouene Ouenzerfi¹, Souad Harmand¹

* ✉ : boubaker.riadh@gmail.com

¹ Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines, Université Polytechnique Hauts-de-France

² Laboratoire des Matériaux Céramiques et Procédés Associés, Université Polytechnique Hauts-de-France

Mots clés : Boucle diphasique à pompage capillaire, Transfert de chaleur, Céramique bicouche, Changement de phase.

Résumé :

Cet article présente une étude expérimentale comparative entre les performances des poreux céramique uniforme et bicouche utilisées dans l'évaporateur des boucles diphasiques à pompage capillaire.

Les boucles fluides diphasiques à pompage capillaire sont des dispositifs qui utilisent la circulation d'un fluide et les propriétés du changement de phase liquide-vapeur dans un corps poreux pour transférer d'importantes quantités de chaleur sur des distances qui peuvent atteindre quelques mètres.

Les performances thermiques de ces boucles diphasiques à pompage capillaire dépendent essentiellement de la performance de l'évaporateur. En effet, l'évaporateur est le composant clé de ces systèmes de refroidissement grâce à la pression capillaire générée dans la structure poreuse qui assure la circulation du fluide dans tout le système sans aucun besoin d'un organe mécanique.

L'objectif de cet article est d'étudier le transfert de masse et de chaleur dans des mèches uniformes et bicouches en céramique.

Le dispositif expérimental que nous avons mis en place vise à représenter une section d'évaporateur d'une boucle diphasique à pompage capillaire. C'est un système ouvert contenant une mèche poreuse en céramique. Cet « évaporateur » est relié à un réservoir à niveau constant qui permet d'alimenter la mèche en fluide sous-refroidi. Le schéma de ce banc d'essai est présenté dans la figure ci-dessous. Les pertes de charges gravitaires sont contrôlées par l'élévation Δh (la distance entre la partie supérieure de la structure poreuse et le niveau d'eau). Une résistance chauffante est installée pour réchauffer le fluide avant d'entrer dans la mèche poreuse. La surface supérieure de la structure poreuse est chauffée par le biais d'un bloc de laiton rainuré dans lequel est positionnée une cartouche chauffante. Afin de minimiser les pertes de chaleur avec le milieu environnant, le bloc de chauffe est isolé thermiquement à l'aide d'isolant en bakélite.

Deux échantillons sont testés : une première mèche poreuse uniforme (diamètre de pores de 700-800 μm) et une mèche poreuse bicouche. La mèche poreuse bicouche possède deux couches ayant la même porosité mais de taille de pores différentes (diamètre de pores de 700-800 et 400-500 μm).

Les résultats expérimentaux montrent que les propriétés capillaro-hydrauliques du poreux ont un grand impact sur la performance thermique de l'évaporateur. Les mèches bicouches en céramique permettent de réduire la température de la source chaude de 30 °C. Les résultats obtenus de cette étude peuvent être de grande importance pour les concepteurs des boucles diphasiques thermo-capillaires.

Analyse des transferts thermiques lors de la convection forcée d'un gaz en milieu micro-poreux

Eric Chénier¹, Xavier Nicolas^{1,*}, Samy Ramdane¹, Ghiles Demri¹

* ✉ : xavier.nicolas@univ-eiffel.fr

¹ Université Gustave Eiffel, Laboratoire MSME UMR 8208 CNRS

Mots clés : convection forcée, milieu micro-poreux, écoulement compressible raréfié, glissements dynamique et thermique, puissance des contraintes visqueuses

Résumé :

Une étude paramétrique est menée à partir de simulations numériques 2D, à l'échelle locale, des écoulements de gaz compressibles et faiblement raréfiés dans un milieu micro-poreux modèle constitué d'obstacles solides rectangulaires. Un modèle continu (équations de Navier-Stokes et de l'énergie) avec des conditions d'interface fluide/solide qui tiennent compte des sauts de vitesse, de température et de flux diffusif est adopté. Une large gamme de pressions d'entrée et de sortie est imposée permettant de couvrir les régimes inertiels et non inertiels ($Re < 100$), incompressibles et compressibles ($Ma < 1$) et raréfiés ou non ($Kn < 0,1$). Plus de 200 simulations sont effectuées dans cette gamme de paramètres. Le milieu micro-poreux n'est pas chauffé extérieurement. Le gaz subit uniquement des variations de température liées au travail des forces de pression (TP), à la dissipation visqueuse (DV) et aux effets de raréfaction.

Par ailleurs, une analyse théorique permet d'établir la moyenne intrinsèque de l'équation de l'énergie sur un V.E.R. du milieu poreux modèle, dans le cas d'écoulements compressibles et raréfiés. Les simulations sont alors utilisées pour calculer les différents termes de cette équation de l'énergie moyennée et tracer leur évolution en fonction des paramètres de l'écoulement. On montre que, pour un canal micro-poreux soumis à une différence de pression entre l'entrée et la sortie, le travail des forces de pression (TP) peut se comporter localement comme une source ou un puits de chaleur. En revanche, la moyenne intrinsèque de TP sur un VER est en général le terme dominant et il agit comme un puits de chaleur, c'est-à-dire que globalement l'écoulement se refroidit en sortie sous l'effet de la détente du gaz. Par contre, pour des écoulements faiblement compressibles à basse pression, on montre que le gaz peut chauffer en sortie et qu'il y a trois sources de chaleur possibles : la dissipation visqueuse (DV), la puissance des contraintes visqueuses à l'interface gaz/solide, qui est non nulle en cas de glissement du gaz à la paroi, et la moyenne intrinsèque des fluctuations du terme de convection. L'étude paramétrique permet d'identifier l'importance relative de chaque terme. On montre qu'à faible pression moyenne et, donc, à grand nombre de Knudsen, la puissance des contraintes visqueuses (qui est un terme souvent négligé dans la littérature) est de l'ordre de grandeur de la somme des deux termes TP+DV et donc qu'elle ne doit pas être négligée.

Simulation et optimisation des performances d'un compresseur à hydrogène par adsorption-désorption à entraînement thermique

Vincent Nicolas^{1,*}, Giuseppe Sdanghi², Kevin Mozet³, Sébastien Schaefer¹, Gaël Maranzana³, Alain Celzard¹, Vanessa Fierro⁴

* ✉ : vincent.nicolas@univ-lorraine.fr

¹ Institut Jean Lamour - Université de Lorraine

² Institut Jean Lamour / LEMTA - Université de Lorraine

³ LEMTA - Université de Lorraine

⁴ Institut Jean Lamour - CNRS

Mots clés : Simulation numérique ; hydrogène ; charbon actif ; compresseur thermique

Résumé :

Bien que l'hydrogène soit considéré comme un candidat prometteur pour remplacer les combustibles fossiles, notamment dans le secteur des transports, sa faible densité énergétique volumétrique reste un inconvénient majeur (0,01079 MJ L⁻¹ à température et pression standard). Plusieurs méthodes sont utilisées pour augmenter cette dernière valeur, et la plus utilisée est la compression.

À ce jour, il existe plusieurs technologies de compresseurs d'hydrogène, qui peuvent être regroupées en deux catégories : (i) les compresseurs mécaniques, qui peuvent être actionnés par un piston ou un diaphragme ; (ii) les compresseurs non mécaniques, c'est-à-dire les compresseurs électrochimiques et thermiques. Dans une étude précédente, nous avons prouvé qu'il était possible de comprimer l'hydrogène jusqu'à 70 MPa en une seule étape en contrôlant l'adsorption/désorption cyclique de l'hydrogène sur des charbons actifs (CA).

Les expériences sur ce compresseur, qui est une preuve de concept que nous avons développée, prennent beaucoup de temps, ce qui rend difficile de savoir comment le compresseur se comporte dans une variété de conditions thermiques possibles. Dans ce travail, une étude thermique et une optimisation d'un compresseur d'hydrogène à entraînement thermique ont été réalisées. Afin de comprendre son comportement, un modèle numérique a été développé pour étudier l'évolution de la pression, du débit et de la température de l'hydrogène lorsque les transferts thermiques sont intensifiés en modifiant la puissance de chauffe, la température de consigne ou le régime convectif. La compression et la décharge de l'hydrogène ont été simulées par des éléments finis et le réservoir a été modélisé avec une géométrie 2D axisymétrique. À partir de ce modèle, les équations de conservation de masse et de chaleur ont été résolues pour l'hydrogène et les prédictions ont été validées en comparant les évolutions simulées à celles mesurées expérimentalement pour trois puissances de chauffage pendant la désorption : 100W, 200W et 300W. Une étude numérique paramétrique sur l'effet de la puissance de chauffe et de la température finale de consigne a montré que plus la puissance est élevée, plus la quantité d'hydrogène déchargé augmente et varie linéairement avec la température finale de consigne. Enfin, nous avons montré que l'augmentation du transfert de chaleur par convection avec l'air extérieur réduit le temps pour atteindre la température de décharge d'environ 75 %.

Pour la suite de ce travail, et après avoir étudié le transfert de chaleur à l'extérieur du compresseur, d'autres études seront nécessaires pour optimiser le transfert de chaleur à l'intérieur du lit de charbon actif. Les stratégies possibles pour y parvenir seront l'ajout de matériaux conducteurs ou l'utilisation d'échangeurs de chaleur internes.

Étude expérimentale de la vaporisation sous faible pression d'une goutte d'eau sur une paroi chauffée

Antoine Courouble^{1,*}, Romuald Rullière¹, Jocelyn Bonjour¹

* ✉ : Antoine.Courouble@insa-lyon.fr

¹ CETHIL

Mots clés : Vaporisation - Basse Pression - Eau

Résumé :

Le marché du rafraîchissement d'air est en constante progression mais il continue à offrir des machines qui contribuent au réchauffement planétaire. Si leur effet indirect (émission de CO₂ liée à leur consommation d'énergie en fonctionnement) peut être réduit en améliorant leur efficacité, leur effet direct (échappement de frigorigène dans l'atmosphère) peut être éliminé en utilisant des fluides frigorigènes à GWP (Global Warming Potential) nul, au premier rang desquels l'eau. Dans les systèmes frigorifiques utilisant l'eau comme frigorigène, la pression d'évaporation est très faible et les évaporateurs sont généralement peu efficaces et peu compacts. Il est donc essentiel de conduire des travaux de recherche sur les phénomènes de vaporisation de l'eau sous faible pression pour contribuer au développement de systèmes de climatisation à faible empreinte environnementale.

Une étude expérimentale de la vaporisation de gouttes d'eau sur une paroi chauffée a été menée. Un dispositif d'injection permet de déposer une goutte au centre d'une paroi circulaire et horizontale. Elle est située dans une enceinte étanche dans laquelle il est possible de contrôler et mesurer la pression (10 mbar -1 bar). La paroi est équipée d'un fluxmètre permettant une mesure instantanée (sur sept zones concentriques distinctes) de la densité de flux la traversant. Les deux paramètres opératoires sont la pression dans l'enceinte et la température de la paroi chauffée. La pression de vapeur saturante est fixée en laissant une couche d'eau liquide dans le fond de l'enceinte tout en imposant sa température (bain thermostaté). La température de paroi est mesurée à l'aide de thermocouples. Une caméra rapide permet de visualiser le comportement de la goutte lors de sa vaporisation. Les acquisitions des séquences vidéo et des différents capteurs (températures, flux, pressions) sont synchronisées et la période d'acquisition est de 4 ms. Le volume de chaque goutte est estimé à partir des images enregistrées avant son contact avec la paroi. La signature thermique associée à la vaporisation de chaque goutte (enregistrée par le fluxmètre) permet d'identifier la contribution relative des différentes zones de la paroi au transfert de chaleur, la cinétique de changement de phase, l'énergie thermique mise en jeu pendant la vaporisation, ou encore le coefficient d'échange thermique global.

Deux régimes de vaporisation ont été identifiés : un régime d'évaporation et un régime d'ébullition explosive. Pour le régime d'évaporation, la chaleur est majoritairement dissipée au centre de la paroi, là où la goutte est initialement déposée. En régime d'ébullition explosive, une bulle de vapeur se forme au sein de la goutte. Une fois sa taille maximale atteinte, la bulle éclate, ce qui conduit à la dispersion de gouttelettes réparties sur toute la surface. La chaleur extraite au niveau des zones périphériques de la paroi est alors conséquente. Le régime d'ébullition explosive se produit lorsque la surchauffe de la paroi (écart entre la température de paroi et la température de saturation correspondant à la pression) est suffisamment élevée. La complémentarité des observations et des grandeurs mesurées ou déduites lors des essais a permis l'identification des conditions d'apparition de ces régimes de vaporisation (représentation graphique).

Etude de la micro-explosion de biocarburants émulsionnés sous différents schémas de chauffage radiatifs

Thomas Naudin¹, Dominique Tarlet¹, Jérôme Bellettre^{1,*}, Patrizio Massoli²

* ✉ : jerome.bellettre@univ-nantes.fr

¹ Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes (LTEN)

² STEMS CNR

Mots clés : Emulsion, goutte, atomisation, micro-explosion

Résumé :

La micro-explosion, où seconde atomisation, se produit au sein d'une goutte d'émulsion d'eau dans l'huile, lorsque la phase dispersée atteint la température de saturation. S'en suit alors un changement d'état soudain de la phase aqueuse au sein de la couche huileuse environnante, toujours à l'état liquide, résultant en une fragmentation de cette dernière en un nuage de fines gouttes appelées « gouttes filles ». Ce phénomène, appelé micro-explosion, permet d'obtenir une combustion de meilleure qualité de part une surface totale de combustible en contact avec l'air plus grande dans le cas d'un nuage de fines gouttes par rapport à celui d'une goutte simple.

Il a été observé expérimentalement, que le comportement des gouttes d'eau dispersées durant le chauffage précédent la micro-explosion avait un impact significatif sur la qualité de celle-ci. En effet, lorsque sujettes à des mouvements de convection interne (de par l'hétérogénéité du champ de température au sein de l'émulsion), les gouttes d'eau ont tendance à se regrouper en partie basse de la goutte d'émulsion, puis à fusionner (phénomène de coalescence), en des gouttes de taille plus grande. Ce phénomène est accentué par la perte du pouvoir stabilisant du surfactant avec la température. Cette coalescence de petites gouttes en des gouttes de tailles plus grandes semble permettre d'obtenir une micro-explosion plus forte, de par l'énergie plus grande libérée lors du changement de phase.

L'étude présentée se propose de mesurer l'influence du chauffage radiatif sur le phénomène de micro-explosion, ainsi que l'importance de la convection interne au sein de la goutte d'émulsion pouvant résulter en la coalescence de la phase dispersée. Pour se faire, la goutte d'émulsion est chauffée à l'aide de deux panneaux radiatifs dont la température de surface est contrôlée et peut-être variée entre 300 et 700°C. L'expérience est filmée à l'aide d'une caméra rapide permettant d'étudier le comportement de l'émulsion durant sa phase de montée en température ainsi que les mouvements des gouttelettes d'eau. L'influence de la distance des panneaux à la goutte ainsi que de la puissance de chauffe est étudiée (délai avant la micro-explosion, puissance radiative reçue...). Différents positionnements des panneaux sont utilisés, afin d'accentuer ou de bloquer les mouvements de convection naturelle, et ainsi de mesurer la prépondérance (ou non) de la coalescence de la phase dispersée sur la micro-explosion. Cette étude a pour but de mieux comprendre le comportement des systèmes diphasiques que représentent les émulsions afin d'optimiser les différents paramètres permettant de maximiser la probabilité d'occurrence de la micro-explosion et sa qualité.

Troisième partie

Annexes

Liste des auteurs

A

Adenot, Frédéric	44
Ahmadi, Aras	118
Ait Ouméziane, Yacine	106
Alaeian, Mohsen	57
Allheily, Vadim	46
Altamirano, Amín	58
Amiot, Baptiste	30
Aouali, Abderezak	81
Aroubi, Oumaima	97
Atsaid, Kousseila	52
Ayel, Vincent	5, 117

B

Badinier, Thibault	93
Badosa, Jordi	37
Bagheri, Daniel	119
Bailleul, Jean-Luc	33, 99
Barlet, Aline	100
Baroux, Jean-Paul	95
Barthélémy, Adrien	48
Barthes, Magali	4
Bataille, Françoise	55
Batsale, Jean-Christophe	81
Battaglia, Jean-Luc	67, 72
Baucour, Philippe	35
Baumard, Théo	33
Beaubert, François	56
Beaumale, Marion	116
Beaumont, Olivier	9
Béchet, Fabien	70
Bédécarrats, Jean-Pierre	49
Begot, Sylvie	22, 106, 111
Bellache, Hamid	87
Bellettre, Jérôme	129
Benabdesselam, Azzedine	15
Bénard, Pierre	47
Bentivegni, Marcello	45, 96
Berger, Julien	69
Bergin, Gaëtan	48
Berkane, Sonia	113
Bernardin, Frédéric	16

Bernhard, Maïté	62
Berra, El Mehdi	38
Berthoumieu, Pierre	28
Bertin, Yves	5, 117
Bertossi, Remi	117
Bikard, Jérôme	33
Bissuel, Valentin	59
Blanco, Stéphane	11, 120
Blet, Nicolas	92
Blidia, Abdelhamid	4
Bompas, Jeremy	23
Bonjour, Jocelyn	128
Bonzoms, Florian	7
Bornert, Michel	44
Boubaker, Riadh	125
Boubanga Tombet, Stephane	74
Bougeard, Daniel	87, 98
Bouineau, Vincent	44
Boulet, Pascal	64
Bourges, Coline	82
Boutaous, M'Hamed	50
Bouvier, Salima	97
Bouyer, Baptiste	6
Bouyer, Julien	17
Bouzid, Sihem	107, 113
Boyard, Nicolas	33, 99
Bozonnet, Emmanuel	95
Brazane, Samy	75
Bricteux, Laurent	21, 47
Brima, Abdelhafid	107, 113
Briottet, Xavier	6
Bruch, Arnaud	29
Bruneau, Denis	100
Burot, Daria	64

C

Cailliez, Sylvain	71
Caney, Nadia	20, 68
Capron, Isabelle	119
Carbonnier, Benjamin	112
Castaing-Lasvignottes, Jean	62, 110
Castelain, Cathy	39

Celzard, Alain	122, 127
Charaoui, Nathaly	12
Chalet, David	71
Chamagne, Didier	35
Chardome, Geoffroy	105
Chassain, Clément	67
Chedid, Teddy	49
Chems Mourtaday, Nada	120
Chénier, Eric	126
Cherif, Yassine	31
Chevalier, Stéphane	80–82
Chotard, Thierry	7
Chouder, Ryma	15
Chtioui, Feryal	95
Clain, Pascal	121
Claverie, Rémy	17
Clavier, Rémi	78
Cornut, Kevin	96
Coste, Pierre	68
Courouble, Antoine	128
Crayssac, Frédéric	66
Cremieux, Marie-Adelaide	66
Cressin, Maxime	70
Cuer, Alexandre	16

D

Darie, George	24
David, Franck	41
David, Martin	55
David, Mathieu	110
Davies, Neil	88
Davila, Camila	103
Debenest, Gérald	41
Dejean, Baptiste	28
De Labachellerie, Michel	4
Delacroix, Jules	78
Delahaye, Anthony	119, 121
Delaleux, Fabien	14, 75
Delort-Laval, Maxime	32
Demri, Ghiles	126
Denis, Alain	119
De Paepe, Ward	21, 47
De Sauvage, Jean	93
Desbiyes, Hélène	100
Désévaux, Philippe	106
Dessante, Philippe	10
Dhahri, Hacen	53
Dilhaire, Stefan	82
Dimitrova, Zlatina	10
Diny, Mouad	5
Djetel-Gothe, Steve	22
Druart, Guy	45
Dubar, Mirentxu	97

Dufresne, Jean-Louis	11, 120
Duguay, Christelle	44, 123
Duluc, Marie-Christine	37, 91
Durastanti, Jean-Félix	14, 75

E

El Hafi, Mouna	11, 120
El Rassy, Elissa	33
Ennass, Kamal	73
Eymet, Vincent	11, 120

F

Falcoz, Quentin	118
Fan, Yilin	39
Faraji, Mustapha	38
Farges, Olivier	17, 40, 64
Faugeroux, Olivier	7
Fayette, Laurent	44
Feldheim, Véronique	98, 105
Ferrand, Martin	30
Ferré, Alexis	29
Fierro, Vanessa	122, 127
Fillet, Romain	122
Fois, Magali	112
Fonlupt, Mathias	63
Forest, Vincent	11, 120
Fournaison, Laurence	119, 121
Fournier, Richard	11, 120
Franquet, Erwin	49

G

Gaillard, Yves	40
Garcia, Pierre	49
Garcia, Sandra Elizabeth	37
Gardarein, Jean-Laurent	123
Gasparin, Suelen	69
Gaudry, Thierry	99
Gaume, Benjamin	61
Gautier, Rémi	52
Gavignet, Eric	35
Geiger, Frédéric	19
Geslain, Edouard	83
Gheribi, Aimen E.	123
Giroux-Julien, Stéphanie	30
Glantz, Tony	51
Glouannec, Patrick	89
Gonçalves Dos Santos, Rogério	124
Gradeck, Michel	51, 124
Grande, Daniel	112
Guernouti, Sihem	6
Gustin, Frédéric	111
Guyot, Eric	74

H

Hairy, Patrick	40	Le, Dang-Thi	112
Hamdaoui, Ons	36	Lefèvre, Frédéric	90
Hameury, Jacques	9	Lefevre, Nicolas	99
Hamidouche, Souria	52	Le Metayer, Olivier	94
Harmand, Souad	125	Lemonnier, Denis	26
Harnane, Yamina	107, 113	Lemort, Vincent	103, 108
Hay, Bruno	9	Le Mouellic, Pierre	99
Henry, Jean-François	46, 77	Lenne, Thomas	45
Hiremath, Anupam Mahantayya	8	Lepiller, Valérie	106, 111
Hoang, Hong-Minh	119	Le Roux, Diane	18
Huapaya Otoy, Juan Jesus	96	Letessier, Jordan	123
Huc, Nicolas	60	Leveque, Marie	90
<hr/>			
I			
Ibos, Laurent	36, 75	Lhermet, Guillaume	20
Izerroukyene, Abdelkader	56	Liemans, Benoit	98
<hr/>			
J			
Jadal, Mariam	34	Lin, Jian	114
Jafari Fesharaki, Pouya	50	Lioger–Arago, Robin	68
Jandah, Maher	12	Lips, Stéphane	90
Jaubert, Jean-Noël	19	Li, Yijun	39
Jkaoua, Zineb	100	Lochegnies, Dominique	70
Joly, Frédéric	59	Lorring, Dylan	118
Josien, Marc	44	Lorgouilloux, Yannick	125
<hr/>			
K			
Kadoch, Benjamin	94	Lourdin, Denis	119
Kallio, Sonja	104	Lucas, Franck	88
Khelladi, Sofiane	56	Luna Valencia, Juan Esteban	51
Konduru, Raj Narayan	40	Luo, Lingai	39
Kouadio Diango, Alphonse	102	<hr/>	
Kovchar, Jean	4	M	
Krause, Kevin	80	Maamary, Rabih	12
Kusiak, Andrzej	67, 72	Mabrouk, Riheb	53, 54
Kziazyk, Théo	35	Mahouche-Chergui, Samia	112
<hr/>			
L			
Labergue, Alexandre	51	Maigret, Jean-Eudes	119
Labrousse, Denis	91	Maillet, Denis	79
Lacour, Stephanie	102, 119	Maire, Jérémie	82
Lange, Jonathan	110	Manceau, Rémi	29
Lanzetta, François	4, 22	Mannessiez, Philippe	71
Laouar-Meftah, Siham	26	Mansour, Yves	109
Laouti, Amina	26	Maragna, Charles	58
Lapertot, Arnaud	94	Maranzana, Gaël	127
Lapeyre, Paule	11	Marc, Olivier	62, 88
Laribi, Afef	106	Massoli, Patrizio	129
Larrey, Eric	100	Masson, Renaud	44
Lassue, Stéphane	31	Mateos Canseco, Alejandro	72
Lavieille, Pascal	116	Mayet, Clement	91
Le-Berre, Rémi	30	Mazet, Thierry	48
Le Bideau, Pascal	89	Mazioud, Atef	36
Le Corre, Steven	33	Mellado, Nicolas	120
		Méresse, Damien	56, 97
		Merlat, Lionel	46
		Meulemans, Johann	73
		Meyer, Antoine	8
		Mhimid, Abdallah	36
		Michaux, Pierre	61
		Migan Dubois, Anne	37

Miscevic, Marc	116	Privat, Romain	19
Moliere, Michel	19	Pron, Hervé	77
Monchau, Jean-Pierre	66	Proust, Alain	7
Montazel, Arthur	78		
Moreau, Florian	27	Q	
Moreau, Philippe	70, 97	Quéméner, Olivier	59, 61
Morin, Céline	56	Quilichini, Emmanuel	62
Morin, Franck	20		
Mourtaday, Nada Chems	11	R	
Moutin, Léo	44	Rahmé, Pierre	109
Mozet, Kevin	127	Ramdane, Samy	126
Mustapha, Fatme	59	Randrianalisoa, Jaona	46
Mustapha, Karkri	101	Ravichandran, Rajalakshmi	117
Musy, Marjorie	6	Razouk, Refat	9
Mutabazi, Innocent	8	Rémy, Benjamin	48, 73
		Retailleau, Florent	46
N		Reulet, Philippe	28
Naceur, Hakim	70	Rigollet, Fabrice	123
Naili, Salah	112	Rioual, François	121
Naji, Hassane	53	Riou, Olivier	75
Naudin, Thomas	129	Rivière, Philippe	32
Neveu, Pierre	18	Rodiet, Christophe	76, 77
Nguyen, Vu-Hieu	112	Rodler, Auline	6
Nicolas, Vincent	122, 127	Romestant, Cyril	117
Nicolas, Xavier	126	Rouaud, Olivier	109
Notingher, Petru	76	Roupioz, Laure	6
Nyffenegger-Péré, Yaniss	11, 120	Roux, Stéphane	39
		Royer, Alex	64
		Rudkiewicz, Martin	41
O		Rullière, Romuald	128
Olivès, Régis	18, 118	Russeil, Serge	52, 98
Orlande, Helcio	57		
Ouchene, Rafik	52	S	
Ouenzerfi, Safouene	125	Saavedra, Sebastien	119
Ouzzine, Badr	93	Salagnac, Patrick	95
		Samah, Walid	121
P		Sanjivy, Kanhan	88
Pappa, Alessio	21, 47	Sartre, Valérie	90
Parent, Gilles	17, 40	Saury, Didier	27
Patin, Mathieu	111	Schaefer, Sébastien	127
Paulin, Mathias	120	Schick, Vincent	40, 48, 73
Paulus, Nicolas	103	Sdanghi, Giuseppe	127
Peillon, Sébastien	76	Seiwert, Jacopo	66
Périlhon, Christelle	102	Semeraro, Alessandro	5
Petit, Marc	10	Sempey, Alain	100
Petit, Mickael	91	Serra, Sylvain	29
Pierre, Thomas	83	Sevi, Prince	16
Piqueras, Maud	77	Silva, Rodrigo	57
Ploteau, Jean Pierre	89	Simo Tala, Jules Voguelin	87
Plouraboué, Franck	41	Siroux, Monica	24, 104, 114
Pongnot, Gael	91	Slim, Rayan	109
Popiolek, Anastasia	10	Slobodeniuk, Maksym	117
Pouvreau, Jérôme	29, 49	Sommier, Alain	81
Pradere, Christophe	81		

Soucasse, Laurent	32
Soufiani, Anouar	32
Spitaels, Valentin	96
Stouffs, Pascal	15
Stutz, Benoit	16
Szymkiewicz, Fabien	93

T

Tarby, Florian	22
Tarlet, Dominique	129
Tauveron, Nicolas	20
Theodoro De Souza Netto, Arlindo	124
Thil, Stéphane	7
Thome, Ramzi	110
Toutant, Adrien	55
Trannoy, Nathalie	12
Tremeac, Brice	58
Trinquet, Francois	102
Trouillet-Fonti, Lise	33

U

Ucinski, Dariusz	69
Uystepuyst, David	56

V

Vaillon, Rodolphe	77
Van'T Veer, Thibault	5

Vanson, Jean-Mathieu	123
Veillé, Jean-Marc	99
Verhaeghe, Antoine	47
Vicente, Jérôme	123
Vieira Da Silva Oliveira, Arthur	51, 124
Villemin, Thomas	17
Voronca, Stefan-Dominic	24

W

Wagner, Marc	66
Weppe, Alexandre	27

X

Xin, Shihe	50
------------------	----

Y

Yoshikawa, Harunori	8
Younsi, Zohir	87

Z

Zacharie, Célien	48
Zanatta, Luca	14
Zeiny, Salem	31
Zeiri, Hassen	36
Zeitoun, Wael	114
Zeoli, Alanis	108
Zhang, Zhenhao	101
Zuzio, Davide	28